

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



ЯНСАИТОВА МИЛЯУША ИСМАГИЛОВНА

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ВАКУУМНЫХ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РЕГЛАМЕНТАЦИИ
В НОРМАТИВНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Специальность 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
Полякова Марина Андреевна
доктор технических наук

МАГНИТОГОРСК - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ В НОРМАТИВНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	12
1.1. Требования к свойствам покрытий в действующих стандартах	12
1.2. Особенности проведения метрологической экспертизы технологической документации на изделия с покрытием	24
1.3. Анализ факторов, влияющих на свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий	28
1.4. Системный анализ технологических процессов нанесения покрытий	34
1.5. Выводы. Постановка цели и задач исследования	39
ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ СВОЙСТВ ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ TiN В ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	42
2.1. Особенности регламентации свойств покрытий в действующей конструкторской и технической документации (на примере деталей газотурбинного двигателя)	42
2.2. Проявление функциональных взаимодействий в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»	48
2.3. Построение структурно-функциональной модели технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN	54
2.4. Выводы по главе 2	59
ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ «ИЗДЕЛИЕ - ВАКУУМНОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ» ДЛЯ ВЫБОРА НОРМИРУЕМЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЯ	60
3.1. Определение структурно-функциональных связей при осуществлении технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного	

покрытия	60
3.2. Формирование элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»	64
3.3. Определение функциональных взаимодействий в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»	67
3.4. Разработка классификации свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий с учетом функциональных взаимодействий в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»	71
3.5. Разработка алгоритма выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной и технической документации	75
3.6. Выводы по главе 3	81
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ТОЛЩИНЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ TiN В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ДЕТАЛИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	83
4.1. Методика проведения исследования	83
4.2. Факторный анализ влияния расположения деталей в вакуумной камере на толщину и микротвердость покрытия TiN	87
4.3. Исследование влияния расположения деталей в вакуумной камере на толщину, микротвердость и фазовый состав вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN	91
4.4. Разработка технологической инструкции «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на Цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль» с учетом функциональных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN	99
4.5. Выводы по главе 4	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107

Приложение 1	127
Приложение 2	135
Приложение 3	149
Приложение 4	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации.

Одним из ключевых вопросов при разработке требований нормативной и технической документации является выбор нормируемых свойств объекта стандартизации. В настоящее время нормирование свойств объекта стандартизации основывается на процессе согласования интересов участников процесса разработки того или иного нормативного документа и достижения консенсуса между ними. Это прослеживается, например, при пересмотре «старых» стандартов, т.е. при их актуализации, при внесении изменений в стандарты на те или иные численные значения свойств объекта стандартизации, в процессе гармонизации отечественных стандартов с требованиями зарубежных норм и т.д.

При этом следует учитывать, что каждое нормируемое свойство отображает взаимодействие, с одной стороны, производителя, который должен обеспечить соответствующее значение нормируемого свойства в процессе производства, а с другой стороны, для потребителя каждое свойство означает необходимость обеспечения выполнения определенной функции. С этой точки зрения актуальной является задача разработка такой методики, которая, с одной стороны, обеспечивала выбор определенный набор (перечень) свойств объекта стандартизации для регламентации в нормативной и технической документации, который отражал и возможности производителя обеспечить соответствующий уровень этих свойств в процессе производства, и интересы потребителя для возможности выполнения объектом стандартизации необходимых потребительских функций.

Значительный интерес представляет нормирование свойств функциональных покрытий, которые широко применяются для придания поверхности специальных свойств. Поскольку покрытие следует рассматривать как часть системы «изделие - покрытие», т.е. покрытие не существует само по себе, а всегда наносится (или формируется) на той или иной подложке (изделии), то его свойства будут зависеть не только от материала и технологических режимов нанесения, но и от свойств подложки.

Как правило, в действующих стандартах, регламентирующих свойства покрытий, регламентируются только те свойства, которые в основном обусловлены только технологией нанесения, например, толщина, прочность сцепления и др. При этом не учитываются свойства, необходимые для функционирования изделия с покрытием в целом, что является достаточно сложной задачей. При этом необходимо учитывать условия работы изделия (внешние факторы), особенности технологического процесса нанесения покрытия в условиях многозначности технологических режимов, наличие неконтролируемых и возмущающих факторов, неизбежно сопровождающих любой технологический процесс нанесения покрытия, влияние свойств подложки (материала изделия) на свойства покрытия и др. В этой связи необходимо использовать принципиально новые подходы для выбора номенклатуры свойств покрытий для нормирования в нормативной и технической документации.

Особый интерес и практическую значимость приобретают вопросы нормирования свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий. Как известно, такие покрытия являются эффективным инструментом повышения эксплуатационных свойств изделий различного назначения. Применение вакуумных ионно-плазменных покрытий характеризуется большими технологическими возможностями по изменению физико-химических свойств поверхности за счет возможности формирования покрытий различного стехиометрического состава. Однако имеющиеся проблемы сдерживают широкое применение вакуумных ионно-плазменных покрытий в производстве ответственных изделий. Одной из таких проблем является отсутствие нормативной и технической документации, позволяющая конструктору назначить вид покрытия, состав, его физико-химические характеристики в зависимости от условий эксплуатации изделий.

Таким образом, в настоящее время разработка научно-обоснованной методики для выбора свойств покрытий для регламентации в нормативной и технической документации с учетом особенностей существующих технологических процессов их нанесения и необходимости обеспечения соответствующих функциональных свойств изделия с покрытием является актуальной задачей исследования.

Степень разработанности темы исследования.

Общим вопросам стандартизации, вопросам практического применения принципов и методов стандартизации посвящены работы, основанные на трудах зарубежных и российских ученых: Г. Тагути, Ф. Тейлора, Ф. Кросби, Ю.П. Адлера, В.В. Бойцова, Б.В. Бойцова, В.В. Бринзы, В.М. Постыки, В.Т. Жадана, И.М. Лифица, В.В. Ткаченко, Р.А. Фатхутдинова и других. Комплексным исследованием особенностей формирования свойств ионно-плазменных покрытий занимались И.И. Аксенов, А.А. Андреев, С.Н. Григорьев, В.Ф. Горбань, В.А. Барвинок, В.Ф. Безъязычный, В.Ю. Замятин, В.И. Богданович, В.В. Будилов, Н.Н. Коваль и другие. Однако вопросам выбора перечня нормируемых свойств покрытий для обеспечения необходимых эксплуатационных функций изделия с покрытием, а также особенностям регламентации свойств покрытий в различных видах нормативной и технической документации не уделено должного внимания.

Целью работы является разработка методических основ для обоснования выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий при нормировании в нормативной и технической документации.

Задачи исследований:

1. Провести метрологическую экспертизу действующей технической документации для определения перечня свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия, необходимых для нормирования с учетом условий эксплуатации изделия с покрытием.

2. Определить взаимосвязь между функциями и свойствами вакуумного ионно-плазменного покрытия с учетом особенностей существующих системных взаимодействий в системе «изделие – покрытие».

3. Разработать алгоритм выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий для регламентации в нормативной и технической документации при условии обеспечения необходимых эксплуатационных свойств изделия с покрытием.

4. Провести апробацию разработанной концепции оценки и выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий при разработке технологической инструкции на детали газотурбинного двигателя.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлена взаимосвязь эксплуатационных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия и функций изделия с покрытием, позволяющая разработать научно обоснованный подход к выбору свойств покрытия для регламентации в нормативной и технической документации.

2. Разработан алгоритм выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий при регламентации в нормативной и технической документации, отличающийся учетом взаимосвязи между функциями и свойствами элементов системы «изделие – покрытие».

3. Определены рациональные условия формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN, позволяющие определить те его свойства, которые должны быть нормированы в технической документации на изделие с покрытием.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Определены структурно-функциональные связи при осуществлении технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, что позволяет определить свойства покрытия, необходимые для регламентации в нормативной и технической документации.

2. Исследована взаимосвязь между расположением изделий в вакуумной камере и толщиной, микротвердостью и фазовым составом вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN, что позволило установить образование твердого раствора азота в α -Ti с ГПУ решеткой (α -фаза) и моонитрида TiN с ГЦК решеткой (δ -фаза) и определить содержание фаз Ti и TiN в покрытии.

3. Разработана и внедрена технологическая инструкция «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль» в ПАО «ОДК - Уфимское моторостроительное производственное объединение».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач исследования были использованы системный анализ, функционально-целевой анализ, факторный анализ, QFD-анализ, метод моделирования IDEF0, инструментальные методы измерения микротвердости и толщины покрытия, рентгеноструктурный анализ фазового состава вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки и выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий для регламентации в нормативной и технической документации, основанная на установлении системных взаимодействий в системе «изделие - покрытие».

2. Алгоритм выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий, позволяющий учитывать взаимосвязи между функциями и свойствами элементов системы «изделие-покрытие», что является основой для нормирования свойств покрытий в нормативной и технической документации.

3. Структурно-функциональные связи между параметрами технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия и свойствами покрытия в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие».

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность и обоснованность полученных научных результатов подтверждается непротиворечивостью и корректностью исходных положений исследования, логикой диссертационной работы. Степень достоверности результатов подтверждается корректностью постановки цели и задач диссертационного исследования, глубиной проработки основных аспектов изучаемой проблемы, творческим использованием различных методов научного исследования.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается апробацией результатов диссертационных исследований на конференциях различного уровня: VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов (Уфа, 2015 г.), IX Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2015 г.), Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2016 г.), X Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2017 г.), XVI, XVII Международные научно-практические конференции «Управление качеством» (Москва, 2017, 2018 гг.), XLIII, XLIV Международные молодёжные научные конференции «Гагаринские чтения – 2017», «Гагаринские чтения – 2018» (Москва, 2017, 2018 гг.), 3-я и 4-я Международные конференции молодых ученых Magnitogorsk Rolling Practice

(Магнитогорск, 2018, 2019 гг.); International Conference “Functional Materials: Predicting properties and manufacturing Technologies” (ICFM-2019) (Пермь, 2019 г.), 77-ая Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2019 г.); Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию Руденского индустриального института «Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний» (Рудный, Республика Казахстан, 2019 г.).

Внедрение результатов диссертационных исследований. Результаты работы внедрены в ПАО «ОДК - Уфимское моторостроительное производственное объединение», а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции, а именно п. 2. «Стандартизация, метрологическое обеспечение, управление качеством и сертификация», п. 3 «Методы стандартизации и менеджмента (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование) качества объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции».

Объект исследования: свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Предмет исследования: нормирование свойств покрытий в нормативной и технической документации.

Личный вклад автора заключается в выборе и обосновании актуальности темы исследования, постановке задач для достижения цели исследования, проведении анализа действующих стандартов в предметной области исследования, установлении системных взаимодействий в системе «изделие-покрытие», проведении полного факторного эксперимента типа 3^k с двухуровневой вариацией факторов, проведении экспериментальных исследований, проведении метрологической экспертизы технической документации в ПАО «ОДК - Уфимское моторостроительное производственное объединение», разработке технологической инструкции, подготовке статей по теме диссертационной работы.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ, в том числе 8 статей в журналах, включенных в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, 1 статья проиндексирована в наукометрической базе Scopus, получен 1 патент Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 126 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 171 источник, содержит 41 рисунок, 14 таблиц и 4 приложения на 24 страницах.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ В НОРМАТИВНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

1.1. Требования к свойствам покрытий в действующих стандартах

В настоящее время эффективным способом модификации поверхности изделий является нанесение покрытий из различных материалов, что позволяет изменить механические, электрические, магнитные, тепловые, химические и другие свойства исходного материала, получая изделия с требуемыми свойствами поверхности с учетом характера внешних воздействий [1]. Как известно, свойства покрытий в значительной степени зависят не только от материала самого покрытия, но также от метода и режимов его нанесения, материала подложки (изделия, на которое наносится покрытие), а также от свойств ее поверхности [2]. При выборе способа нанесения покрытия необходимо учитывать следующие факторы:

- условия эксплуатации изделия;
- химическую и физико-механическую совместимость материалов покрытия и изделия, в том числе твердость, модуль упругости, коэффициент термического расширения;
- возможность осаждения покрытия выбранным способом на изделие;
- возможность получения структуры покрытия с заданным комплексом свойств;
- возможность осаждения покрытия на изделие с требуемыми параметрами с обеспечением необходимых свойств поверхности.

Ввиду наличия различных факторов, влияющих на выбор покрытия, а также определяющих его функциональные свойства, в научной литературе приводятся различные варианты классификации покрытий по различным классификационным признакам. В работах [2, 3] покрытия подразделены по назначению на восстановительные (восстановление недостаточного объема или размеров материала поврежденных или бракованных изделий), защитные (обеспечение коррозионной, эрозионной, износостойкости, жаропрочности и жаростойкости изделий),

декоративные (обеспечение внешнего вида изделия), технологические покрытия для обеспечения (анти)адгезионных свойств, химической активности/инертности и др., функциональные покрытия для придания поверхности электрических, магнитных, тепловых, фрикционных, оптических, химических и других свойств. Согласно данной классификации конструкционные покрытия могут выполнять роль конструктивных элементов изделия, например, в изделиях электронной техники; корковые покрытия формируются для получения необходимой формы, а затем удаляются с основы для использования в самостоятельных целях, например, при производстве масок.

Следует отметить, что в настоящее время используются различные методы получения покрытий, которые основаны на физических и химических явлениях и процессах. Классификационными признаками процессов нанесения покрытий являются [4]:

- фазовое состояние наносимого материала покрытия (твердое, жидкое, атомарное, ионизированное);

- способ получения вещества или его фазы для формирования покрытия (расплавление, растворение, плазменный и термический нагрев, термическое испарение, катодное распыление, дуговое испарение, плазменная ионизация газа);

- состав транспортной, защитной или реакционной атмосферы (неконтролируемая атмосфера, динамический вакуум, инертный газ, активный (реакционный) газ);

- способ активации процесса формирования покрытий (термический, кинетический, плазменный нагрев, ионная бомбардировка изделия, электронная или фотонная стимуляция);

- характер процессов, которые протекают при формировании покрытия (кристаллизация, рекристаллизация, физическая конденсация, химические и плазмохимические реакции, диффузионное насыщение, гомогенные и гетерогенные поверхностные реакции).

В зависимости от материала покрытия делятся на органические, неорганические и органо-неорганические (рисунок 1.1) [5].

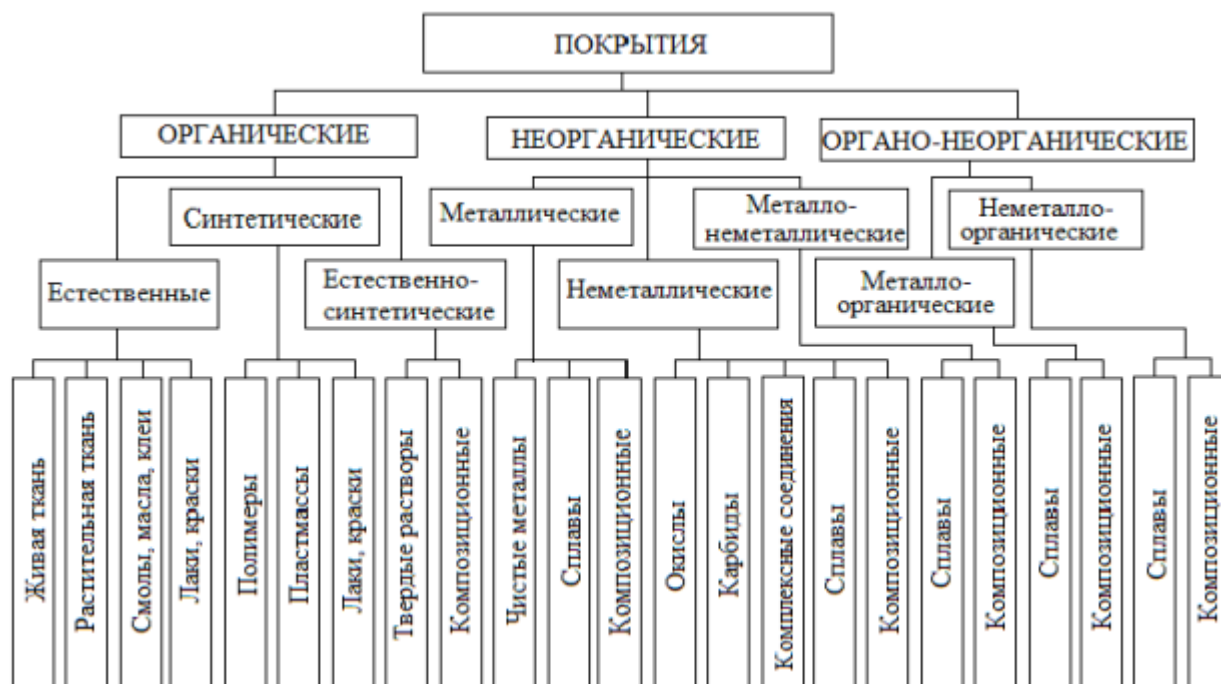


Рисунок 1.1 – Классификация покрытий по материалам [5]

Поскольку в условиях эксплуатации изделие может испытывать различные виды внешнего воздействия, то это обусловило появление расширения спектра свойств покрытий. Учитывая данный факт, в работе [5] функциональные свойства покрытий предлагается разделить на следующие группы: стойкие, механико-прочностные, декоративные, теплотехнические, светотехнические, электрорадиотехнические, физико-химические, экранирующие, поверхностно-активные и преобразующие (рисунок 1.2).

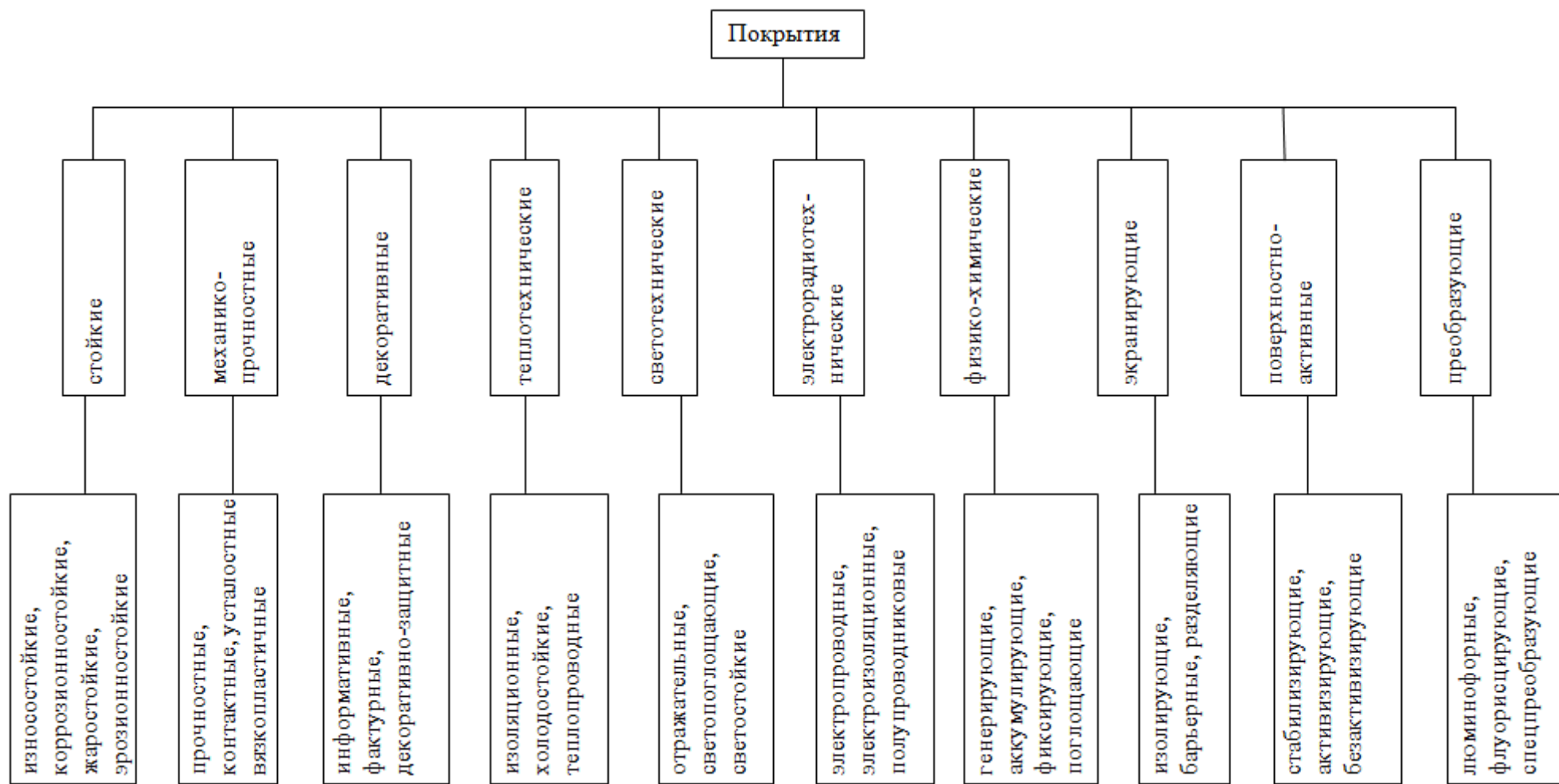


Рисунок 1.2 – Классификация покрытий по функциональному признаку [5]

Как известно, нормирование свойств различных объектов и требований к ним содержится в различных видах нормативной и технической документации. Действующие стандарты, объектом стандартизации которых являются покрытия, условно можно разделить на стандарты на термины и определения, стандарты, в которых регламентируются общие требования и свойства покрытий, а также стандарты на технологические процессы нанесения покрытий (таблица 1.1).

Проведенный анализ содержания действующих стандартов показал, что, несмотря на широкий спектр существующих видов покрытий, только два стандарта нормируют термины и определения в данной предметной области. Причем, в ГОСТ 9.008-82 [6] приведены термины и определения на покрытия в зависимости от материала, в то время как ГОСТ 28076-89 [7] регламентирует термины и определения на газотермические покрытия, учитывая специфические особенности используемых материалов, способов нанесения данных покрытий и их характерные свойства, такие как пористость и разнотолщинность.

К регламентируемым в стандартах общим требованиям к покрытиям относятся внешний вид покрытия, его толщина и прочность сцепления. Кроме того, в зависимости от вида покрытия в стандартах могут содержаться дополнительные требования, например, к химическому составу покрытия, его пористости, функциональным и защитным свойствам, структуре, остаточной (водородной) хрупкости, микротвердости, шероховатости. Стандарты могут регламентировать размеры как перед нанесением, так после нанесения покрытия.

При этом стоит отметить, что при выборе покрытий могут нормироваться назначение детали и покрытия [9], условия эксплуатации детали с покрытием [32], материал детали, свойства покрытия и его влияние на характеристики материала детали, способ получения покрытия, экологичность металла покрытия и технологического процесса нанесения, допустимость контакта металлов и металлических и неметаллических покрытий [33] (таблица 1.2).

Таблица 1.1 – Действующие стандарты, регламентирующие требования к покрытиям

Стандарты на термины и определения	Стандарты на свойства покрытий, общие требования	Стандарты на технологические процессы нанесения покрытий
ГОСТ 9.008-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения [6]	ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования [8]	ГОСТ ISO 10684-2015. Межгосударственный стандарт. Изделия крепежные. Покрытия, нанесенные методом горячего цинкования [27]
ГОСТ 28076-89. Газотермическое напыление. Термины и определения [7]	ГОСТ 9.303-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору [9]	ГОСТ 28302-89. Покрытия газотермические защитные из цинка и алюминия металлических конструкций. Общие требования к типовому технологическому процессу [28]
	ГОСТ Р 9.316-2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия термодиффузионные цинковые. Общие требования и методы контроля [10]	ГОСТ Р 57410-2017. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита от коррозии изделий из сплавов цветных металлов методом диффузионной обработки цинком. Общие требования к технологическому процессу [29]
	ГОСТ 4.54-79. Система показателей качества продукции. Покрытия полимерные защитные изолирующие, дезактивирующие и аккумулирующие. Номенклатура показателей [11]	ГОСТ Р 57411-2017. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита от коррозии изделий из чугуна и стали методом диффузионной обработки цинком. Общие требования к технологическому процессу [30]

	ГОСТ 4.86-83. Система показателей качества продукции. Покрытия полимерные защитные дезактивируемые. Номенклатура показателей [12]	ГОСТ Р 57419-2017. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита от коррозии металлоизделий из сталей повышенной и высокой прочности методом диффузионной обработки цинком. Общие требования к технологическому процессу [31]
	ГОСТ 4.457-86. Система показателей качества продукции. Линии для химической, электрохимической обработки поверхности и получения покрытий. Номенклатура показателей [13]	
	ГОСТ Р ИСО 10683-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Изделия крепежные. Неэлектролитические цинк-ламельные покрытия [14]	
	ГОСТ ISO 4042-2015. Межгосударственный стандарт. Изделия крепежные. Электролитические покрытия [15]	
	ГОСТ 31577-2012. Протезы зубные металлические с защитными покрытиями. Технические условия [16]	
	ГОСТ Р 57408-2017. Наноматериалы. Нанопокрyтия сверхтвердые и износостойкие. Общие технические требования [17]	
	ГОСТ 9.031-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия анодно-окисные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля [18]	
	ГОСТ 9.304-87. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля [19]	

	ГОСТ 9.307-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля [20]	
	ГОСТ 9.315-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия алюминиевые горячие. Общие требования и методы контроля [21]	
	ГОСТ 27953-88. Покрытия детонационные. Общие требования [22]	
	ГОСТ 28844-90. Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие. Общие требования [23]	
	ГОСТ ISO 2081-2017. Металлические и другие неорганические покрытия. Электролитические покрытия цинком с дополнительной обработкой по чугуны и стали [24]	
	ГОСТ Р 51163-98. Покрытия термодиффузионные цинковые на крепежных и других мелких изделиях. Общие требования и методы контроля [25]	
	ГОСТ Р 50575-93. Проволока стальная. Требования к цинковому покрытию и методы испытания покрытия [26]	

Таблица 1.2 - Свойства покрытий, которые нормируются в действующих стандартах

Свойства покрытий	Номер стандарта	Количество стандартов
Толщина покрытия	ГОСТ 9.008-82, ГОСТ 9.301-86, ГОСТ 9.303-84, ГОСТ Р 9.316-2006, ГОСТ 4.54-79, ГОСТ 4.86-83, ГОСТ 4.457-86, ГОСТ Р ИСО 10683-2013, ГОСТ ISO 4042-2015, ГОСТ 31577-2012, ГОСТ Р 57408-2017, ГОСТ 9.031-74, ГОСТ 9.304-87, ГОСТ 9.307-89, ГОСТ 9.315-91, ГОСТ 27953-88, ГОСТ 28844-90, ГОСТ ISO 2081-2017, ГОСТ Р 51163-98, ГОСТ ISO 10684-2015, ГОСТ 28302-89, ГОСТ Р 57410-2017, ГОСТ Р 57411-2017, ГОСТ Р 57419-2017	24
Разнотолщинность покрытия	ГОСТ 28076-89	1
Прочность сцепления с основой (адгезия)	ГОСТ 28076-89, ГОСТ 9.301-86, ГОСТ 9.303-84, ГОСТ Р 9.316-2006, ГОСТ 4.54-79, ГОСТ 4.86-83, ГОСТ Р ИСО 10683-2013, ГОСТ ISO 4042-2015, ГОСТ 31577-2012, ГОСТ 9.304-87, ГОСТ 9.307-89, ГОСТ 9.315-91, ГОСТ 27953-88, ГОСТ 28844-90, ГОСТ ISO 2081-2017, ГОСТ Р 51163-98, ГОСТ Р 50575-93, ГОСТ ISO 10684-2015, ГОСТ 28302-89	19
Шероховатость покрытия	ГОСТ 9.304-87, ГОСТ 28844-90	2
Микротвердость покрытия	ГОСТ 9.303-84, ГОСТ Р 57411-2017, ГОСТ Р 57419-2017, ГОСТ 27953-88, ГОСТ 28844-90	5
Твердость	ГОСТ 4.54-79, ГОСТ 27953-88, ГОСТ 28844-90, ГОСТ Р 57410-2017, ГОСТ Р 57411-2017, ГОСТ Р 57419-2017	6
Пористость	ГОСТ 28076-89, ГОСТ 9.301-86, ГОСТ 9.303-84, ГОСТ 9.304-87, ГОСТ 27953-88, ГОСТ 28844-90, ГОСТ 28302-89	7

Структура	ГОСТ 9.301-86, ГОСТ Р 57408-2017, ГОСТ Р 51163-98, ГОСТ Р 57410-2017, ГОСТ Р 57411-2017, ГОСТ Р 57419-2017	6
Химический состав	ГОСТ 9.301-86, ГОСТ Р 57408-2017, ГОСТ 9.307-89, ГОСТ 9.315-91, ГОСТ Р 57410-2017, ГОСТ Р 57411-2017, ГОСТ Р 57419-2017	7
Остаточная (водородная) хрупкость	ГОСТ Р 9.316-2006, ГОСТ Р ИСО 10683-2013, ГОСТ ISO 4042-2015, ГОСТ ISO 2081-2017, ГОСТ Р 57419-2017	5
Масса покрытия на единицу площади поверхности	ГОСТ 9.301-86, ГОСТ Р 50575-93	2
Маслоемкость	ГОСТ 9.301-86	1
Пластичность	ГОСТ Р ИСО 10683-2013, ГОСТ ISO 4042-2015	2
Температурная стойкость	ГОСТ Р ИСО 10683-2013	1

При выборе металлических и неметаллических покрытий, получаемых электрохимическим, химическим и горячим (олово и его сплавы) способами, согласно ГОСТ 9.301-86 устанавливаются общие требования к шероховатости поверхности основного металла, внешнему виду, толщине, прочности сцепления и требования к структуре, защитным и функциональным свойствам, химическому составу, пористости покрытия [8].

Также в стандартах могут быть регламентированы показатели назначения покрытий, радиационная стойкость, показатели надежности (срок службы покрытия, долговечность, надежность, ремонтпригодность), показатели технологичности (время высыхания, время выдержки покрытия до начала эксплуатации, толщина покрытий и др.), показатели физико-механических и физико-химических свойств (прочность при ударе, эластичность при изгибе, адгезионная прочность, внешний вид, шероховатость, остаточная (водородная хрупкость), химический состав, структура, пористость и т.д.) [9, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 21-26]. Указанные

свойства покрытий регламентированы для цинковых [10, 24-26], полимерных защитных дезактивируемых [12], неэлектролитических цинк-ламельных [14], электролитических [15], сверхтвердых и износостойких [17], анодно-окисных [18], газотермических [19, 23], алюминиевых [21] и детонационных [22] покрытий.

В стандартах ГОСТ ISO 10684-2015 [27], ГОСТ 28302-89 [28], ГОСТ Р 57410-2017 [29], ГОСТ Р 57411-2017 [30], ГОСТ Р 57419-2017 [31] регламентированы требования к технологическим процессам нанесения покрытий, которые применяются в промышленных масштабах: горячее цинкование, методы газотермического напыления покрытий, диффузионное цинкование изделий из сплавов цветных металлов, чугуна и стали. Учитывая промышленное применение данных технологических процессов нанесения покрытий, в данных стандартах приведены требования к обрабатываемым изделиям, материалам, оборудованию и оснастке, а также регламентируются внешний вид, толщина, прочность сцепления и шероховатость покрытия.

Проведенный анализ действующих стандартов в предметной области видов покрытий и методов их нанесения показал, что нормативные документы разработаны с учетом характерных особенностей материала (например, ГОСТ 9.301-86 [8], ГОСТ 9.307-89 [20], ГОСТ Р 51163-98 [25], ГОСТ 28302-89 [28]) или метода нанесения покрытия (например, ГОСТ Р 9.316-2006 [10], ГОСТ 27953-88 [22], ГОСТ ISO 10684-2015 [27]). В результате проведенного анализа установлено, что действующие стандарты не распространяются на вакуумные ионно-плазменные покрытия. Исключение составляет ГОСТ 31577-2012 Протезы зубные металлические с защитными покрытиями. Технические условия [16]. В данном стандарте приведены требования к зубным протезам и технологии их изготовления, материалу, конструкции, шероховатости поверхности и др., а также к покрытиям (используется многослойное композиционное покрытие, состоящее из 3 слоев: наружный защитно-декоративный (материал - карбонитрид титана или нитрид титана, или нитрид титана и циркония), промежуточный антикоррозионный (материал - карбид титана или титан и нитрид титана, или титан, или цирконий), переходный температурно-защитный (материал - титан или хром, или хром

и титан, или сталь 12Х18Н9Т или нитрид хрома)) для восстановления функции зубочелюстной системы в области ортопедической стоматологии. При этом к свойствам покрытия относятся их состав (многослойные композиционные покрытия), толщина в пределах от 2 до 5 мкм, внешний вид (цвет от светло-желтого до темно-желтого, равномерный блеск поверхности покрытия). Учитывая специфику эксплуатации такого покрытия, особые требования предъявляются к его адгезии с основой протезов, коррозионной стойкости, при этом между протезами с покрытием разность электрических потенциалов не должна быть более 400 мВ. При этом следует отметить, что данные требования относятся к вакуумному покрытию из многослойного композиционного покрытия, наносимое на конкретный вид изделия, а именно на зубные протезы. С этой точки зрения требования, содержащиеся в стандарте [16], конкретизированы для указанной области применения и определенных условий эксплуатации покрытия, поэтому их достаточно сложно распространить на другие изделия, испытывающие другие виды внешнего воздействия с таким же видом покрытия.

Кроме того, в действующих стандартах регламентируются только такие свойства, которые обусловлены только технологией нанесения покрытий, что является вполне очевидным, без учета выполняемых изделием функций. Это в значительной степени ограничивает возможности конструктора выбирать вид и материал покрытия с учетом характера внешних воздействий на изделие с покрытием. В этой связи необходимо разработать такой подход при выборе свойств покрытий для регламентации в нормативной и технической документации, который позволял бы сочетать и свойства, обеспечиваемые технологическим процессом получения покрытия, и те свойства покрытия, которые оказывают существенное влияние на его функционирование в заданных условиях эксплуатации.

1.2. Особенности проведения метрологической экспертизы технологической документации на изделия с покрытием

На уровне предприятия действуют различные виды нормативной, технической и конструкторской документации (рисунок 1.3). В указанных документах содержатся требования, начиная с приемки входных заготовок до выпуска готовой продукции с учетом испытаний и ремонта изделий после эксплуатации.

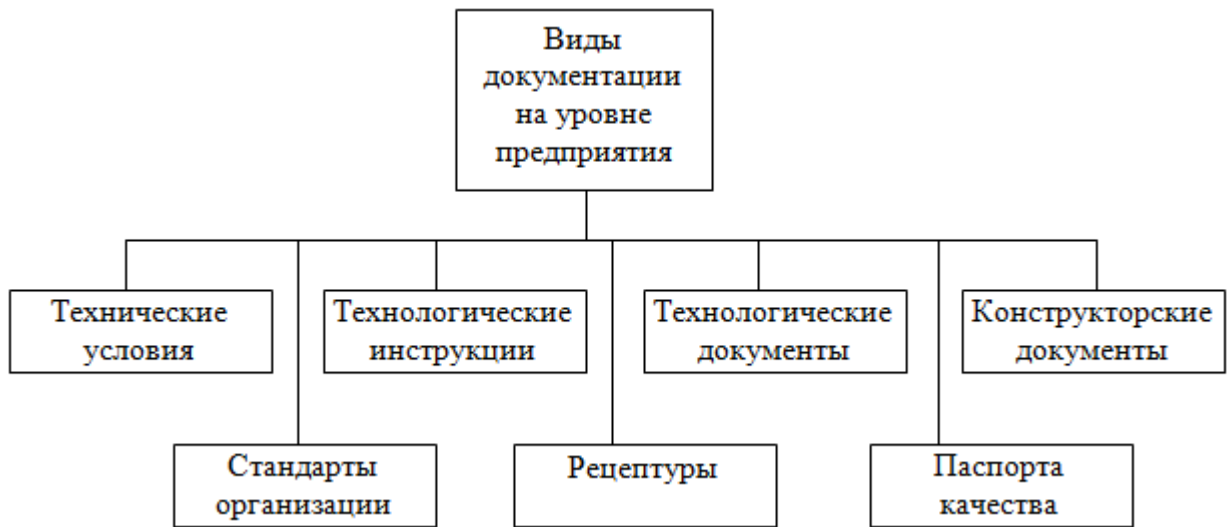


Рисунок 1.3 – Виды документации на уровне предприятия

Ход технологического процесса и свойства получаемого при этом изделия регулируются в конструкторской и технологической документации. При этом особую важность приобретают вопросы корректности и правильности оформления различных видов документов. Поэтому одним из важных практических аспектов является проведение метрологической экспертизы различных видов документации на всех этапах жизненного цикла продукции [34, 35]. С этой точки зрения проведение метрологической экспертизы является одним из видов работ практической стандартизации.

Сущность метрологической экспертизы технической документации заключается в анализе и оценивании технических решений по выбору измеряемых параметров, методов и средств измерений, установлению требований к точности из-

мерений [36-38]. Метрологической экспертизе подлежит техническая документация, в которой приводятся требования к нормам точности, информации о методах и средствах измерения [39, 40].

Целями метрологической экспертизы являются [39]:

- проведение анализа технических решений по выбору контролируемых показателей качества изделия, которые подлежат измерению и контролю;
- обеспечение контроля изделий на всех этапах жизненного цикла;
- выполнение требований по использованию методов и средств измерения;
- создание условий и методик выполнения измерений.

К задачам метрологической экспертизы относятся:

- анализ корректности технических требований и использования стандартизованных терминов и единиц измерений соответствии с РМГ 29-2013 «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения» [41] и ГОСТ 8.417-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин» [42] в документации;

- проверка оптимальности перечня измеряемых показателей, рассмотрение возможности взаимоисключения и замены «качественных» показателей на «количественные»;

- оценивание контролепригодности конструкции детали;

- проверка использования стандартизованных и аттестованных методик выполнения измерений;

- анализ требований к средствам измерений в соответствии с ГОСТ 8.009-84 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» [43];

- проверка правильности показателей точности измерений в соответствии с требованиями МИ 1317-2004 «Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров образцов продукции и контроле их параметров» [44];

- проверка правильности использования терминов, наименований, обозначений величин и применения их единиц.

До этапа разработки изделия вся конструкторская и технологическая документации должны пройти метрологическую экспертизу, включая заявку на разработку, техническое задание на проектирование и техническое предложение. Именно на данном этапе закладывается возможность осуществления контроля необходимых размеров проектируемого изделия средствами измерений, которые включены в действующий реестр средств измерений [34].

Правильность и корректность оформления соответствующих документов проверяется в ходе проведения метрологической экспертизы. Анализ материалов проверок органов государственного надзора за стандартами и средствами измерений показывают, что больше 60 % нарушений требований стандартов и технических условий, изготовление продукции неудовлетворительного качества происходит из-за несоблюдения метрологических правил и норм [45]. При этом, как отмечается, значительная доля нарушений метрологических требований приходится на нормативную и техническую документацию. Низкий уровень метрологической проработки приводит к невозможности контроля параметров уже изготовленных изделий (сложных деталей, сборочных единиц, технологического оборудования и, особенно часто, средств измерений). При обнаружении неконтролепригодности производство следует остановить, поскольку в случае выпуска изделий с неконтролируемыми параметрами возникает риск их неправильного функционирования с последствиями в виде возможных материальных потерь, аварий и катастроф. В этой связи метрологическая экспертиза нормативной и технической документации является обязательным этапом в области практической стандартизации [46-49].

В практической стандартизации при нормировании свойств в нормативной, конструкторской и технической документации используются числовые значения соответствующих контролируемых параметров. При этом могут использоваться как номинальные численные значения, так и численные значения с допустимыми отклонениями, т.е. в виде интервала. Выбор вида записи нормируемого параметра

в значительной степени зависит от характера проявляемого свойства объекта. Это и является объектом контроля при проведении метрологической экспертизы различного вида документации.

Наиболее часто повторяющимися ошибками конструкторов являются [34]:

- невозможность контроля детали, так как не позволяет конструкция детали и неправильно заданы допуски;

- неправильно выбраны измерительные базы;

- не соблюдены соотношения между допусками размера, формы, расположения поверхностей и требованиями к шероховатости поверхности.

Как показали результаты исследований, некорректное измерение формы и взаимного положения профиля рабочих лопаток моноколеса газовой турбины может явиться причиной брака данного вида изделия [50, 51]. С этой точки зрения надежность и долговечность изделий непосредственно зависят от показателей качества характеристик, указываемых в конструкторской документации.

Метрологическая экспертиза всех видов технической документации является одним из важных факторов, косвенно обеспечивающих качество изделий. При этом при проведении метрологической экспертизы следует учитывать специфику самого изделия, например, если на изделие наносится покрытие. В этом случае при проведении метрологической экспертизы конструкторской документации на изделие с покрытием необходимо проверять правильность, корректность и полноту перечня нормируемых показателей как самого покрытия, так и изделия с покрытием. С этой точки зрения в ходе метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации на изделия с покрытиями должны быть выявлены те свойства покрытия, которые обеспечиваются в ходе технологического процесса нанесения покрытия при обязательном условии обеспечения функциональных свойств изделия с покрытием в заданных условиях эксплуатации. Поэтому проведению метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации на изделие с покрытием следует уделять особое внимание.

1.3. Анализ факторов, влияющих на свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий

Свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий зависят от различных видов внешних и внутренних факторов. В работе [52] показано влияние ряда параметров вакуумного ионно-плазменного напыления на свойства получаемых покрытий (рисунок 1.4). При этом отмечается, что устранение существующих сложностей, обусловленных спецификой вакуумной ионно-плазменной обработки, является крайне сложной и наукоемкой задачей, что в ряде случаев экономически нецелесообразно. Поскольку для каждого вида покрытия характерен определенный набор значений системных свойств, то достижение максимального значения всех свойств нерентабельно [52].

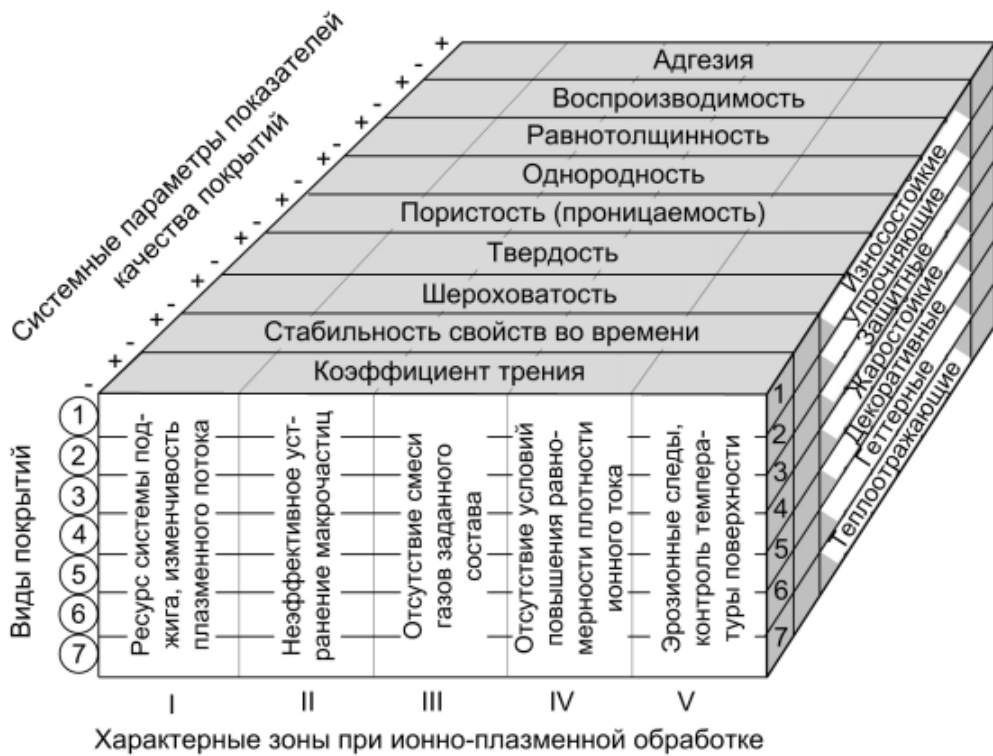


Рисунок 1.4 – Взаимосвязь свойств покрытия и параметров ионно-плазменной обработки [52]

С этой точки зрения вполне обосновано деление свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий на две группы. К первой группе свойств относятся си-

стемные свойства покрытий: адгезия, равнотолщинность по всей покрываемой поверхности, однородность химического и фазового состава, пористость, твердость, шероховатость, стабильность свойств во времени и др. Вторую группу составляют функциональные свойства покрытий: износостойкость, прочность, защитные и декоративные свойства, жаростойкость и др. При этом особую важность приобретают вопросы определения влияния технологических параметров процесса ионно-плазменного нанесения на свойства формируемых покрытий.

Так, в работе [53] для покрытий TiN выделяют следующие регулируемые параметры процесса ионно-плазменного нанесения, которые играют определяющее влияние на уровень свойств получаемых покрытий: ток дуги испарителя, время осаждения покрытия, опорное напряжение, давление азота, температура подложки и ток в катушке испарителя. Результаты проведенных авторами исследований показали, что изменение парциального давления азота приводит к изменению структуры и свойств формируемых покрытий. С увеличением давления данного реакционного газа структура покрытий характеризуется высоким уровнем микронапряжений и плотностью дислокаций. При значениях давления азота менее $1,3 \times 10^{-2}$ Па покрытия имеют низкие значения микротвердости, характеризуются высокой микропористостью, в структуре наблюдаются микротрещины. При увеличении давления азота до 1,3 Па величина микронапряжений в покрытии уменьшается, но при этом повышается пластичность при сохранении высокой твердости. Покрытия с высокой твердостью гомогенной структурой и низкой пористостью осаждают при давлении в камере $(532-798) \times 10^{-3}$ Па [53].

Одним из важных свойств ионно-плазменных покрытий является их шероховатость. Поскольку данным методом формируются покрытия толщиной до 200 нм [54], то шероховатость покрытий будет зависеть от шероховатости поверхности после механической обработки, а также от физико-химических процессов осаждения покрытий на поверхности деталей. При этом следует учитывать, что в процессе нанесения покрытия часто происходит изменение основного геометрического профиля изделия [54, 55]. На шероховатость покрытий также влия-

ют давление газа, ток и условия горения дуги, свойства материала покрытия, условия конденсации покрытия [56-59].

Как показал анализ литературных источников, особое внимание исследований посвящено изучению влияния различных технологических параметров вакуумного ионно-плазменного напыления на толщину, микротвердость и фазовый состав получаемых покрытий. В работах [57, 60, 61] отмечается, что реальная толщина и равномерность покрытий по всей площади поверхности изделия зависят от условий осаждения, габаритов детали, расположения деталей в вакуумной камере относительно плазменного потока, а также от его однородности.

Согласно [62-66] микротвердость покрытий TiN изменяется в диапазоне от 25 до 40 ГПа, данное свойство зависит от давления азота в вакуумной камере (рисунок 1.5).

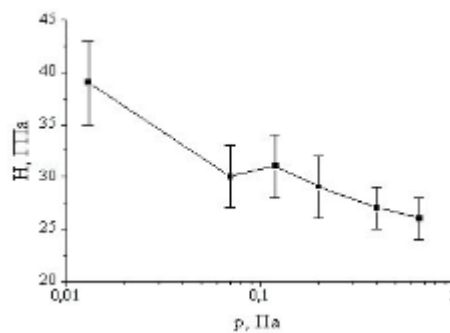


Рисунок 1.5 – Зависимость твердости покрытий TiN (H) от давления азота (p). $U_{п} = 230$ В, $I_{д} = 85$ А [66]

Результаты исследования процесса формирования TiN на поверхности режущего инструмента показали, что с увеличением давления азота уменьшаются размеры и количество капель титана в покрытии [66]. При давлении около 0,01 Па твердость покрытий максимальна, но на режущем инструменте они практически неработоспособны из-за высокой хрупкости вследствие присутствия двух фаз - Ti_2N и TiN. С увеличением давления азота твердость покрытий снижается, они становятся монофазными (TiN), более устойчивыми к износу при резании и эрозии, уменьшаются размеры и количество капель титана. Было показано, что наиболее устойчивыми к различным видам износа являются покрытия с твердо-

стью 25 ГПа, но диапазон рабочих температур для таких покрытий ограничен 500°C из-за возможного окисления при более высоких температурах [63, 66].

В работе [67] диапазон давлений разделен на две области: $P \leq 6,65 \cdot 10^{-2}$ и $P \geq 6,65 \cdot 10^{-2}$ Па, которые определяют уровень содержания азота в вакуумной камере (рисунок 1.6).

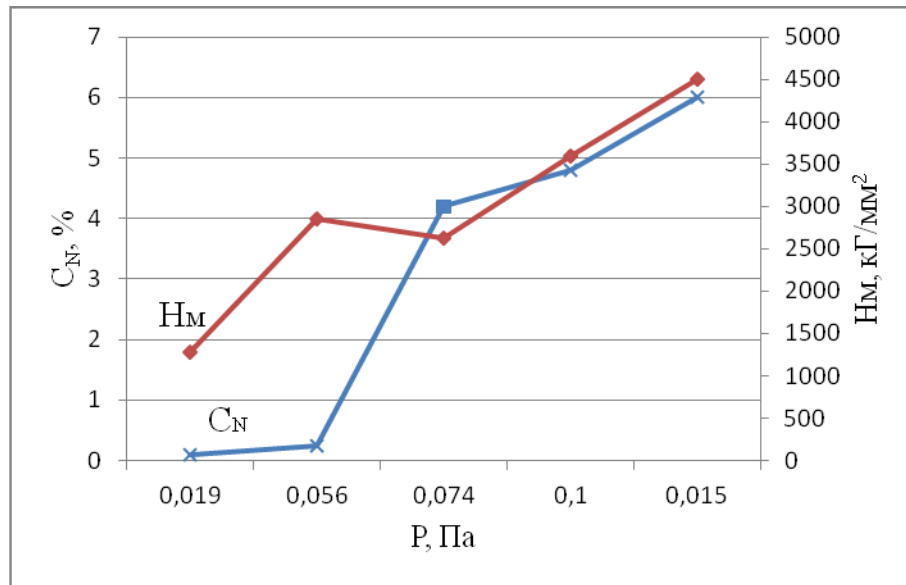


Рисунок 1.6 – Зависимость содержания азота (C_N) и микротвердости покрытий (H_M) от давления азота (P) [67]

В работе утверждается, что характер экспериментальной зависимости содержания азота от давления можно объяснить тем, что при $P \leq 6,65 \cdot 10^{-2}$ Па в зону реакции поступает молекулярный азот, при $P \geq 6,65 \cdot 10^{-2}$ Па – атомарный или частично диссоциированный азот. Изменение зарядового состава потока металлических ионов определяемое взаимодействием с молекулами азота имеет место при давлении $P \geq 6,65 \cdot 10^{-2}$ Па.

Кроме того, как показано в работе [68], микротвердость покрытий зависит от энергии конденсируемых ионов. Микротвердость увеличивается с ростом энергии ионов до 150 эВ, далее достигает насыщения и в дальнейшем не зависит от энергии конденсирующихся ионов.

В работе [69] приведены результаты исследования влияния тока дуги на микротвердость покрытия TiN при парциальных давлениях реакционного газа 0,04 и 0,06 Па соответственно (рисунок 1.7).

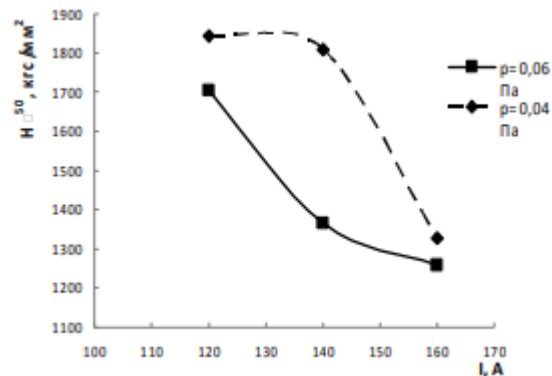


Рисунок 1.7 - Зависимость микротвердости покрытий TiN (H) от тока дуги (I) при различных значениях парциального газа [69]

Из полученных результатов видно, что максимальные значения микротвердости на образцах, полученных при следующих режимах напыления: напряжение смещения 140 В, давление азота в камере 0,04 Па, ток дуги 120 А. По мнению авторов повышение твердости образцов связано с межзеренным механизмом упрочнения. Однако, с увеличением тока дуги и давления газа микротвердость покрытия снижается [70, 71].

Определенную сложность представляет исследование фазового состава покрытий TiN. Это обусловлено широким спектром фаз, которые могут образоваться в покрытии. Кроме того, фазовый состав покрытий зависит не только от технологических параметров процесса ионно-плазменного нанесения, но также от взаимного их влияния. При этом следует отметить, что получаемые результаты рентгеноструктурного анализа индивидуальны для определенных условий осаждения покрытия. Например, в работе [69] установлено, что при определенных режимах нанесения (таблица 1.3) фазовый состав покрытия TiN представляет собой кубическую фазу δ -TiN. Покрытие наносили на детали из инструментальной стали ХВГ на установке ВУ-2МБС.

Таблица 1.3 – Технологические режимы нанесения покрытия TiN

Технологические режимы нанесения	Парциальное давление азота в рабочей камере, Па	
	0,04	0,06
Ток дуги, А / напряжение смещения, В	180/140	180/140
	140/140	140/140
	120/140	120/140

Наличие только одной фазы нитрида титана с ГЦК решеткой наблюдается в покрытии TiN при токе дуги 85 А и давлении азота в вакуумной камере 0,01-0,66 Па [66]. В работе [65] приведены дифрактограммы покрытия, на которых имеются линии нитрида титана TiN с кубической решеткой типа NaCl (рисунок 1.8). При этом установлено, что количество выявляемых линий этой фазы, их интенсивность, ширина и положение существенно определяются такими параметрами осаждения покрытия как потенциал смещения на подложке и давление азота при осаждении.

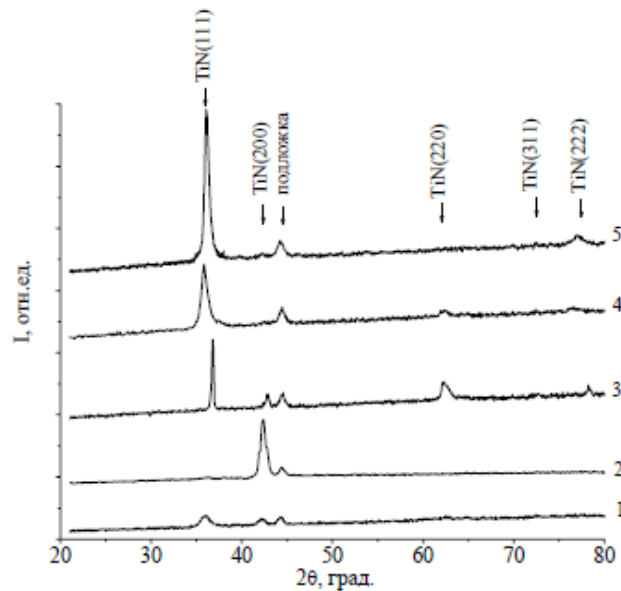


Рисунок 1.8 – Рентгеновские дифрактограммы вакуумно-дуговых покрытий системы Ti-N, полученных при разных параметрах осаждения (излучение Cu-K α) [65]: 1 – P = 3·10⁻⁴ Торр, U = 3-15 В;
2 – P = 8·10⁻⁴ Торр, U = 3-15 В; 3 – P = 5·10⁻³ Торр, U = 3-15 В;
4 – P = 1·10⁻⁴ Торр, U = 75 В; 5 – P = 1·10⁻⁴ Торр, U = 150 В

Таким образом, анализ литературных данных показал, что большинство исследований свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий проводится для определенных условий осаждения. Причем вопрос о взаимосвязи между толщиной, микротвердостью и фазовым составом вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере практически недостаточно изучен. Данный аспект является немаловажным при необходимости получения данного вида покрытий с требуемым комплексом системных и функциональных свойств.

1.4. Системный анализ технологических процессов нанесения покрытий

Как известно, любой технологический процесс является составной частью производственного процесса. В свою очередь производственный процесс выступает как отдельная часть сложной технической системы взаимосвязанных элементов. Производственный процесс можно представить как сочетание основных, вспомогательных и обслуживающих процессов во времени [72]. Важнейший параметр производственного процесса - это выполнение работы от подготовительных операций до заключительных, единый цикл изготовления предмета труда, средств труда и др. Для успешной реализации производственных процессов необходимо выполнение всеобщих, общих и специфических функций.

На рисунке 1.9 представлено взаимодействие и взаимоподчиненность всеобщих (организация разработки управленческих решений, системный анализ проблемы, прогнозирование, оптимизация и экономическое обоснование, нормирование), общих (стратегический маркетинг, планирование, организация процессов, учет и контроль, стимулирование, координация) и специфических функций управления и производственных процессов. Такой подход позволяет представить производственный процесс в виде иерархической подчиненности взаимосвязанных подпроцессов.

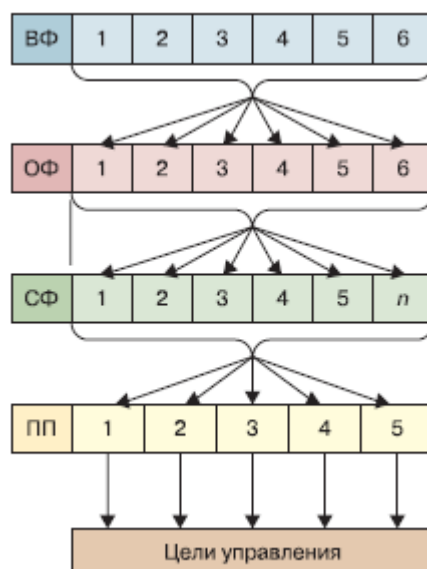


Рисунок 1.9 – Структура всеобщих (ВФ), общих (ОФ) и специфических функций (СФ) управления и производственных процессов (ПП) [72]

Согласно ГОСТ 3.1109–82 [73] технологический процесс является составной частью производственного процесса, который содержит действия по изменению и определению состояния предмета производства, в результате которого изменяются геометрическая форма, размеры и относительное положение деталей, физико-химические свойства материалов, качество поверхности, внешний вид и т.д. [74]. Технологические процессы реализуются с использованием оборудования, оснастки и инструмента. Исходя из этого, технологический процесс представляет собой сложную техническую систему, от характера взаимодействия ее различных частей зависит в итоге свойства производимой продукции.

В работе [75] отмечается, что технологический процесс является реализацией процессов различной физической природы в рамках определенной производственной системы. Из этого следует, что любую производственную технологию можно рассматривать как определенный процесс, воспроизведенный в созданных человеком условиях производства. Авторы предлагают использовать такой подход для классификации технологических процессов, которые используются в производстве с точки зрения их естественной (природной) сущности и свести все многообразие технологических процессов в основные группы, особенностью

каждой из которых будет способ воздействия средств труда на предмет труда в процессе его целенаправленного преобразования в продукт труда. Основываясь на данном подходе, все многообразие процессов можно условно разделить на четыре основные группы: физические, химические, биологические процессы и процессы мышления. Использование такого подхода позволяет провести системный анализ любого технологического процесса, независимо от цели его функционирования.

С этой точки зрения особый интерес представляет системный анализ технологических процессов нанесения покрытий, поскольку каждый из них представляет собой сложное сочетание явлений различной природы, в результате которых и происходит формирование покрытий с заданными функциональными свойствами. В работах [76, 77] предложена схема процесса проектирования технологии получения изделия с покрытием, которая базируется на определенных методологических принципах, позволяющие обеспечивать эксплуатационные характеристики изделия с покрытием (рисунок 1.10). Это позволяет установить взаимосвязь между параметрами технологического процесса нанесения покрытия, техническими показателями детали с покрытием и технико-экономическими показателями процесса. Авторы показывают возможность использования данного подхода на примере плазменных защитных покрытий. Однако, предлагаемые авторами логические связи между отдельными компонентами системы не позволяют учитывать возмущающие и нерегулируемые параметры, которые могут существовать в технологической системе нанесения покрытия, как, например, в процессах нанесения покрытий в вакууме.

Процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия заключается в следующем. Детали устанавливаются в вакуумную камеру, в которой создается вакуум. Между анодом, поджигающим электродом и катодом, выполненным из наносимого материала, подается напряжение. Поджигающий электрод служит для зажигания электрической дуги. Это действие производится кратковременным касанием поджигающего электрода поверхности катода. Возникшая между анодом и катодом дуга устойчиво горит в парах материала катода при напряжении 20- 30 В и силе тока 150-300 А. Испарение материала производится из области ка-

тодных микроплетен вакуумной дуги. Для ионизации и ускорения ионов плазмы на детали подается отрицательный потенциал. В случае высокого отрицательного потенциала (1-1,5 кВ) происходит эффективная ионная очистка поверхностей. После очистки значение потенциала снижается до 100 В, и в этих условиях производится процесс нанесения (конденсации) покрытия. После окончания процесса нанесения покрытия камера с помощью клапана перекрывается от откачного агрегата, развакумируется и производится выгрузка обработанных деталей [2, 78].



Рисунок 1.10 – Схема процесса проектирования технологии получения изделия с покрытием [76, 77]

Возможность на атомарном уровне воздействовать на процесс формирования покрытия позволяет осаждать методом вакуумного ионно-плазменного напыления покрытия широкого спектра функциональных свойств: сверхпроводящие, терморегулирующие, износостойкие, антифрикционные, жаростойкие, декоративные и др. [52, 79-81].

В работе [82] показана взаимосвязь между входными и выходными факторами процесса вакуумного ионно-плазменного нанесения покрытия на разделительные штампы инструментального производства (рисунок 1.11).

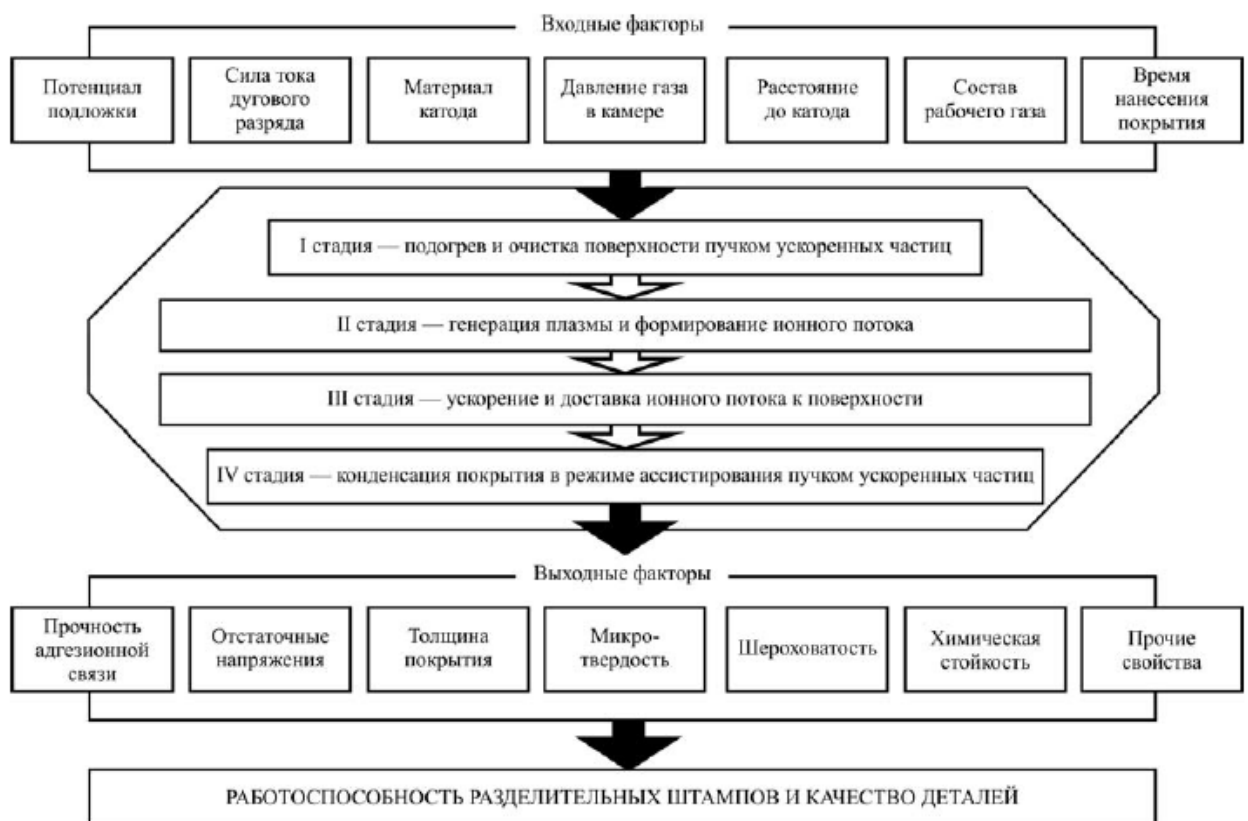


Рисунок 1.11 – Входные и выходные факторы процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия [82]

Отличительной особенностью вакуумных ионно-плазменных покрытий и технологии их нанесения является, с одной стороны, тесная взаимосвязь между свойствами покрытий и их эксплуатационными характеристиками, а с другой - наличие труднорегулируемых параметров технологического процесса. Это в значительной степени затрудняет воспроизводимость технологических режимов дан-

ного процесса при его осуществлении на различных производственных площадках. Кроме того, наличие труднорегулируемых и возмущающих факторов вакуумного ионно-плазменного процесса нанесения покрытия усложняет нормирование свойств покрытий в нормативной и технической документации. Поэтому с практической точки зрения необходимым условием получения вакуумных ионно-плазменных покрытий с требуемым уровнем свойств независимо от вида изделия, на которое они наносятся, является разработка подхода к нормированию свойств покрытий с учетом специфических технологических особенностей процесса их формирования. В этой связи необходимо рассматривать системные связи, так как они являются основой для формирования необходимых свойств покрытий.

1.5. Выводы. Постановка цели и задач исследования

1. В результате проведенного анализа действующих нормативных документов в предметной области покрытий различного назначения установлено, что в нормативной документации регламентируются свойства, обусловленные в основном технологией нанесения: внешний вид, толщина покрытий, прочность сцепления. При этом функциональные свойства покрытия не нормируются. Это в значительной степени ограничивает возможности конструктора назначать вид покрытия, состав, его физико-химические свойства исходя из условий эксплуатации изделия с покрытием.

2. Поскольку показатели качества и свойства объекта стандартизации регламентируются в различных видах нормативной и технической документации, поэтому их контроль и проверка в ходе проведения метрологической экспертизы являются гарантией обеспечения этих свойств. Особую важность приобретают вопросы метрологической экспертизы конструкторской документации на изделия с покрытиями, поскольку при нанесении покрытия всегда происходит приращение размеров исходной детали, что следует учитывать, если данная деталь является сборочной единицей какого-либо узла или механизма. С другой стороны, покрытие должно обеспечить функциональные свойства изделия в заданных усло-

виях эксплуатации. С этой точки зрения существует необходимость определения оптимальной номенклатуры измеряемых параметров и норм точности измерений свойств изделия с покрытием, анализа полноты и четкости формулирования технических требований, что должно быть обеспечено в ходе проведения метрологической экспертизы конструкторской документации.

3. Проведенный анализ показывает, что вакуумные ионно-плазменные покрытия характеризуются комплексом системных и функциональных свойств. Значительное влияние на значения свойств оказывают технологические параметры процесса. Установлено, что несмотря на наличие большого количества проведенных исследований вопрос о взаимосвязи между микротвердостью, толщиной и фазовым составом покрытия TiN, полученного вакуумным ионно-плазменным нанесением, от расположения изделий в вакуумной камере не изучен в достаточной степени.

4. Поскольку покрытие всегда наносится на изделия для обеспечения функциональных свойств поверхности, то при нормировании свойств покрытия следует рассматривать системные связи, возникающие в системе «изделие – покрытие» в ходе осуществления технологического процесса его нанесения. При этом следует учитывать, что технологические процессы нанесения покрытий характеризуются наличием регулируемых, возмущающих и неуправляемых факторов. Это особенно актуально для нанесения покрытий в вакууме, что в значительной степени затрудняет процедуру нормирования свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Целью работы является разработка методических основ для обоснования выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий при нормировании в нормативной и технической документации.

Задачи исследований:

1. Провести метрологическую экспертизу действующей технической документации для определения перечня свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия, необходимых для нормирования с учетом условий эксплуатации изделия с покрытием.

2. Определить взаимосвязь между функциями и свойствами вакуумного ионно-плазменного покрытия с учетом особенностей существующих системных взаимодействий в системе «изделие – покрытие».

3. Разработать алгоритм выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий для регламентации в нормативной и технической документации при условии обеспечения необходимых эксплуатационных свойств изделия с покрытием.

4. Провести апробацию разработанной концепции оценки и выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий при разработке технологической инструкции на детали газотурбинного двигателя.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ СВОЙСТВ ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ TiN В ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

2.1. Особенности регламентации свойств покрытий в действующей конструкторской и технической документации (на примере деталей газотурбинного двигателя)

Согласно РМГ 63-2003 «Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации» [37] метрологическую экспертизу конструкторской документации (чертежа) необходимо проводить по следующим параметрам [83-86]:

1. Проверка рациональности номенклатуры измеряемых параметров. Избыток измеряемых параметров может привести к затратам на измерения и метрологическое обслуживание средств измерений.

2. Проверка оптимальности требований к точности измерений. Необходимо учитывать возможные потери из-за погрешности измерений и затраты на измерения с данной погрешностью.

3. Проверка полноты и правильности требований к точности средств измерений. Необходимо учитывать, что тем точнее средство измерения, тем выше затраты на измерения и метрологическое обслуживание этих средств.

4. Проверка соответствия действительной точности измерений заданным требованиям. Погрешность измерений в исходных нормативных документах сравнивают с заданными требованиями.

5. Проверка контролепригодности конструкции изделия. Проверяют возможность контроля необходимых параметров в процессе производства, испытаний, эксплуатации и ремонта деталей. Проверка размеров, допусков и посадок, они

должны соответствовать требованиям стандартов ГОСТ 25346–89 [87] и ГОСТ 25347–82 [88].

6. Проверка рациональности выбранных средств измерений и методик выполнения измерений.

7. Анализ использования вычислительной техники в измерительных операциях.

8. Проверка терминов, наименований измеряемых величин и обозначений их единиц. Проверяют текстовые записи норм точности, требования к допускам формы и расположения поверхности [89-91].

При проведении метрологической экспертизы конструкторской документации на изделия с покрытиями необходимо определить перечень контролируемых параметров с учетом требований и условий эксплуатации. Также данный перечень параметров зависит от размеров и материала самого изделия, состава сборочного узла, в который входит данное изделие с покрытием, и других факторов. Важно отметить, что процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия связан с изменением размеров и свойств детали. Окончательные размеры детали зависят как от размера детали до нанесения покрытия и так от толщины нанесенного слоя покрытия. Многие свойства деталей с покрытием зависят от первоначальных характеристик детали до нанесения покрытия. Причем, некоторые характеристики после нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия можно спрогнозировать исходя из показателей свойств поверхности, например, ее шероховатости.

В таблице 2.1 представлен перечень деталей газотурбинного двигателя (ГТД), на которые наносится покрытие TiN, и те параметры покрытия, которые регламентированы в действующей в настоящее время в ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО») конструкторской документации. На рисунках 2.1 и 2.2 представлены фрагменты чертежей деталей, на которые наносится покрытие TiN [92-94].

При проведении метрологической экспертизы данных видов конструкторской документации было установлено, что свойства покрытия регламентируются следующим образом:

«Технические требования:

1. Покрытие поверхностей А, Б - нитрид титана по технологии Главного сварщика. Допускается покрытие кругом.
2. Размеры, шероховатость поверхности, отклонение формы и биение поверхностей - после покрытия».

Материал детали «Цапфа КВД» изготавливается из титанового сплава ВТ8. Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN наносится на шлицы. Параметры шлицев приведены в таблице 2.2.

В таблице 2.3 представлен перечень замечаний, которые были сформулированы в результате проведения метрологической экспертизы чертежа детали «Цапфа КВД» (рисунок 2.2).

Таблица 2.1 – Технические требования к деталям газотурбинного двигателя в конструкторской документации

Название детали	Материал	Толщина покрытия, мкм	Шероховатость Ra, мкм	Группа контроля
Лопатка рабочая	Сплав ЖС6К-ВИ	2...5	0,8	2а по ОСТ1 00021-78
Переходник генератора	ВТ 5	2...5	1,25	5 по ОСТ1 00021-78
Стакан 1	ВТ 5	2...5	6,3	4 по ОСТ1 00021-78
Стакан 2	ВТ 5	2...5	6,3	4 по ОСТ1 00021-78
Стакан 3	ВТ 5	2...5	6,3	4 по ОСТ1 00021-78
Стакан 4	ВТ 5	2...5	6,3	4 по ОСТ1 00021-78
Цапфа	ВТ 8-1	2...4	1,6	-
Лопатка рабочая ТВД	-	1...5	1,6	29.14ТУ11

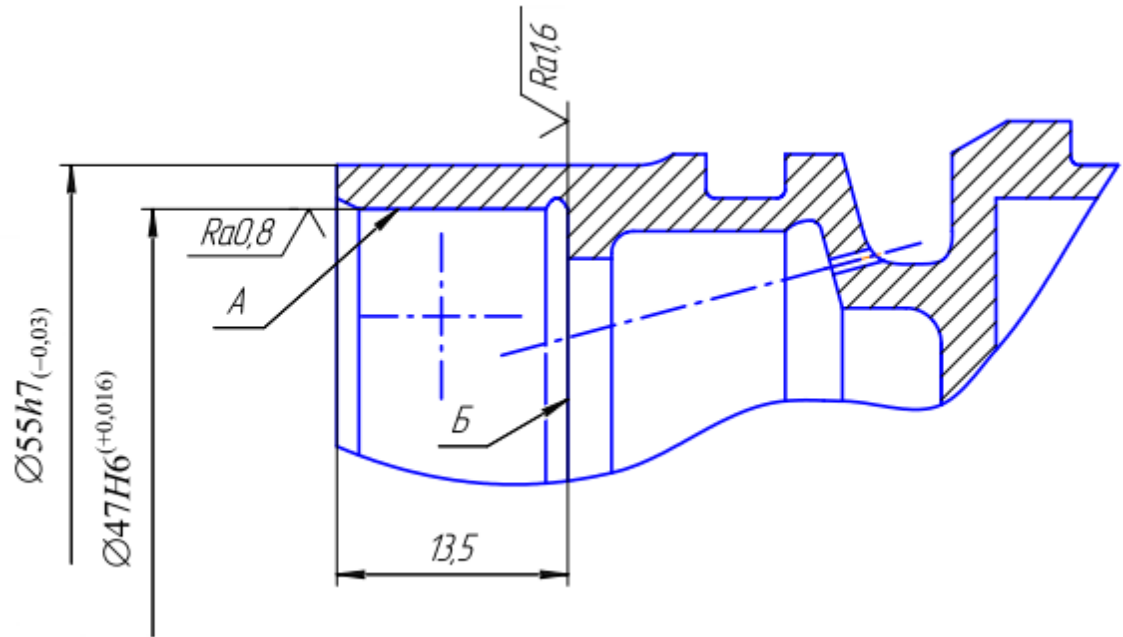


Рисунок 2.1 – Деталь «Стакан» (фрагмент)

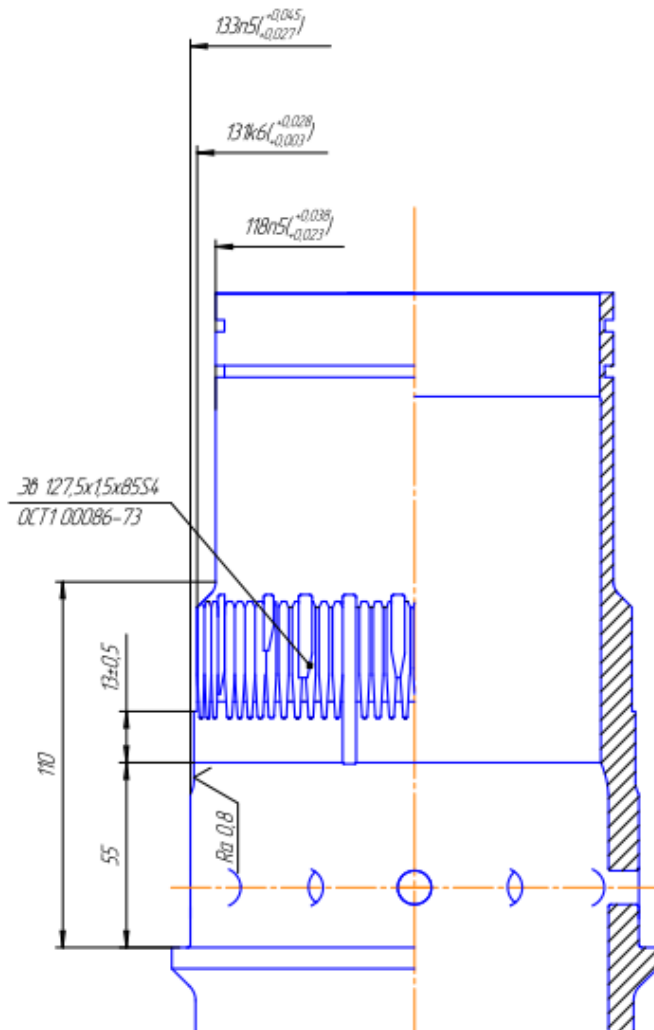


Рисунок 2.2 – Деталь «Цапфа КВД» (фрагмент)

Таблица 2.2 – Параметры шлицев детали «Цапфа КВД» (в мм)

Модуль	m	1,5
Число зубьев	z	84
Угол давления на делительной окружности	α_0	30°
Номинальная толщина зуба	s	$2,35_{-0,12}^{-0,06}$
Допуск на направление зуба	ΔB_0	0,02
Допуск биения по профилям шлиц. База – общая ось поверхностей П1 и У	E_0	0,08
Диаметр делительной окружности	d	126

К техническим требованиям (ТТ) чертежа детали «Цапфа КВД» относятся 25 наименований. Из существующих ТТ только в требовании №13 «Шлицы упрочнить покрытием TiN толщиной 2-4 мкм» упоминается покрытие. Причем задаются требования только по толщине покрытия. При этом, как регулируется в ТТ, покрытие наносится только на шлицы, не допускается осаждение покрытия на другие поверхности детали.

Таким образом, анализ конструкторской документации показал, что на практике технические требования к параметрам покрытия сводятся только к указанию его толщины и шероховатости.

В целом у детали «Цапфа КВД» регламентируется твердость « $d_{отп.} = 3,7 - 3,2$ мм группа контроля 1». Согласно [95] данное значение соответствует НВ 269...363 МПа. При этом не регламентирована микротвердость поверхности.

Поскольку покрытие TiN наносится для повышения износостойкости шлицев цапфы КВД, поэтому только нормирование твердости является недостаточным контролируемым фактором для обеспечения эксплуатационных свойств данного изделия. С этой точки зрения обязательным условием является необходимость регламентации в конструкторской документации микротвердости шлицев после нанесения покрытия TiN.

Таблица 2.3 – Замечания, сформулированные при проведении метрологической экспертизы чертежа детали «Цапфа КВД»

№ п/п	Замечания по результатам проведения метрологической экспертизы чертежа детали «Цапфа КВД»
1.	Неправильно указан ОСТ 1 00086-73[94]
2.	Контроль размера $\varnothing 10,5$ Н7 с R0,03 требует разработку сложного и дорогого средства измерений
3.	В технических требованиях требование №2 «Норма расхода материала не более кг»: отсутствует численное значение
4.	Единицы физических величин указаны и в мм, и в мкм, что не соответствует требованиям ГОСТ 8.417-2002 [42]
5.	Используется сокращение слова «поверхность»: в одном месте «поверхн.», а в другом без сокращения
6.	В технических требованиях допущены орфографические ошибки, например, утсупы
7.	В таблице 1 указано: «Допуск биения по профилям шлиц 0,08. База – общая ось поверхн. П1 и У». На чертеже отсутствует поверхность У
8.	Сложность контроля габаритных размеров. Необходимо перенести базу М на торцевую поверхность
9.	Не указана шероховатость поверхности до нанесения покрытия TiN на шлицы

В результате проведения метрологической экспертизы чертежа детали «Цапфа КВД» также было установлено, что шероховатость покрытия после нанесения TiN должна составлять Ra 1,6. При этом не указываются значения шероховатости поверхности до нанесения покрытия. Анализ проведенных исследований показывает, что шероховатость покрытий зависит от шероховатости поверхности до нанесения покрытий [57]. Поэтому для получения покрытия с необходимой шероховатостью, которая обеспечивала бы монтаж детали с покрытием как сборочной единицы в узел, чистота поверхности должна быть не грубее Ra 0,8. На нерабочих

поверхностях (без покрытия) чистота обработки не имеет существенного значения, однако наличие окалины, ржавчины, пор и трещин не допускается. С этой точки зрения до реализации технологического процесса нанесения покрытия необходимо контролировать данный показатель, и в обязательном порядке включить его в технические требования чертежа детали.

Таким образом, в результате проведения метрологической экспертизы действующей в настоящее время в ПАО «ОДК-УМПО» конструкторской документации было установлено, что при включении свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия в конструкторскую документацию учитывается только имеющийся опыт регламентации требований согласно сложившейся практике. При этом не учитываются существующие функциональные взаимодействия в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие», а также особенности формирования свойств покрытия при реализации технологического процесса его нанесения.

2.2. Проявление функциональных взаимодействий в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»

Как известно, техническая система – это подмножество технических систем, которые выполняют какие-либо действия для определенного преобразования [96]. Любая техническая система существует для выполнения основной или главной полезной функции, ради которой она существует, и ряда вспомогательных или сопутствующих [97, 98]. Для функционирования технической системы необходимо обеспечить взаимосвязь между ее отдельными элементами, т.е. связи между элементами технической системы являются обязательным условием ее существования для выполнения необходимых потребительских функций [99]. Указанный подход широко используется для анализа существующих технических систем, совершенствования их функционирования и прогнозирования дальнейшего развития [100, 101]. Системный анализ позволяет установить системные связи в сложных технических системах, что в значительной степени упрощает построение матема-

тических моделей, адекватно описывающих взаимодействие ее отдельных структурных элементов [102, 103].

Рассмотрим особенности проявления системных связей в системе «изделие – покрытие». По своей сущности любое покрытие не может существовать отдельно от подложки (изделия), на которое оно наносится. Целью нанесения покрытия является изменение свойств поверхности изделия, на которое оно наносится. При этом свойства покрытия зависят не только от его материала, но также от вида и свойств материала изделия. С этой точки зрения свойства изделия с покрытием, обеспечивающие выполнение потребительских функций, зависят от материала и свойств подложки (изделия), свойств материала покрытия, а также в значительной степени будут определяться технологическими режимами процесса нанесения покрытия (рисунок 2.3). Поэтому наличие большого количества факторов, влияющих на свойства покрытия, в значительной степени усложняет задачу нормирования свойств покрытий, что требует использования принципиально новых подходов при разработке требований к свойствам покрытий, которые регламентируются в нормативной и технической документации.

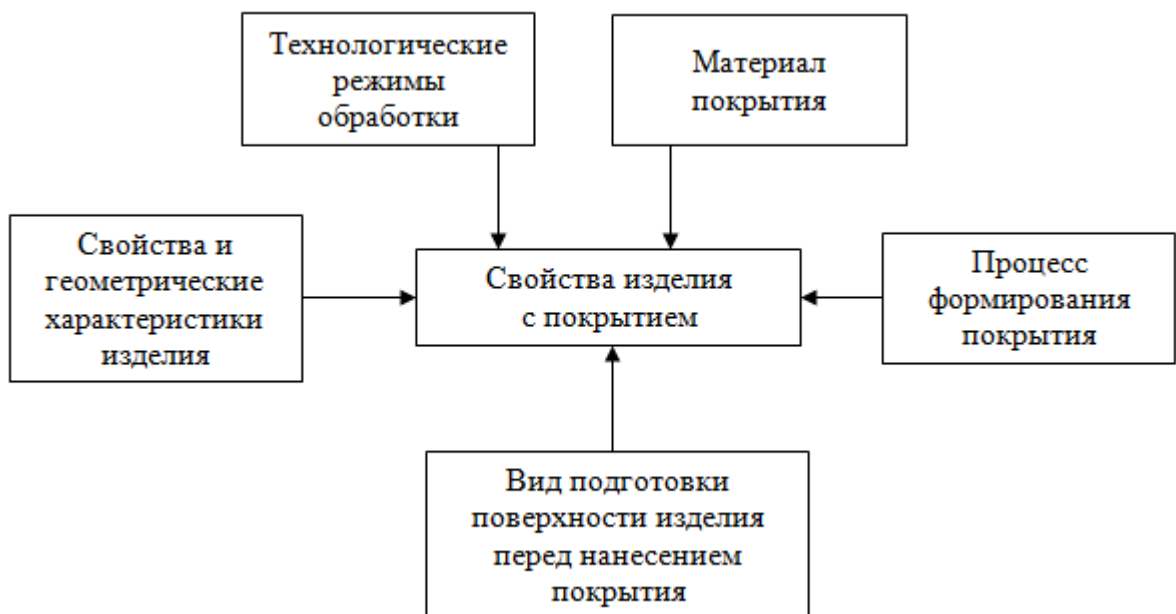


Рисунок 2.3 – Факторы, определяющие свойства изделия с покрытием

Прием по установлению функциональных связей в технических и технологических системах используется для решения различных задач. Для определения функциональных взаимодействий применяют такие методы как функционально-стоимостной анализ (ФСА), анализ видов и последствий отказов (FMEA-анализ), функционально-физический анализ (ФФА), функционально-целевой анализ (ФЦА), технология развертывания функций качества (QFD-анализ) [104] и др.

Сущность функционально-стоимостного анализа (ФСА) заключается в оценке стоимости, трудоемкости и производительности, которые являются показателями, характеризующими эффективность деятельности предприятия [105-107]. Достоинствами ФСА являются: комплексный анализ подсистем системы, взаимосвязей между ними, неэффективных функций в подсистемах, привлечение компетентных специалистов [108]. В работе [109] отмечается, что ФСА применяют для оптимизации конструкции машин и оборудования, технологий, организационных структур предприятий, методов организации производства. Результатом проведения ФСА является снижение затрат, которое достигается путем повышения качества продукции, сокращение затрат при повышении потребительских свойств изделия либо сохранении уровня качества и т.д.

Анализ видов и последствий отказов (FMEA-анализ) обеспечивает обоснование, проверку достаточности и оценку эффективности решений, которые направлены на совершенствование конструкции и достижение требуемых характеристик надежности [110]. FMEA-анализ позволяет выявить причины возникновения всевозможных дефектов на различных уровнях: организации, системы менеджмента качества, конструкции продукции (изделие, сборочная единица, деталь), технологического процесса производства продукции [111].

Функционально-физический анализ (ФФА) – это технология разработки и анализа технических систем, позволяющая проектировать изделия на основе поиска эффективных принципов действия [112]. ФФА позволяет создавать новые образцы техники и технологий для повышения конкурентоспособности продукции.

Однако сложность строения системы «изделие – покрытие», взаимообусловленность и зависимость конечных свойств изделия с покрытием от свойств составляющих элементов данной технической системы являются основой для поиска и использования такого метода функционального анализа, который, с одной стороны, позволял бы учитывать строение системы «изделие – покрытие», а с другой – определять ее свойства, необходимые для нормирования в нормативной и технической документации.

Поскольку существующие методы функционального анализа не учитывают особенности функциональных взаимосвязей между отдельными элементами технических объектов, в данном исследовании для установления взаимосвязи между свойствами и функциями в технической системе «изделие – покрытие» предлагается использовать ФЦА [113-115]. Особенностью данного метода функционального анализа является рассмотрение объекта исследования с момента приобретения необходимых потребительских функций в течение потребительской фазы [116, 117]. ФЦА позволяет выявить связь потребительских функций и свойств изделия и определить пути практического повышения качества. Такой подход позволяет разрабатывать новые технические решения по совершенствованию изделия для обеспечения выполнения им потребительских функций и определять их согласованность с другими функциями изделия [118]. Этот метод анализа успешно апробирован для различных видов металлоизделий [119-121].

Поскольку изделие с покрытием представляет собой систему, состоящую из двух элементов - изделие и покрытие, то проведение ФЦА данной системы должно заключаться в установлении взаимосвязи между свойствами и функциями как изделия с покрытием, так и каждого отдельного элемента данной системы. Кроме того, при проведении ФЦА данной системы необходимо учитывать тот факт, что свойства покрытий в значительной степени зависят от технологических режимов его нанесения. С этой точки зрения проведение ФЦА для системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» можно представить в виде следующей последовательности выполнения действий (подсистем) (рисунок 2.4) [122, 123]:

- определение структурно-функциональных связей технологического процесса нанесения и этапов формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия;
- функционально-целевой анализ элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»;
- функционально-целевой анализ системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие».



Рисунок 2.4 – Обобщенная схема установления системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»

Тогда для каждой подсистемы можно провести ФЦА, это позволит определить функции каждой подсистемы, установить связи между ними, что в конечном итоге позволит выбрать и научно обосновать свойства вакуумного ионно-

плазменного покрытия, которые необходимо нормировать в нормативной и технической документации.

Следует отметить, что при использовании ФЦА необходимо учитывать условия эксплуатации того изделия, на которое наносится вакуумное ионно-плазменное покрытие [124]. Это будет являться основным фактором для определения функций самого изделия и свойств покрытия, необходимых для обеспечения выполнения этих функций [125, 126]. Использование ФЦА позволяет определить взаимосвязь системных и функциональных свойств не только покрытия, но и изделия с покрытием, что может быть использовано в качестве методической основы для выбора свойств покрытия для регламентации в нормативной и технической документации.

Кроме того, при использовании ФЦА необходимо учитывать условия эксплуатации того изделия, на которое наносится вакуумное ионно-плазменное покрытие [124]. Это будет являться основным фактором для определения функций самого изделия и свойств покрытия, необходимых для обеспечения выполнения этих функций [125, 126]. Использование ФЦА позволяет определить взаимосвязь системных и функциональных свойств не только покрытия, но и изделия с покрытием, что может быть использовано в качестве методической основы для выбора свойств покрытия для регламентации в нормативной и технической документации.

Однако ФЦА не позволяет оценить значимость свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия, в этой связи предлагается использовать QFD-анализ, который представляет собой методологию систематического и структурированного преобразования пожеланий потребителей в технические требования к качеству продукции. Данный метод позволяет оценить степень важности показателей качества изделия для потребителя путем представления потребностей в виде определенных технических характеристик, идентифицировать элементыследуемого объекта, которые должны быть изменены или добавлены для максимального удовлетворения потребностей.

2.3. Построение структурно-функциональной модели технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN

Для выявления взаимосвязи проведения процедуры метрологической экспертизы с основными и вспомогательными операциями технологического процесса целесообразно использовать метод структурно-функционального моделирования IDEF0. Метод IDEF0 позволяет провести деструктуризацию объекта исследования с целью создания логической модели, которая отражает структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов [127, 128]. Иными словами методология функционального моделирования IDEF0 является технологией описания системы в целом как множества взаимозависимых действий или функций [127]. IDEF0 используется не только для визуального представления процесса, но и является основой для его совершенствования. В этой связи данная методология используется на ранних этапах разработки проекта.

Методология IDEF0 базируется на принципе декомпозиции, т.е. происходит разбиение сложного процесса на составляющие. В процессе декомпозиции функциональный блок разбивается на дочерние диаграммы. Дочерние диаграммы содержат дочерние блоки, обеспечивающие дополнительную детализацию родительского блока [127, 128]. В целях описания иерархических зависимостей функций используется диаграмма дерева узлов (Node Tree Diagram) [127]. Для построения моделей используется программный продукт AllFusionPrcessModeler 7.

Рассмотрим применение IDEF0 для технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN. В данном случае нормативная и технологическая документации являются управляющими элементами для технологического процесса и всех входящих в него фаз, а оборудование, оператор или контролер – компонентами технологического процесса, с помощью которых осуществляется технологический процесс. Входными и выходными элементами является изделие на соответствующей стадии обработки [129-131].

Построение структурно-функциональной модели начинается с контекстной диаграммы верхнего уровня (рисунок 2.5). В рамках данного диссертационного исследования функциональным блоком является непосредственно реализация технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия.



Рисунок 2.5 – Контекстная диаграмма верхнего уровня А-0

Следующим этапом проведения деструктуризации методом IDEF0 является построение дочерних диаграмм. Первый уровень декомпозиции приведен на рисунке 2.6. Это позволяет определить место контрольных операций в последовательности технологических операций нанесения покрытия TiN вакуумным ионно-плазменным методом.

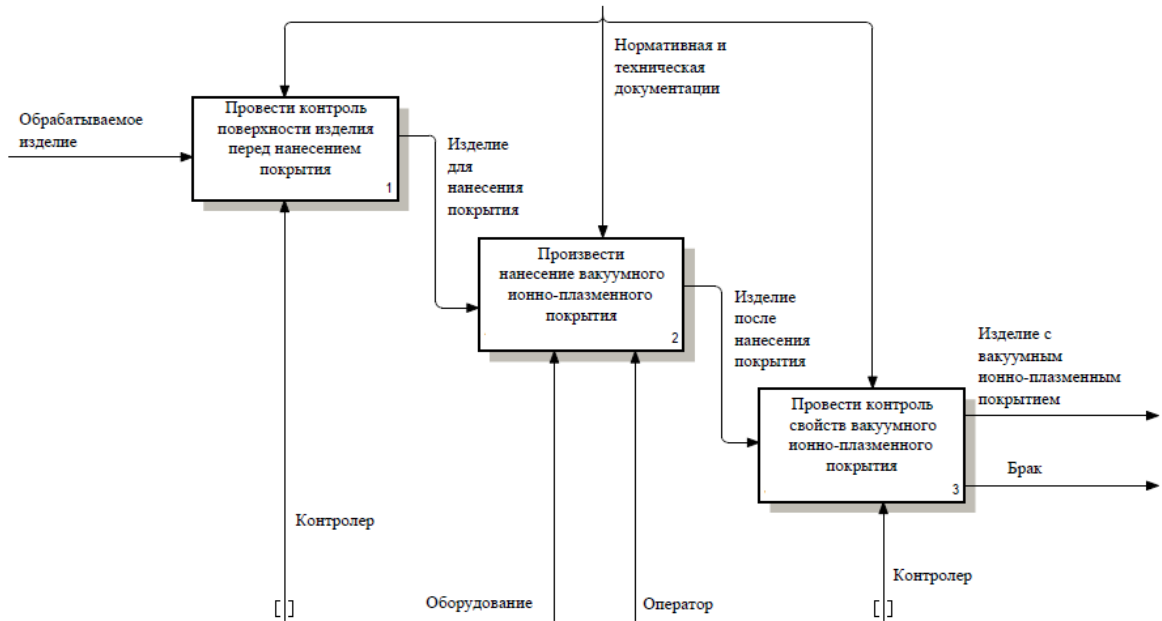


Рисунок 2.6 – Дочерняя диаграмма блока А-0

На дочерней диаграмме блока А-1 (рисунок 2.7) конкретизируются и обозначаются виды контрольных действий при нанесении покрытия.

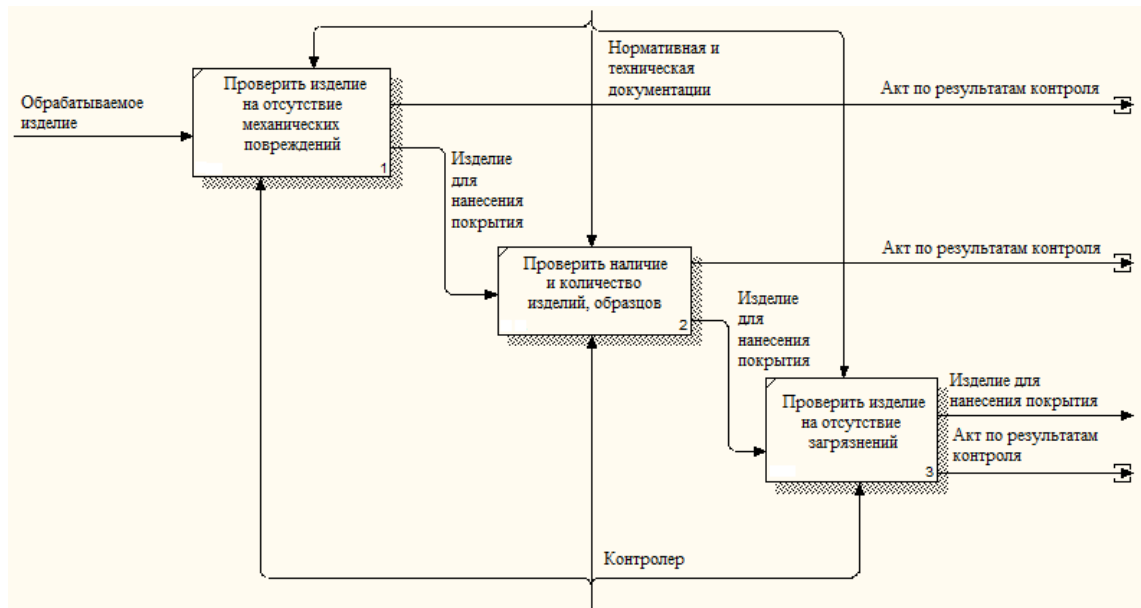


Рисунок 2.7 – Дочерняя диаграмма блока А-1

При этом следует отметить, что если на первых этапах декомпозиции нормативная и техническая документация обозначались лишь как обязательные документы в целом, то в блоке А-1 указываются соответствующие акты, как обязательный вид документа, регистрирующий отсутствие/наличие каких-либо откло-

нений. Так, перед нанесением покрытия необходимо проверить соблюдение следующих параметров: визуально на отсутствие механических повреждений (забоины, вмятины, трещины, грубые риски и другие); наличие и количество образцов; отсутствие загрязнений, краски, масла, следов подтеков, засорения отверстий и внутренних полостей. Для обеспечения свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия необходимо проконтролировать параметры поверхностного слоя.

При выполнении данных условий изделия передают на следующий этап – нанесение вакуумного ионно-плазменного покрытия, как это показано на дочерней диаграмме блока А-2 (рисунок 2.8).

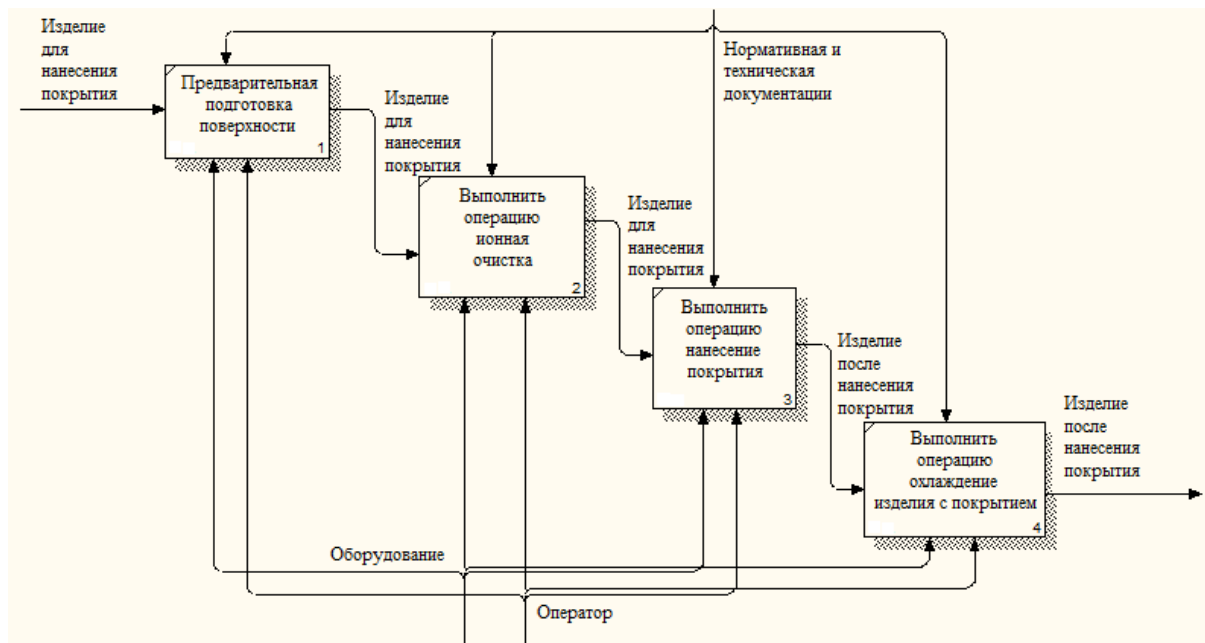


Рисунок 2.8 – Дочерняя диаграмма блока А-2

Поскольку при проведении комплекса теоретических исследований необходимо установить особенности функциональных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие», что позволит определить те свойства покрытия, которые обеспечивают выполнение полезных функций деталью с данным покрытием, то в дочерней диаграмме блока А-3 показаны соответствующие измеряемые параметры, которые следует регламентировать в нормативной и технической документации и контролировать на различных этапах технологического процесса нанесения покрытия (рисунок 2.9).

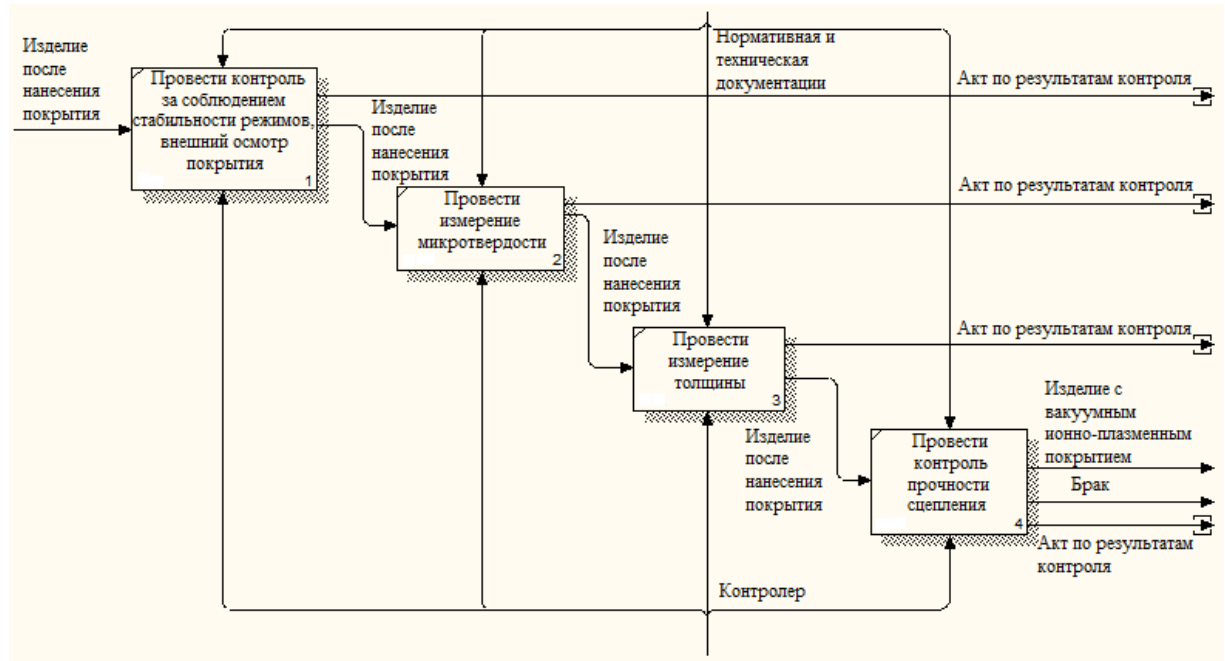


Рисунок 2.9 – Дочерняя диаграмма блока А-3

Таким образом, контроль свойств покрытия TiN будет заключаться в следующем: контроль за соблюдением стабильности режимов, внешний осмотр покрытия; измерение микротвердости; измерение толщины; контроль прочности сцепления. Контроль за соблюдением стабильности режимов проверяют по приборам в процессе нанесения. Внешнему осмотру лупой с увеличением до 7^x подвергается 100% площади покрытия на отсутствие сколов, трещин, шелушения и отслаивания. Микротвердость покрытия измеряют на образцах-свидетелях. Измерение толщины покрытия проводят на образцах-свидетелях аттестованным измерительным инструментом. Прочность сцепления контролируется на образцах-свидетелях из материала идентичного основе с размерами $(0,8-1,2) \times 10 \times 100$ мм путем изгиба образца под углом $90 \pm 5^\circ$ на оправке диаметром не более 11 мм [132].

Таким образом, использование методологии функционального моделирования IDEF0 позволяет не только провести декомпозицию технологического процесса нанесения покрытия TiN вакуумным ионно-плазменным методом, но также определить, на каких этапах следует проводить контроль свойств получаемого покрытия в соответствии и с требованиями нормативной и технической документации. Кроме того, основываясь на результатах функционально-целевого анализа,

представляется возможным выявить системные связи в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие», и, как результат, определить те свойства покрытия, которые следует регламентировать в нормативной, технической и конструкторской документации.

2.4. Выводы по главе 2

1. В результате проведения метрологической экспертизы действующей конструкторской документации на детали газотурбинного двигателя было установлено, что параметры вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN регламентируются не в полном объеме. В данной документации отсутствуют параметры покрытия, численные значения которых зависят от соответствующих свойств поверхности изделия. Для обеспечения эксплуатационных свойств деталей газотурбинного двигателя в конструкторской документации необходимо указывать следующие свойства покрытия: толщина, шероховатость поверхности до нанесения покрытия, шероховатость покрытия после нанесения и микротвердость.

2. Показано, что при нормировании свойств покрытий в нормативной, технической и конструкторской документации необходимо учитывать особенности функциональных взаимосвязей между отдельными элементами в системе «изделие – покрытие». Использование функционально-целевого анализа позволяет установить взаимосвязь между свойствами и функциями как изделия с покрытием, так и каждого отдельного элемента данной системы с учетом технологических особенностей нанесения покрытия и этапов его формирования.

3. С использованием метода функционального моделирования IDEF0 проведена декомпозиция отдельных структурных элементов в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»: изделие, покрытие и технологический процесс его нанесения. Это позволило определить взаимосвязь процедуры нормирования свойств покрытия на различных стадиях технологического процесса его нанесения.

**ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ
«ИЗДЕЛИЕ - ВАКУУМНОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ»
ДЛЯ ВЫБОРА НОРМИРУЕМЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЯ**

3.1. Определение структурно-функциональных связей при осуществлении технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия

Технологический процесс нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий представляет собой ряд последовательно выполняемых операций, к которым относятся подготовительные, основные, вспомогательные и обслуживающие операции. Подготовительной операцией является промывка изделия в различных растворителях с последующей сушкой. К основным операциям технологического процесса относятся предварительная подготовка поверхности изделия перед нанесением покрытия, ионная очистка, предварительный нагрев поверхности изделия потоком ионов катода, создание потока напыляемых частиц, взаимодействие плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия, осаждение ионов на поверхности изделия и охлаждение изделия. В качестве вспомогательных операций технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия используются контроль параметров поверхности изделия перед нанесением покрытия и свойств покрытия после реализации технологического процесса. Техническое обслуживание оборудования, на котором непосредственно осуществляется процесс осаждения вакуумного ионно-плазменного покрытия, является обслуживающей операцией технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия.

Осуществление технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия априори предполагает наличие изделия, технологического оборудования и оператора. При этом каждая из данных составляющих имеет свойственные именно ей характеристики. Результатом хода технологического

процесса является получение покрытия на поверхности детали [133, 134]. Условно взаимосвязь составляющих технологического процесса можно представить в виде сетевого графа, позволяющего проанализировать взаимосвязи в технической системе «технологический процесс нанесения ионно-плазменного покрытия» (рисунок 3.1).

Поскольку формирование вакуумного ионно-плазменного покрытия представляет собой ряд последовательно протекающих процессов, рассмотрим функциональные связи в системе «технологический процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия» (рисунок 3.2). На рисунке 3.2 последовательность реализации технологического процесса обозначена «пунктирными» стрелками.

К входным параметрам системы «технологический процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия» относятся: технологические режимы нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, параметры катода и исходные показатели поверхности изделия. От указанных параметров зависит реализация технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия. Технологические режимы нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия рассчитываются с учетом особенностей каждого изделия. Катод выбирается исходя из требований материала покрытия или необходимого состава. Свойства получаемого покрытия зависят от исходных показателей поверхности изделия. Выходными параметрами технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия являются свойства вакуумного ионно-плазменного покрытия: толщина, адгезия, микротвердость, шероховатость, пористость [134, 135].

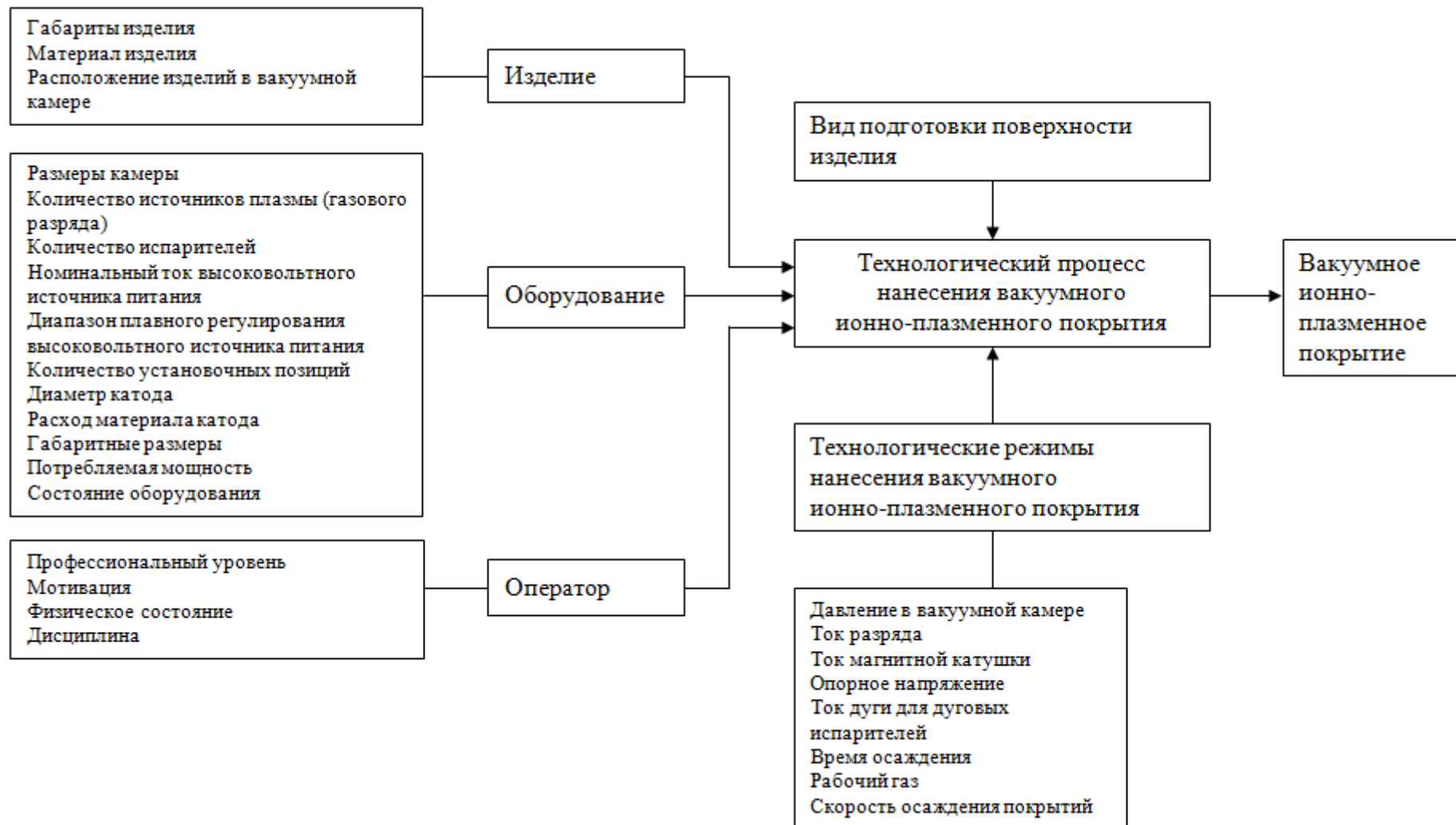


Рисунок 3.1 – Сетевая взаимосвязь между составляющими технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия

Входные параметры



Рисунок 3.2 – Структурная схема системы «технологический процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия»

3.2. Формирование элемента «вакуумное ионно-плазменное покрытие» в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»

Процесс формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия представляет собой совокупность последовательно протекающих стадий [57, 59]: создание потока напыляемых частиц, взаимодействие плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия и осаждение ионов на поверхности изделия. Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований определил следующие закономерности протекания каждой из этих стадий [52, 59, 66, 69, 70, 76, 79, 82, 136, 137]. Создание потока напыляемых частиц происходит при генерации вакуумной дуги на торцевой поверхности катода при остаточном давлении азота в камере. Получаемый при этом поток может состоять из ионов, электронов, нейтральных атомов и микрокапель [2, 54]. Плазменная струя, выйдя со среза сопла генератора в свободномолекулярном режиме, проходит вакуумную камеру и направляется на поверхность изделия, которая находится под отрицательным потенциалом. Ионы плазмы, попадая в дебаевский слой около поверхности изделия, ускоряются и нейтрализуются. Иными словами, происходит взаимодействие плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия, что обеспечивает поверхностную миграцию атомов и ионов титана, а также ионное перемешивание адсорбированных частиц. Нейтральные атомы плазменного потока попадают на поверхность без изменения своей кинетической энергии [137, 138]. Анализ различных факторов взаимодействия частиц с поверхностью показал, что результат такого взаимодействия определяется энергетическим и зарядовым состоянием частицы, ее химической природой, плотностью и углом падения потока частиц, а также химическим составом основы, ее кристаллической структурой, формой поверхностных граней, составом и структурой адсорбированного слоя, шероховатостью поверхности, ее температурой, потенциалом и возможностью протекания на ней химической реакции [1, 136, 139]. В ходе заключительной стадии, т.е. при непосредственном осаждении ионов на поверхность изделия, на поверхность конденсации падает поток частиц распыляемого материала, которые, вступая в плазмохимические реакции, образу-

ют покрытие. Таким образом, для получения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN материалом катода является титан. В ходе процесса происходит конденсация на подложку (изделие) испаряемого материала (титана), взаимодействующего с атомами реакционного газа (азота). В результате формируется покрытие нитрида титана [53, 56, 59, 62].

Каждая из указанных стадий характеризуется рядом параметров, которые оказывают влияние на формирование свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий: толщина, адгезия, микротвердость, шероховатость, пористость. Иными словами, это те свойства покрытия, которые определяются особенностями процесса нанесения покрытия. К таким параметрам относятся плотность атомарного потока веществ, давление и состав остаточных газов в камере, температура нагрева обрабатываемого изделия перед и во время напыления и др. [78].

Анализ литературных данных показал [58, 80], что от характера осаждения ионов на поверхности изделия, т.е. фактически от расположения детали в вакуумной камере, зависит равномерность распределения толщины покрытия, а, следовательно, все выходные свойства покрытия. С другой стороны, адгезия покрытия с основой зависит от протекания всех рассматриваемых стадий [81, 137], в то время как микротвердость получаемого покрытия зависит от создания потока напыляемых частиц и осаждения ионов на поверхности изделия, а шероховатость покрытия в основном формируется на стадии взаимодействия плазмы и рабочего газа с поверхностью изделия и осаждения ионов на поверхности изделия [57, 62].

Анализ особенностей процесса формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия позволил определить влияние процессов, происходящих на различных этапах, и его свойствами (рисунок 3.3). Иными словами проведенный анализ является необходимым этапом при применении функционально-целевого анализа системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие», позволяющий установить те управляемые параметры на стадии формирования покрытия, которые играют определяющую роль в получении заданного уровня его свойств, которые определяются технологическим процессом.

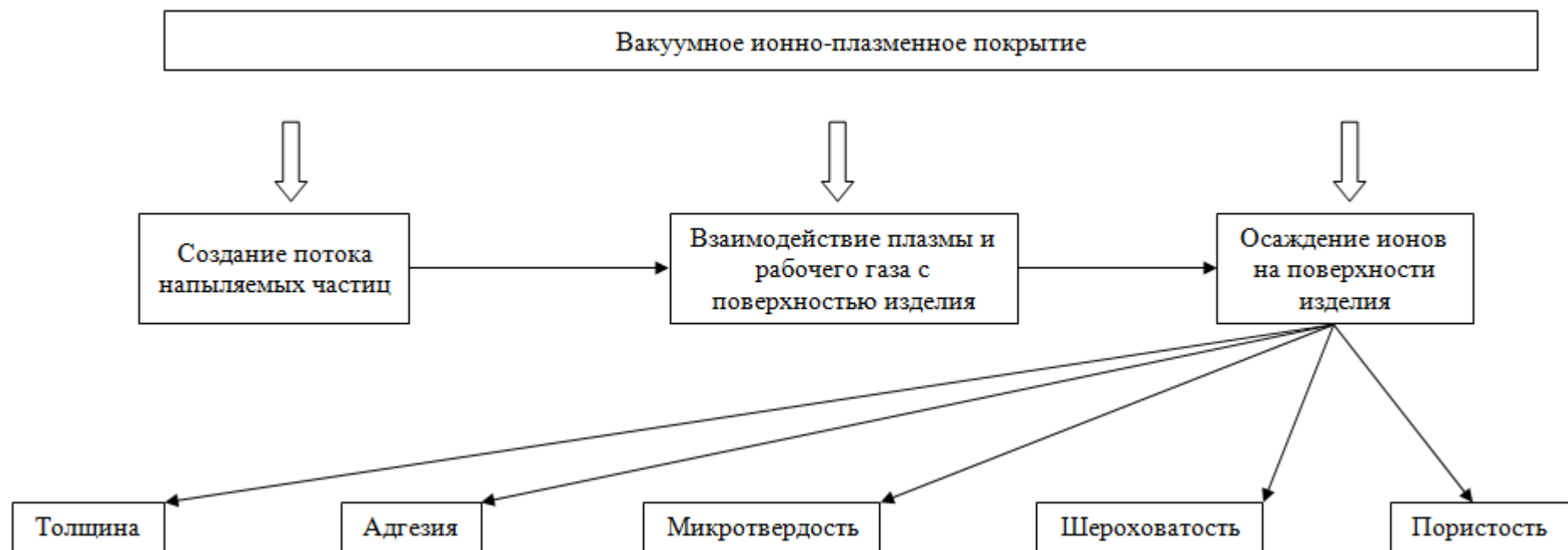


Рисунок 3.3 – Взаимосвязь этапов формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия системы «вакуумное ионно-плазменное покрытие» с его свойствами, определяемые технологическим процессом

3.3. Определение функциональных взаимодействий в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»

Нанесение вакуумных ионно-плазменных покрытий является одним из эффективных путей улучшения эксплуатационных свойств ряда деталей газотурбинного двигателя. Однако, для нормирования показателей данных покрытий в нормативной и технической документации необходимо определить те из них, от которых в первую очередь будет зависеть выполнение необходимых функций изделия с покрытием. С этой точки зрения рассмотрим применение ФЦА для системы «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» на примере деталей газотурбинного двигателя (ГТД).

В настоящее время производство ГТД развивается в направлении повышения их мощности и экономичности путем увеличения рабочих температур, эффективности аэродинамики турбин и компрессоров и использования более легких материалов. Современные авиационные двигатели должны отвечать требованиям по эксплуатационным свойствам, надежности, массе, экономичности и ресурсу. При производстве ГТД основной задачей является уменьшение стоимости производства и эксплуатации, в том числе посредством упрощения конструкции и снижения количества деталей и узлов, что требует использования новых материалов и разработки новых технологий их обработки. Материалы, применяемые для изготовления деталей ГТД, должны иметь высокую удельную прочность, сопротивление коррозии, стабильность и воспроизводимость механических свойств и т.д. С другой стороны, прочностные и точностные характеристики деталей, как сборочных единиц ГТД, зависят от их конструктивного исполнения. При этом следует стремиться к упрощению конструкции детали как по технологическим и эксплуатационным, так и по экономическим соображениям [2].

Условия эксплуатации деталей ГТД зависят от следующих видов внешних воздействий [57, 78, 140]:

- механические воздействия при столкновении газового потока с поверхностью лопатки. Содержание в атмосферном воздухе твердых частиц (пыль, песок)

вызывает статическую и динамическую деформацию лопаток от рабочих нагрузок, в результате чего происходит повреждение торца пера лопатки при касании о статор. В осевых компрессорах ГТД для уменьшения перетекания сжимаемого газа через кромки лопаток минимизируют радиальные зазоры между статором и ротором. При этом допускается динамическое касание (чиркание) торцев лопаток (неподвижных направляющих о поверхность вращающегося ротора, а вращающихся рабочих лопаток о поверхность неподвижного статора) о препятствие. В таких условиях формируются такие дефекты как царапины, трещины, выбоины, которые в условиях высоких температур и динамических нагрузок являются значительными концентраторами напряжений. Описанные явления приводят к снижению усталостной прочности лопаток ГТД;

- тепловое воздействие. Рабочая температура лопаток составляет 450-600°C, а при касании лопатки о статор температура в контакте может достигать 800°C;

- химическое воздействие при взаимодействии с кислородом, водяным паром и другими химически активными веществами, содержащимися в атмосфере. Факторы, которые ограничивают ресурс деталей ГТД при эксплуатации в тропических, пустынных и морских условиях, - это эрозионный (пылевой) износ, солевая коррозия и окисление поверхности деталей [141]. Анализ повреждений деталей ГТД после эксплуатации в условиях морской коррозии показал, что причинами возникновения дефектов является солевая коррозия, которая, в свою очередь развивается в процессе воздействия влаги, содержащей NaCl [142]. При длительной эксплуатации в воздушной среде (особенно с повышенным содержанием влаги, вредных примесей и запылённости) детали ГТД подвержены питтинговой коррозии и эрозионному износу.

Исходя из анализа характера внешнего воздействия на детали ГТД, а также их сложное сочетание одним из эффективных путей увеличения ресурса их эксплуатации и уменьшения повреждений является упрочнение поверхности путем нанесения покрытий [140, 143]. При этом покрытие должно обладать следующим комплексом свойств. Поверхность должна быть стойкой к эрозии, зона с покрытием не должна снижать статическую прочность и выносливость детали, поверх-

ность должна иметь высокую твердость, трещиностойкость, материал покрытия должен быть жаростойким и теплопроводным. Поверхностный слой должен обеспечивать защиту детали от высокотемпературной коррозии, покрытие должно быть непроницаемым для активных элементов, находящихся во внешней среде и быть химически нейтральным к материалу детали ГТД.

Для работы в таких условиях необходимо, чтобы в ходе технологического процесса было обеспечено получение соответствующих свойств самого покрытия с учетом его материала и материала изделия, соблюдение необходимых геометрических размеров детали с покрытием, как сборочной единицы узла. Кроме того, поскольку деталь с покрытием является составной частью ГТД, т.е. сборочной единицей, поэтому важными свойствами покрытия должны быть равномерная толщина покрытия по всей площади обрабатываемой поверхности при минимальной массе изделия с покрытием.

Результаты многочисленных исследований показывают, что покрытие из нитрида титана обеспечивает повышенную коррозионную и эрозионную стойкость рабочих поверхностей деталей ГТД [144], а высокие износостойкие свойства данного покрытия снижают вероятность повреждений деталей при касаниях с большими относительными скоростями [140]. Кроме того, покрытие из нитрида титана не снижает свои механические свойства при высоких температурах [141-143].

Таким образом, учитывая характер условий эксплуатации деталей ГТД, требования к свойствам покрытия можно представить в виде системы существующих взаимосвязей между контролируемыми параметрами изделия с вакуумным ионно-плазменным покрытием и функциональными свойствами самого покрытия (рисунок 3.4). Из вышеизложенного следует, что использование ФЦА позволяет определить те свойства вакуумного ионно-плазменного покрытия, которые обеспечивают выполнение функций детали с данным видом покрытия для работы в заданных условиях эксплуатации как сборочной единицы ГТД. Это является основой для выбора свойств покрытия, необходимых для нормирования в нормативной и технической документации.

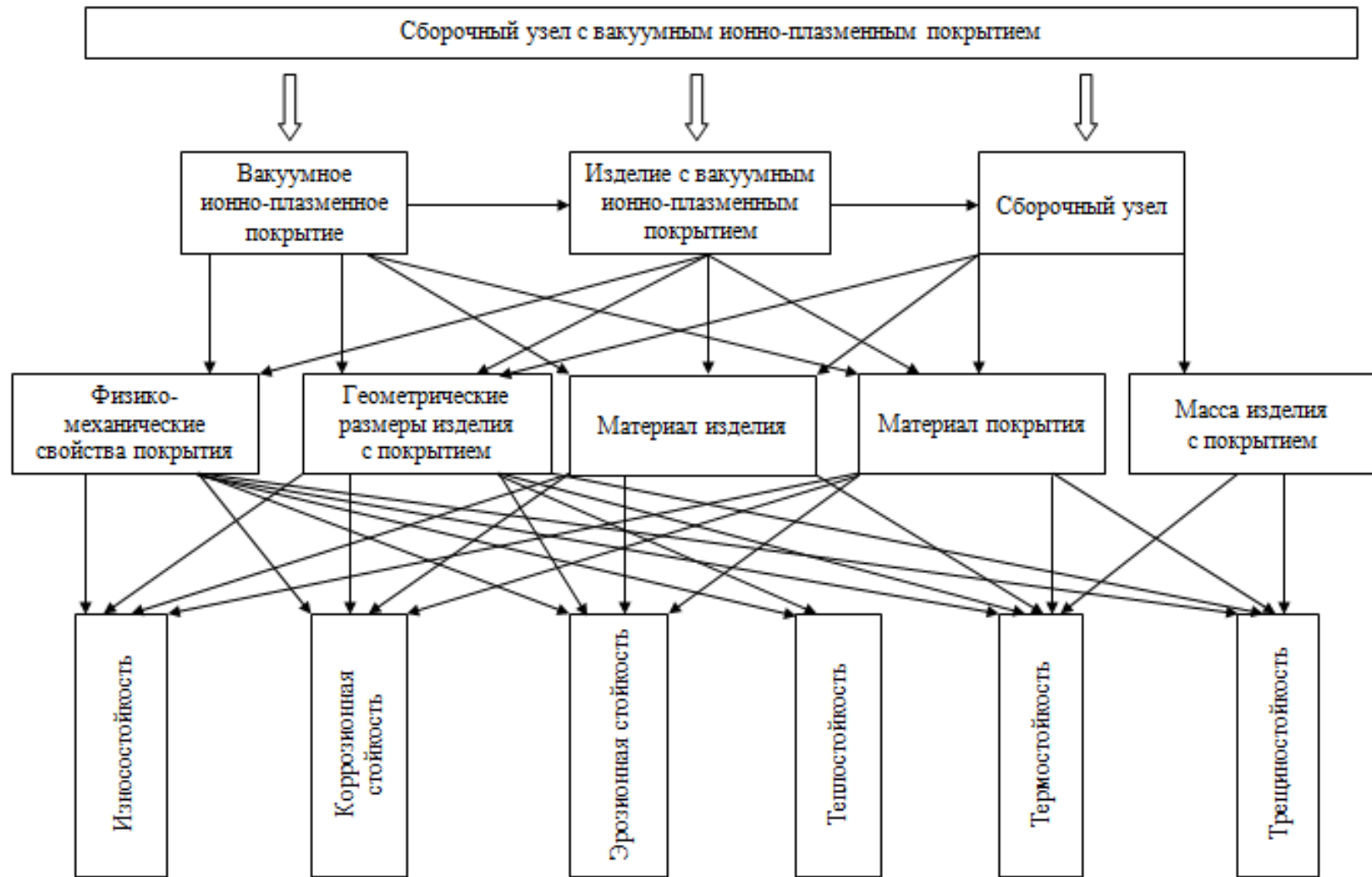


Рисунок 3.4 – Схема взаимосвязи контролируемых параметров и функциональных свойств покрытия в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие»

3.4. Разработка классификации свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий с учетом функциональных взаимодействий в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие»

Как известно, любое научное исследование невозможно без систематизации, которая предполагает использование методических приемов, разделяющих объекты исходя из цели исследования, или наоборот, которые можно объединить исходя из общих признаков. К таким методам стандартизации относят классификацию [145, 146]. Классификационные схемы наглядно демонстрируют структуру исследуемого объекта, которые, в свою очередь, показывают связи между отдельными элементами объекта. Классификация – это процесс разделения всей совокупности объектов исследования на несколько классов в соответствии с каким-либо общим признаком или признаками [147, 148]. Целью использования метода классификации является построение иерархически связанных систем классов и их подклассов на основе некоторых признаков, не свойственных самим объектам или присущих им. Кроме того, классификация может служить основанием для прогнозирования, либо показывать существование ранее неизвестных объектов, предоставляя определенную степень свободы для развития классифицируемого объекта [149].

Поскольку целью данного исследования является разработка методических основ для обоснования выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий для нормирования в нормативной и технической документации, поэтому следует рассмотреть свойства поверхности изделия, как один из факторов, влияющих на свойства наносимых покрытий. В работе [150] свойства поверхности разделены на две группы: свойства, относящиеся к реальной поверхности, и свойства, относящиеся к материалу поверхностного слоя (рисунок 3.5). Однако предлагаемая классификация не учитывает системные связи в системе «изделие – покрытие».

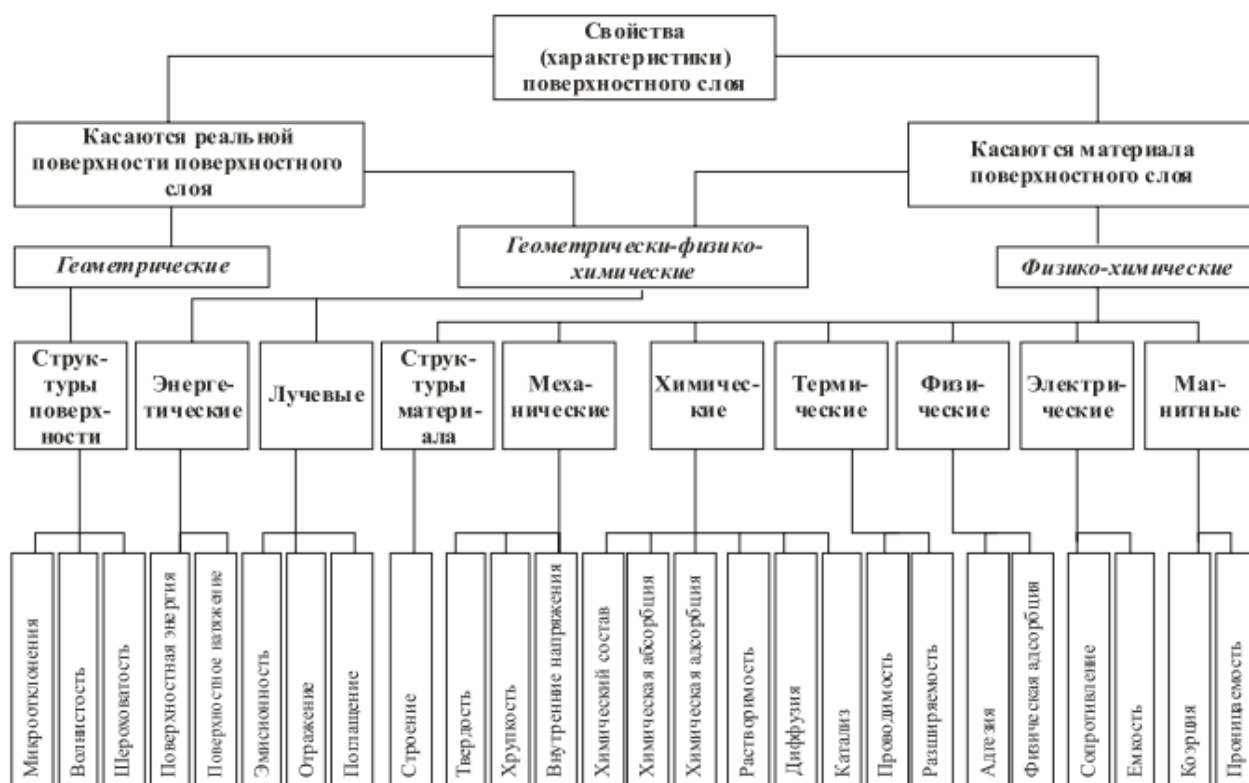


Рисунок 3.5 – Свойства поверхностного слоя [150]

На основании имеющихся классификаций поверхностного слоя [151], а также установленных системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» (см. п. 3.1) разработана классификация свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий [122, 152-153] (рисунок 3.6). Данная классификация отличается от уже существующих тем, что свойства вакуумного ионно-плазменного покрытия разделены по следующим классификационным признакам:

- свойства, определяемые свойствами поверхности и технологическими режимами нанесения покрытия;
- свойства, определяемые условиями эксплуатации изделия с покрытием;
- свойства, определяемые технико-экономическими показателями процесса нанесения покрытия.

Первые две подгруппы (свойства, определяемые свойствами поверхности и технологическими режимами нанесения покрытия и свойства, определяемые условиями эксплуатации изделия с покрытием) разработаны исходя из анализа

этапов обобщенной схемы установления системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие».

К свойствам, определяемым технико-экономическими показателями процесса нанесения покрытия, относятся: экономическая эффективность, производительность, стоимости материала и оборудования. Под экономической эффективностью технологического процесса нанесения покрытия понимается показатель, который определяется соотношением результата и затрат на реализацию технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия. Чем меньше затрат на реализацию и больше значение результата, тем выше экономическая эффективность технологического процесса нанесения покрытия. Производительность технологического процесса нанесения покрытия – это способность наносить покрытие на конкретные детали за одну садку. Количество деталей рассчитывается исходя из размера вакуумной камеры. К затратам технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия относятся стоимости материала и оборудования. Материал детали, покрытия выбирается исходя из технического задания, при этом стоимость зависит от вида материала. Под стоимостью оборудования понимается стоимость специального оборудования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия. Оборудование подбирается исходя из размеров деталей, на которые наносятся необходимые покрытия. От указанных свойств зависят технико-экономическими показателями процесса нанесения покрытия, в этой связи данная подгруппа свойств является составной частью разработанной классификации. В рамках данного диссертационного исследования данная группа свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий не рассматривается.

Таким образом, функциональный анализ системы «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» позволяет определить взаимодействие свойств и функций в каждом элементе анализируемой системы. Использование такого подхода позволяет произвести научно обоснованный выбор тех свойств покрытия, которые необходимо нормировать в нормативной и технической документации с учетом функций изделий с покрытием.

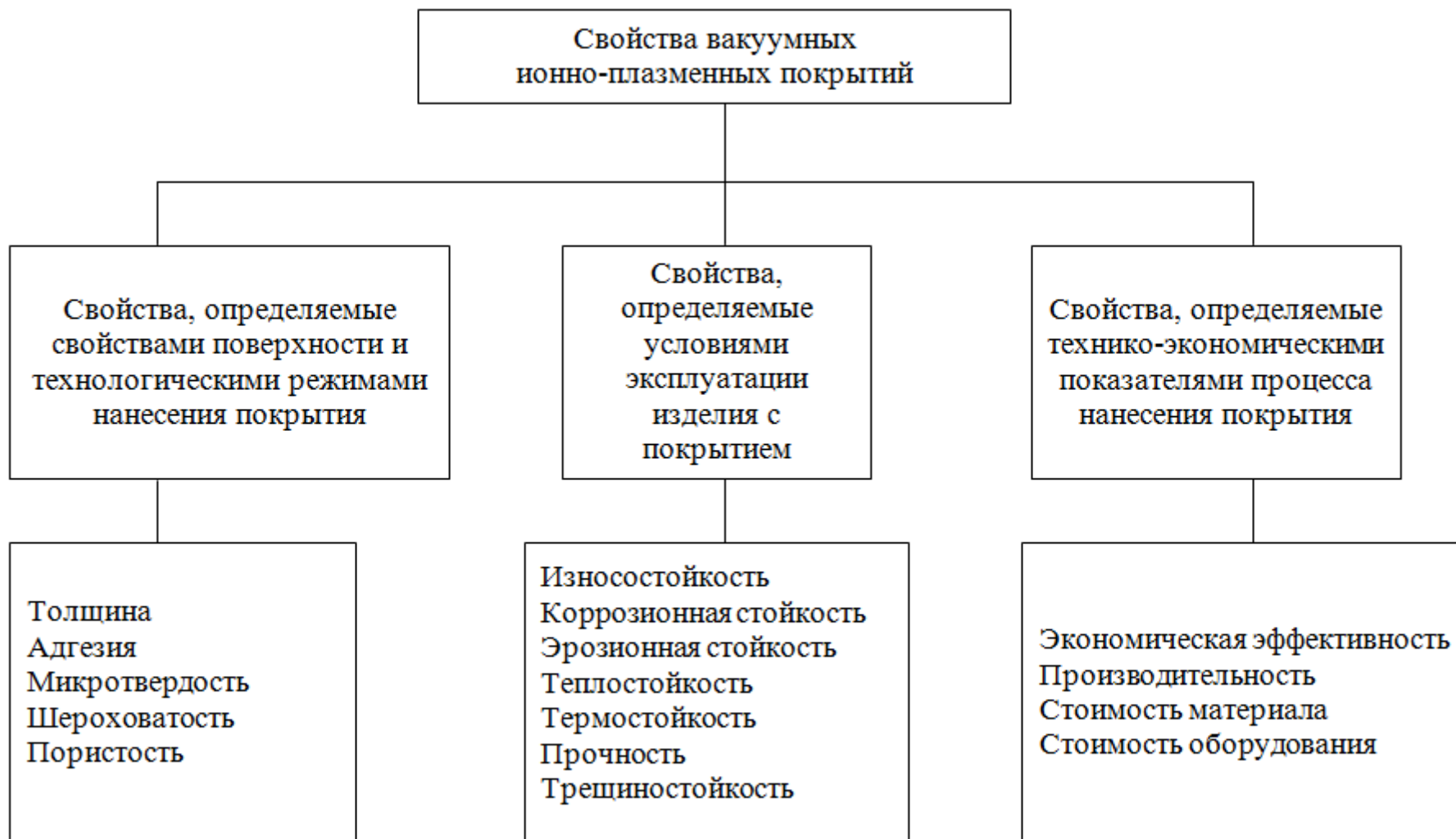


Рисунок 3.6 – Классификация свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий

3.5. Разработка алгоритма выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной и технической документации

Обеспечение эксплуатационных свойств любого изделия с покрытием непосредственным образом связано с необходимостью выбора свойств покрытия, которые должны быть регламентированы в нормативной, технической и конструкторской документации. При этом следует учитывать связи, существующие между всеми элементами системы, а также технологические особенности процесса нанесения покрытия, физическую сущность процессов, обеспечивающих формирование покрытия, технические характеристики используемого оборудования. На рисунке 3.7 представлена обобщенная схема взаимосвязи функциональных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия с учетом системных взаимодействий.

На рисунке 3.8 представлен алгоритм выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации, который представляет ряд последовательно выполняемых действий для выбора тех свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия, которые следует регламентировать в нормативной и технической документации. Основным критерием выбора являются требования обеспечения таких свойств покрытия, которые позволяли выполнение полезных функций изделия с покрытием в заданных условиях эксплуатации. Указанные требования составляются исходя из назначения детали с вакуумным ионно-плазменным покрытием.

Реализация алгоритма выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации основывается на обобщенной схеме установления системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» (см. рисунок 2.7, рисунок 3.4, рисунок 3.3 и рисунок 3.2). При составлении функциональных свойств учитываются условия эксплуатации детали (иными словами виды внешнего воздействия), на которую наносится вакуумное ионно-плазменное покрытие.

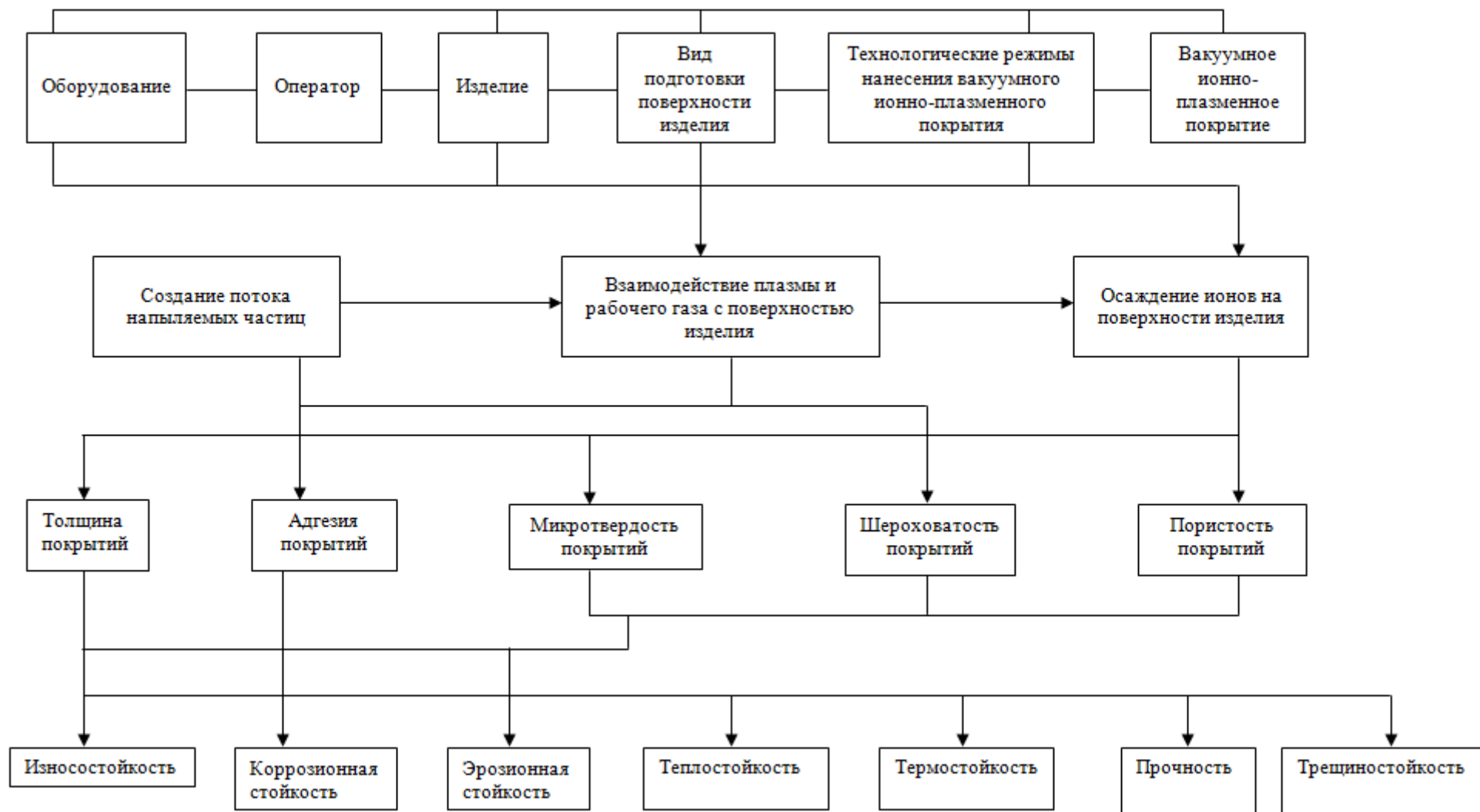


Рисунок 3.7 – Схема взаимосвязи эксплуатационных свойств с процессами формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия

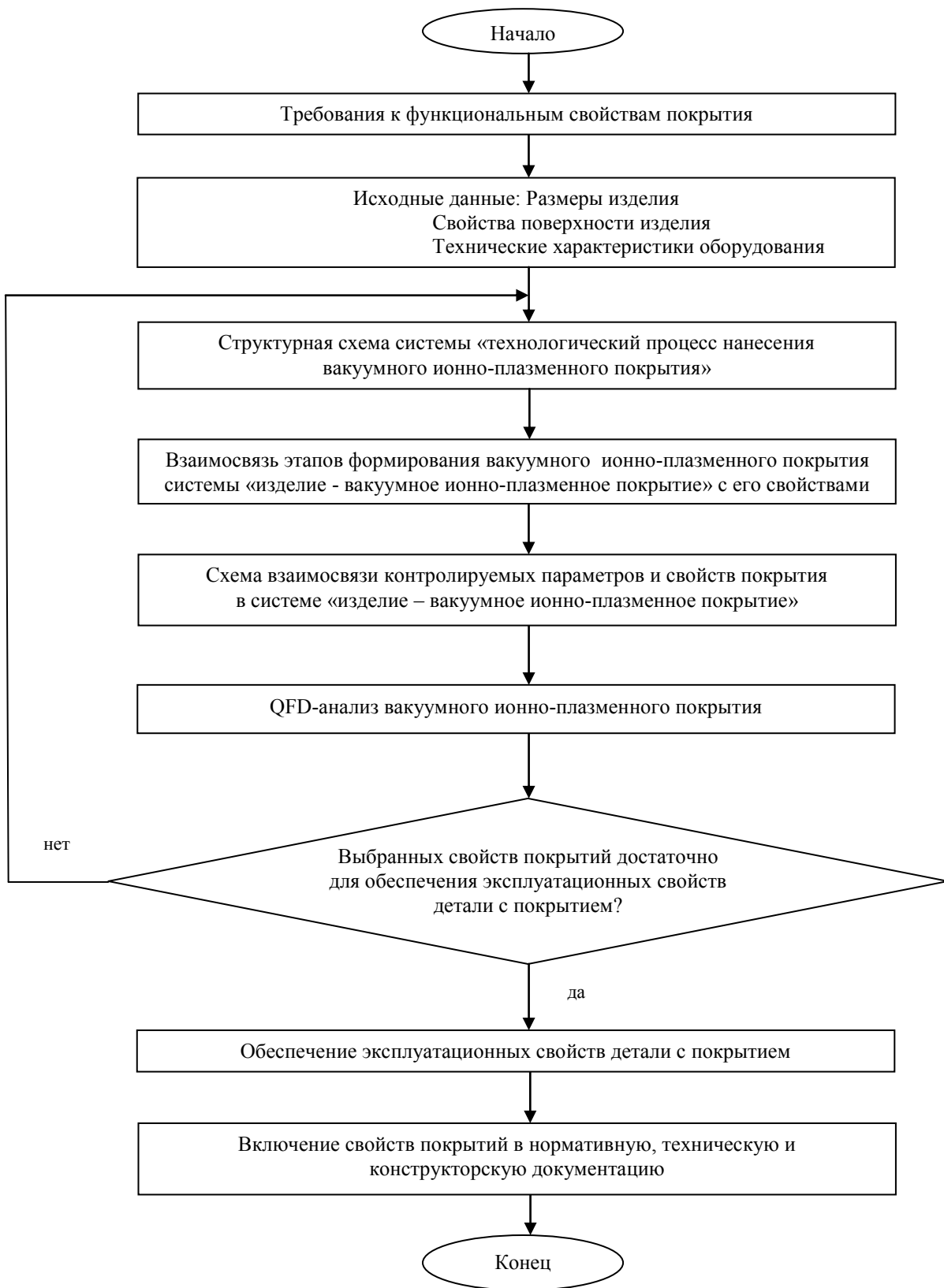


Рисунок 3.8 – Алгоритм выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной, технической и/или конструкторской документации

Одним из важных этапов реализации разработанного алгоритма является проведение QFD-анализа для определения технических требований реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, которые обеспечивали формирование функциональных свойств покрытия. В рамках данного диссертационного исследования QFD-анализ проведен на основе оценок экспертов, которые выбраны из числа ведущих ученых и инженеров ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» и ФГБОУ ВО УГАТУ (общее количество экспертов 8). Результаты QFD-анализа приведены на рисунках П.1 – П.8 Приложения 1. В соответствии с разработанной обобщенной схемой существующих системных связей в системе «изделие – вакуумное ионно-плазменное покрытие» и разработанной классификация свойств покрытий определены технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия и требования к его функциональным свойствам. Построена корреляционная матрица, которая показывает связь между требованиями к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия и техническими требованиями для реализации технологического процесса его нанесения. Причем, сильная связь оценена 3 баллами, средняя – 2 баллами, слабая – 1 баллом. Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия определяется экспертами в баллах. Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия находится как доля каждого технического требования в процентах. При производстве изделий с вакуумным ионно-плазменным покрытием необходимо в первую очередь контролировать технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия с наибольшим значением удельного веса [104].

На основе анализа оценок экспертов составлена обобщенная таблица для определения ранга технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия с целью получения покрытия с заданными функциональными свойствами (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Обобщенная таблица для определения ранга технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия	Исходные показатели поверхности
Эксперт 1	43	51	60	20	60	60	34	28	28	60	40	46	20
Эксперт 2	31	20	42	27	42	32	26	42	26	28	39	28	28
Эксперт 3	36	78	78	26	73	72	67	73	57	78	52	67	57
Эксперт 4	54	39	72	24	39	54	44	72	54	72	48	48	24
Эксперт 5	17	31	41	17	43	25	27	23	19	25	17	29	17
Эксперт 6	44	43	54	18	54	54	50	54	34	54	36	36	36
Эксперт 7	24	50	61	34	46	57	52	52	57	63	42	57	47
Эксперт 8	55	69	74	45	61	78	60	71	59	61	56	52	52
Важность технических требований для реализации технологического процесса	304	381	482	211	418	432	360	415	334	441	330	363	281
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса	6,4	8,0	10,1	4,4	8,8	9,1	7,6	8,7	7,0	9,3	6,9	7,6	5,9
Ранг технических требований для реализации технологического процесса	11	6	1	13	4	3	7-8	5	9	2	10	7-8	12

QFD-анализ позволил проранжировать технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия в следующем порядке:

1. Материал покрытия.
2. Технологические режимы обработки.
3. Адгезия покрытия.
4. Толщина покрытия.
5. Шероховатость покрытия.
6. Материал изделия.
- 7-8. Микротвердость покрытия.
- 7-8. Вид подготовки поверхности изделия
9. Пористость покрытия.
10. Расположение изделий в вакуумной камере.
11. Геометрические размеры до нанесения покрытия.
12. Исходные показатели поверхности.
13. Масса изделия с покрытием.

Таким образом, используя QFD-анализ можно скорректировать технические требования для реализации технологического процесса получения вакуумного ионно-плазменного покрытия со свойствами, необходимыми для конкретных условий эксплуатации изделия с покрытием.

Тогда в соответствии с разработанным алгоритмом, если выбранных свойств покрытия достаточно для обеспечения функциональных свойств изделия с покрытием, то данные свойства включаются в нормативную, техническую и/или конструкторскую документацию и осуществляется реализация технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия. В случае отрицательного результата необходимо вернуться к этапам обобщенной схемы установления системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие».

Проведенный анализ по обобщенной схеме установления системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» и QFD-анализ поз-

волили определить перечень технических требований в нормативной и технической документации для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия:

- материал покрытия;
- технологические режимы обработки;
- адгезия покрытия;
- толщина покрытия;
- шероховатость покрытия;
- материал изделия;
- микротвердость покрытия;
- вид подготовки поверхности изделия.

Необходимо отметить, что указанный перечень включает в себя технические требования конструкторской документации, которые сформулированы в результате проведения метрологической экспертизы. Значит, помимо технических требований конструкторской документации в нормативной и технической документации необходимо нормировать следующие параметры: материал покрытия; технологические режимы обработки; адгезия покрытия; материал изделия.

Таким образом, использование разработанного алгоритма позволяет учесть взаимосвязь между функциональными свойствами изделия с покрытием, этапами формирования покрытия и техническими требованиями для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия. Это представляет собой решение задачи включения необходимых свойств в нормативную и техническую документацию. Разработанный подход может быть использован для решения ряда практических задач для научно обоснованного выбора свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий.

3.6. Выводы по главе 3

1. На основе анализа условий эксплуатации и характера внешних нагрузок на детали газотурбинного двигателя определена система взаимосвязей между кон-

тролируемыми параметрами изделия с вакуумным ионно-плазменным покрытием и свойствами самого покрытия. Использование функционально-целевого анализа позволяет определить те свойства вакуумного ионно-плазменного покрытия, которые обеспечивают выполнение функций детали с данным видом покрытия для работы в определенных условиях эксплуатации как сборочной единицы сложного агрегата.

2. Проведен анализ особенностей процесса формирования вакуумного ионно-плазменного покрытия, что является основой для определения управляющих факторов для получения данного вида покрытий с теми свойствами, которые зависят от технологических режимов его нанесения. Построена структурная схема системы «технологический процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия», определяющая функциональные связи в данной системе.

3. Учитывая функциональные связи в системе «изделие-покрытие», а также взаимообусловленность свойств покрытий и поверхности, разработана классификация свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий, согласно которой свойства покрытия разделены по следующим классификационным признакам: свойства, определяемые свойствами поверхности и технологическими режимами нанесения покрытия; свойства, определяемые условиями эксплуатации изделия с покрытием; свойства, определяемые технико-экономическими показателями процесса нанесения покрытия.

4. Разработан алгоритм выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации. Данный алгоритм построен на установлении взаимосвязи между контролируемыми параметрами технологического процесса нанесения покрытия и его свойствами, которые необходимо обеспечить в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» в соответствии с условиями эксплуатации изделия с покрытием. Этим обеспечивается научно обоснованный выбор свойств покрытия для регламентации в нормативной, технической и/или конструкторской документации.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ТОЛЩИНЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ВАКУУМНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ TiN В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА ДЕТАЛИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

4.1. Методика проведения исследования

Сущность процесса нанесения покрытия вакуумным ионно-плазменным методом заключается в следующем. В вакуумную камеру на стол устанавливаются детали. Камера герметизируется, и создается вакуум. Между анодом и катодом подается напряжение. Дуга, которая возникает между анодом и катодом горит в парах материала катода. Испарение материала производится из области катодных микропятен вакуумной дуги. Для ионизации и ускорения ионов плазмы на детали подается отрицательный потенциал. В случае высокого отрицательного потенциала происходит ионная очистка. После ионной очистки значение потенциала снижается и производится процесс осаждения покрытия. На рисунке 4.1 представлена схема нанесения покрытия вакуумным ионно-плазменным методом [2].

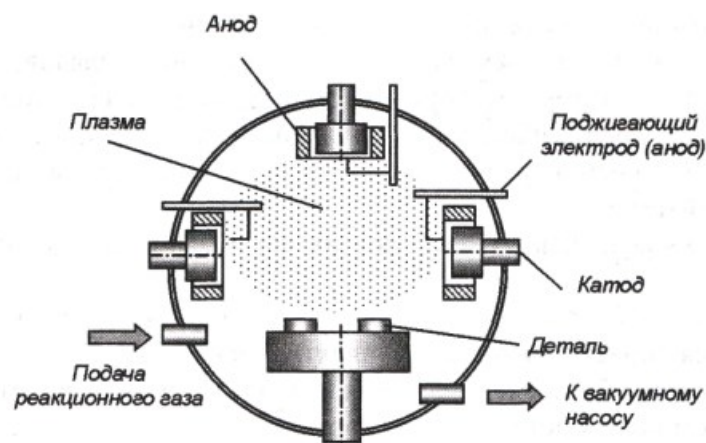


Рисунок 4.1 – Схема нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия

Для проведения экспериментальных исследований использовали установку ННВ-6.6-И1, которая предназначена для нанесения покрытий металлов и химических соединений [56] (рисунок 4.2).

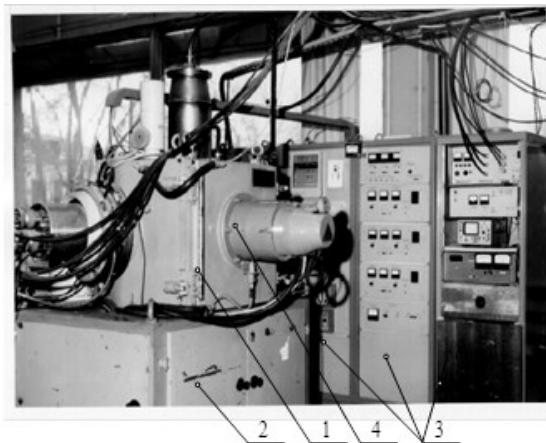


Рисунок 4.2 – Установка ННВ-6.6-И1 для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий: 1 - вакуумная камера; 2 - газораспределительная и откачная системы; 3 - система электропитания и блокировки; 4 - испаритель

В вакуумной камере создаются условия для реализации технологического процесса нанесения покрытия (давление, температура, состав реакционного и инертного газов). Газораспределительная и откачная системы состоит из вакуумных насосов, клапанов, натекаелей и необходимых средств измерения. В систему электропитания и блокировки входит система контроля и управления технологическими параметрами. Испаритель состоит из катода, анода, магнитной системы и устройства поджига дуги. Технические характеристики установки ННВ-6.6-И1 представлены в таблице 4.1. Максимальные размеры обрабатываемых заготовок составляют диаметр до 200 мм и высота до 250 мм [56]. В ходе нанесения покрытия детали равномерно вращаются в вакуумной камере вокруг собственной оси и вокруг оси ствола. Для получения покрытия TiN материалом катода является титан, в вакуумную камеру напускают рабочий газ - азот. При конденсации испаряемого материала титана (катода) происходит взаимодействие с атомами легирующего газа (азота), в результате чего формируется покрытие TiN.

Таблица 4.1 – Характеристики установки ННВ-6.6-И1

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Размеры камеры, мм диаметр высота	600 600
2	Количество испарителей	3
3	Ток дуги, А	50-315
4	Номинальный ток высоковольтного источника питания, В	20
5	Диапазон плавного регулирования высоковольтного источника питания, В	от 100 до 1500
6	Остаточное давление в камере, Па	$6,65 \cdot 10^{-3}$
7	Количество установочных позиций	24
8	Максимальные размеры обрабатываемых заготовок, мм диаметр высота	200 250
9	Частота вращения, об/мин	0,5-12
10	Диаметр катода, мм	80
11	Расход материала катода, г/мин	0,25-0,32
12	Напряжение на обрабатываемых деталях, В	10-1200
13	Потребляемая мощность, кВт	50
14	Скорость осаждения покрытий, мкм/час	до 40
15	Габаритные размеры, мм	3765x4300x2160

В качестве объекта экспериментальных исследований применяли образцы размерами 20x20x2 мм из стали марки 45. Схема расположения образцов в вакуумной камере представлена на рисунке 4.3.

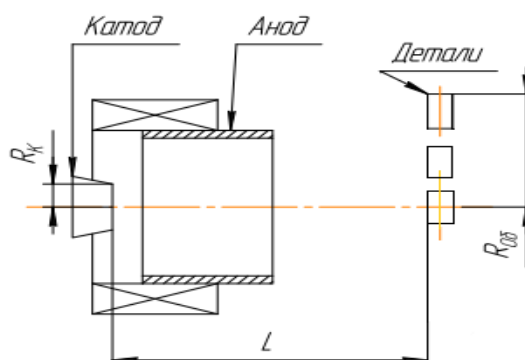


Рисунок 4.3 – Схема расположения образцов в вакуумной камере установки

ННВ-6.6-И1: радиус катода (R_k); расстояние от катода (L);

расстояние от оси потока ($R_{об}$)

Режимы нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Режимы нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN

Режимы нанесения TiN	Значение
Давление в вакуумной камере, мм.рт.ст.	10^{-3}
Опорное напряжение, В	180
Сила тока в дуговом испарителе, А	95
Ток разряда, А	10
Время осаждения, ч.	0,5

Толщина вакуумного ионно-плазменного покрытия является одним из важных свойств, которая зависит от различных технологических и технических параметров процесса нанесения. При осаждении покрытия необходимо обеспечивать равномерность толщины покрытия по всей поверхности детали. Анализ следующих работ показывает [57, 58], что уменьшение разницы толщины покрытия по поверхности детали можно обеспечить путем вращения изделий в вакуумной камере в процессе нанесения. В работах [154-156] приведено, что на свойства данного покрытия также влияет расстояние от катода и неоднородность потока плазмы.

Для того чтобы определить численные значения толщины и микротвердости вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN в зависимости от расположения деталей в вакуумной камере была проведена серия экспериментальных исследований. Микротвердость покрытия измеряли методом инструментального индентирования на нанотвердомере Nanovea при нагрузке 150 мН. Расчет толщины покрытий производили по результатам измерения параметров лунки с помощью прибора CSM Calotest. Измерение параметров лунки и расчет толщины покрытия TiN произведены на приборе CSM Scratchtest. Рентгеноструктурный анализ покрытия TiN проводили на дифрактометре Rigaku Ultima IV с фокусировкой го-

ниометра по методу Брэгга–Брентано с использованием $\text{Cu K}\alpha$ -излучения (40 кВ, 40 мА). Общий вид рентгенограмм получен с шагом сканирования $0,025^\circ$. Угловой интервал съемки $2\theta = 25-140^\circ$. Качественная и количественная оценки фазового состава производилась с использованием программного пакета PDXL.

4.2. Факторный анализ влияния расположения деталей в вакуумной камере на толщину и микротвердость покрытия TiN

В рамках диссертационного исследования был проведен полный факторный эксперимент. Вакуумная камера для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия представляет собой вертикально расположенный цилиндр. В этой связи входными параметрами технологического процесса определены расстояния от оси потока и катода и, в качестве откликов – микротвердость и толщина вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN [157]. С учетом данных условий, проведен полный факторный эксперимент типа $3k$ с двухуровневой вариацией факторов (таблица 4.3) по аналогии с полным факторным экспериментом типа 2^k для каждого отклика [69, 158, 159].

Таблица 4.3 – Исходные данные полного факторного эксперимента типа $3k$

Уровень	Расстояние от катода, мм	Расстояние от оси потока, мм
	\tilde{x}_1	\tilde{x}_2
верхний	400	200
средний	300	100
нижний	200	0

Целевые функции в зависимости от параметров можно представить в следующем виде

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (4.1)$$

$$\text{- отклик (микротвердость): } y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2; \quad (4.2)$$

$$\text{- отклик (толщина): } y_2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (4.3)$$

Для упрощения записи условий и обработки результатов переходим к безразмерным переменным [151]

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j}, \quad (4.4)$$

где x_j – значение фактора в новых переменных, \tilde{x}_j – натуральное значение фактора, \tilde{x}_{j0} – натуральное значение основного уровня (среднего уровня), I_j – интервал варьирования, j – номер фактора. В этом случае матрица планирования эксперимента содержит только значения -1; 0 и 1.

В таблицах 4.4 и 4.5 представлены результаты расчетов целевых функций по микротвердости и толщине покрытия TiN.

Таблица 4.4 – Матрица планирования полного факторного эксперимента по микротвердости покрытий TiN и соответствующие факторам x_1 , x_2 значения целевой функции y_1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_1	-1	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+1
x_2	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
y_1	39	28	4	30	25	17	25	21	18

Таблица 4.5 – Матрица планирования полного факторного эксперимента по толщине покрытий TiN и соответствующие факторам x_1 , x_2 значения целевой функции y_2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_1	-1	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+1
x_2	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
y_1	36	21	0	8	14	4	2	7	3

Для того, чтобы найти коэффициенты b_1 , b_2 , b_{12} из указанных целевых функций для откликов, произведены следующие расчеты. Для расчета использован ме-

тод наименьших квадратов, который в свою очередь позволяет минимизировать сумму квадратов невязок

$$U = \sum_{i=1}^9 (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - b_{12} x_{1i} x_{2i})^2 \rightarrow \min. \quad (4.5)$$

Для нахождения численных значений коэффициентов b_1 , b_2 , b_{12} необходимо решить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{dU}{db_0} = -2 \sum_{i=1}^9 (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - b_{12} x_{1i} x_{2i}) = 0 \\ \frac{dU}{db_1} = -2 \sum_{i=1}^9 (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - b_{12} x_{1i} x_{2i}) x_{1i} = 0 \\ \frac{dU}{db_2} = -2 \sum_{i=1}^9 (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - b_{12} x_{1i} x_{2i}) x_{2i} = 0 \\ \frac{dU}{db_{12}} = -2 \sum_{i=1}^9 (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - b_{12} x_{1i} x_{2i}) x_{1i} x_{2i} = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

После проведения соответствующих расчетов получены зависимости целевых функций от целевых параметров:

$$\text{- для отклика (микротвердость): } y_1 = 23 - 1,167x_1 - 9,167x_2 + 7x_1x_2; \quad (4.7)$$

$$\text{- для отклика (толщина): } y_2 = 10,556 - 7,5x_1 - 6,5x_2 + 9,25x_1x_2. \quad (4.8)$$

Для оценки качества модели был произведен расчет коэффициента детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^9 (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^9 (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4.9)$$

где \hat{y}_i – прогнозируемое значение отклика, вычисленное с подстановкой в полученное уравнение регрессии; \bar{y} – среднее значение отклика экспериментальных данных; y_i – экспериментальные значения отклика.

Тогда чем ближе значение коэффициента детерминации к 1, тем качественнее является модель [131]. По шкале Чеддока определяем: если значение коэффициента от 0,1 до 0,3, то теснота связи слабая; от 0,3 до 0,5 – умеренная; от 0,5 до 0,7 – заметная; от 0,7 до 0,9 – сильная; от 0,9 до 0,99 – очень сильная.

Произведены соответствующие расчеты, в результате которых коэффициент детерминации для микротвердости составляет 0,9271, а для толщины - 0,8704. Полученные численные значения означают о высоком качестве модели.

Для каждого отклика произведена оптимизация с использованием дифференциального метода:

- для отклика (микротвердость): $\frac{\partial y_1}{\partial x_1} = 0;$ (4.10)

- для отклика (толщина): $\frac{\partial y_2}{\partial x_1} = 0.$ (4.11)

Составив систему уравнений для каждого отклика, получаем такое расположение изделий в вакуумной камере, при котором обеспечиваются необходимые значения как для микротвердости, так и для толщины.

Из проведенных расчетов были получены следующие уравнения:

- для отклика (микротвердость) в кодированных значениях

$$\tilde{x}_1 = 1,3096 \text{ и } \tilde{x}_2 = 0,1667;$$

- для отклика (толщина) в кодированных значениях:

$$\tilde{x}_1 = 0,7027 \text{ и } \tilde{x}_2 = 0,8108.$$

Из кодированных значений переходим к натуральным значениям:

- для отклика (микротвердость): $\tilde{x}_1 = 310$ мм и $\tilde{x}_2 = 117$ мм;

- для отклика (толщина): $\tilde{x}_1 = 370$ мм и $\tilde{x}_2 = 181$ мм.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что для отклика (микротвердость):

- расстояние от катода составляет $L = 310$ мм;

- расстояние от оси потока составляет $R_{об} = 117$ мм;

для отклика (толщина):

- расстояние от катода составляет $L = 370$ мм;

- расстояние от оси потока составляет $R_{об} = 181$ мм.

Таким образом, проведен полный факторный эксперимент типа $3k$ с двухуровневой вариацией факторов по аналогии с полным факторным экспериментом типа 2^k для каждого выходного параметра. При этом для каждого свойства вакуумного ионно-плазменного покрытия (отклика) составляется своя целевая функ-

ция, проводятся соответствующие расчеты, и определяется такое расположение изделий в вакуумной камере, при котором обеспечивается необходимое свойство покрытия, формирующиеся при реализации технологического процесса нанесения покрытия. Следует отметить, что при определении расположения изделий в вакуумной камере необходимо учитывать расстояния от катода и оси потока того свойства вакуумного ионно-плазменного покрытия, которое имеет более высокий ранг технических требований для реализации технологического процесса по итогам QFD-анализа.

4.3. Исследование влияния расположения деталей в вакуумной камере на толщину, микротвердость и фазовый состав вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN

Результаты экспериментальной проверки полученных уравнений факторного анализа представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Толщина покрытия TiN от расстояния катода при изменении расстояния от оси потока

Расстояние от катода (L), мм	Расстояние от оси потока ($R_{об}$), мм		
	0	100	200
210	36	21	0
310	8	14	4
400	2	7	3

Из полученных данных видно, что на оси потока ($R_{об} = 0$) толщина покрытия уменьшается с увеличением расстояния от катода (от 36 до 2 мкм). На расстоянии от оси потока 100 мм толщина покрытия с ростом L линейно убывает (от 21 до 7 мкм). На расстоянии 200 мм толщина покрытия при $L = 210$ мм равна нулю, при $L = 310$ мм достигает значения 4 мкм и далее не увеличивается. По результатам исследования толщина покрытия с ростом расстояния от катода уменьшается (от

36 мкм до 0). Это связано с неоднородностью плазменного потока и различной плотностью ионного тока при выбранных значениях расстояния образцов от катода [160, 161]. Полученные результаты позволяют определить соответствующее расположение деталей в вакуумной камере для получения покрытия TiN необходимой толщины.

Результаты исследования влияния расположения деталей в вакуумной камере на микротвердость покрытия приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Микротвердость покрытия TiN от расстояния катода при изменении расстояния от оси потока

Расстояние от катода (L), мм	Расстояние от оси потока ($R_{об}$), мм		
	0	100	200
210	39	28	4
310	30	25	17
400	25	21	18

На оси потока микротвердость покрытия с ростом расстояния от катода уменьшается (от 39 до 25 ГПа). На расстоянии от оси потока 100 мм микротвердость покрытия с ростом L также убывает (от 28 до 21 ГПа). При $R_{об} = 200$ мм микротвердость покрытия с ростом L увеличивается (от 4 до 18 ГПа). В результате проведенных экспериментов установлено, что микротвердость покрытия TiN с ростом расстояния от катода в основном уменьшается, кроме случая, когда расстояние от оси потока составляет $R_{об} = 200$ мм. Снижение микротвердости покрытия связано с уменьшением толщины покрытия при увеличении расстояния от катода [160, 161].

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают зависимость толщины и микротвердости вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере. В свою очередь, как показано в работе [162] от данных свойств зависят эксплуатационные свойства ряда деталей газотурбинного двигателя. Например, повышается износостойкость

деталей ~ в 2 раза (в условиях сухого трения) и ~ в 10 раз (в условиях смазки), снижается интенсивность изнашивания ~ на 20 % (при грубом абразивном износе), ~ в 10 раз (при тонком абразивном износе), улучшается эрозионная стойкость рабочей поверхности на 25 %, и, как результат, увеличивается общий срок службы ряда деталей газотурбинного двигателя в 1,8-2 раза.

На следующем этапе экспериментальных исследований был изучен фазовый состав покрытий TiN, полученных при различных значениях расстояния образцов от катода. Анализ научных публикаций [53, 65, 70, 80, 82, 140, 141, 162, 163] показывает, что вопрос о взаимосвязи между фазовым составом вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере недостаточно изучен. В этой связи, для установления взаимосвязи между указанными параметрами проведен рентгеноструктурный анализ.

Результаты обработки качественных данных рентгеноструктурного анализа покрытия TiN для различных вариантов расположения деталей в вакуумной камере при вакуумном ионно-плазменном напылении представлены на рисунках 4.4-4.10. На указанных рисунках L – расстояние от катода, $R_{об}$ – расстояние от оси потока, h – толщина покрытия TiN.

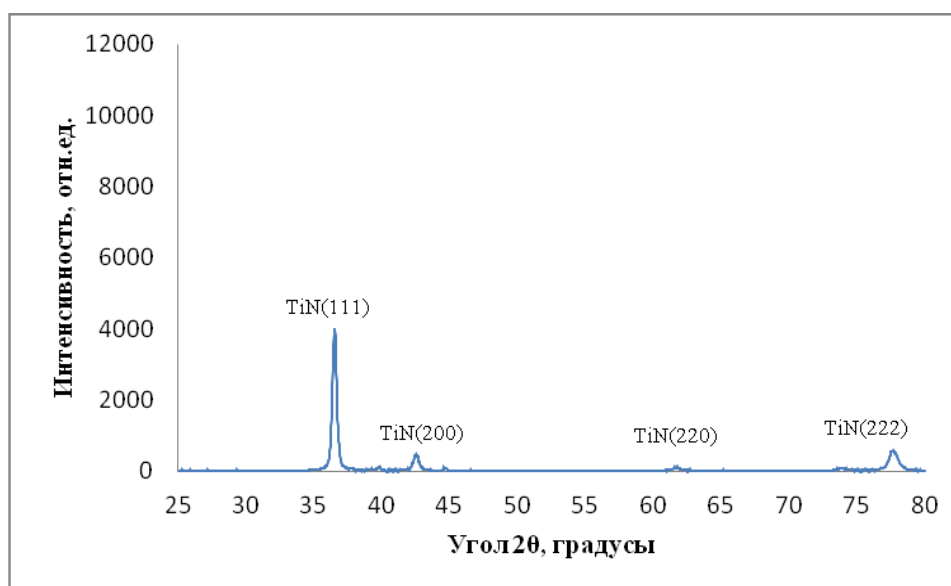


Рисунок 4.4 – Рентгеновская дифрактограмма

вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L = 210$ мм, $R_{об} = 0$ мм), $h = 36$ мкм

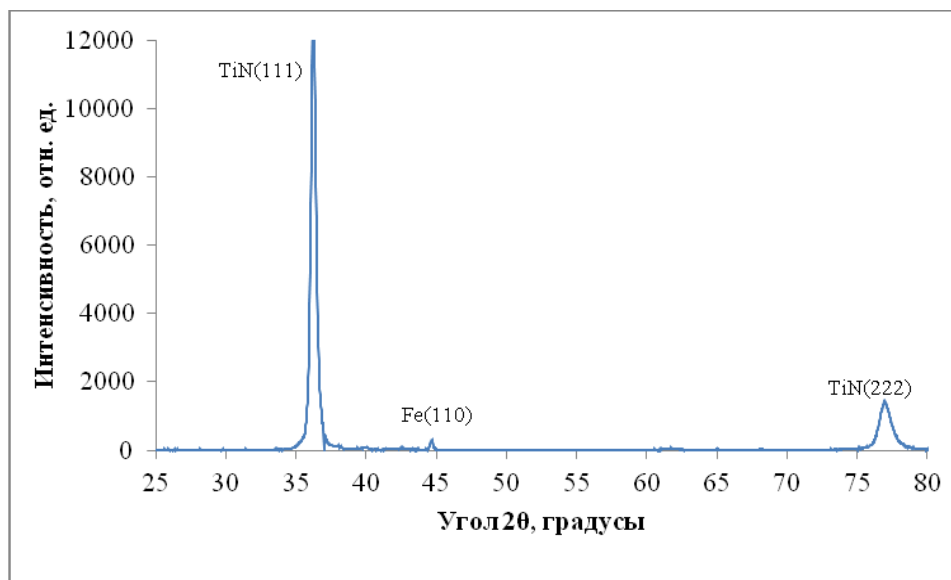


Рисунок 4.5 – Рентгеновская дифрактограмма вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L = 310$ мм, $R_{об} = 0$ мм), $h = 8$ мкм

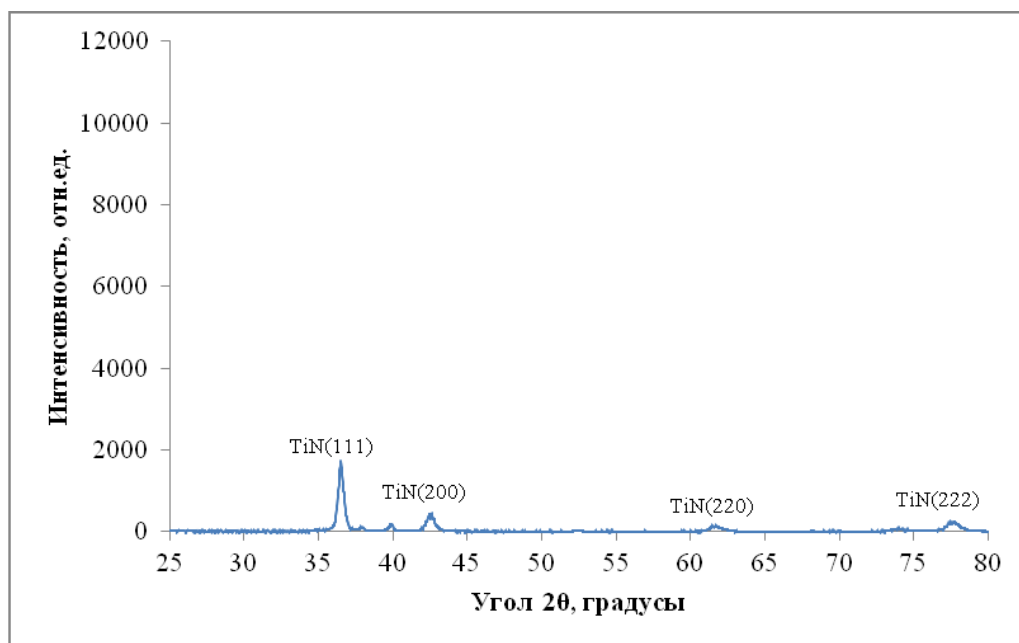


Рисунок 4.6 – Рентгеновская дифрактограмма вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L=210$ мм, $R_{об} = 100$ мм), $h=21$ мкм

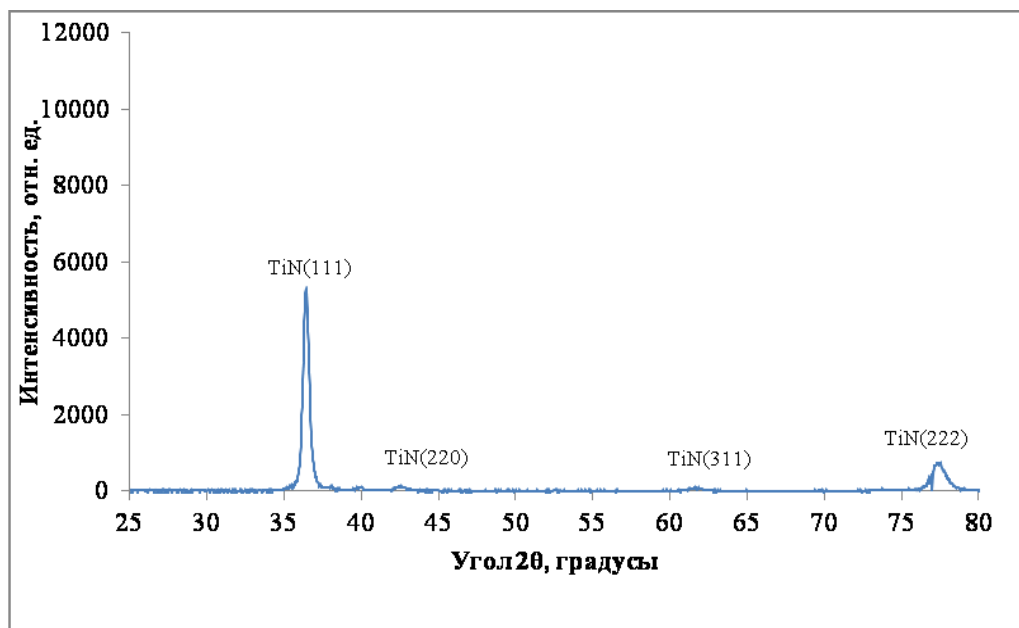


Рисунок 4.7 – Рентгеновская дифрактограмма вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L=310$ мм, $R_{об}=100$ мм), $h = 14$ мкм

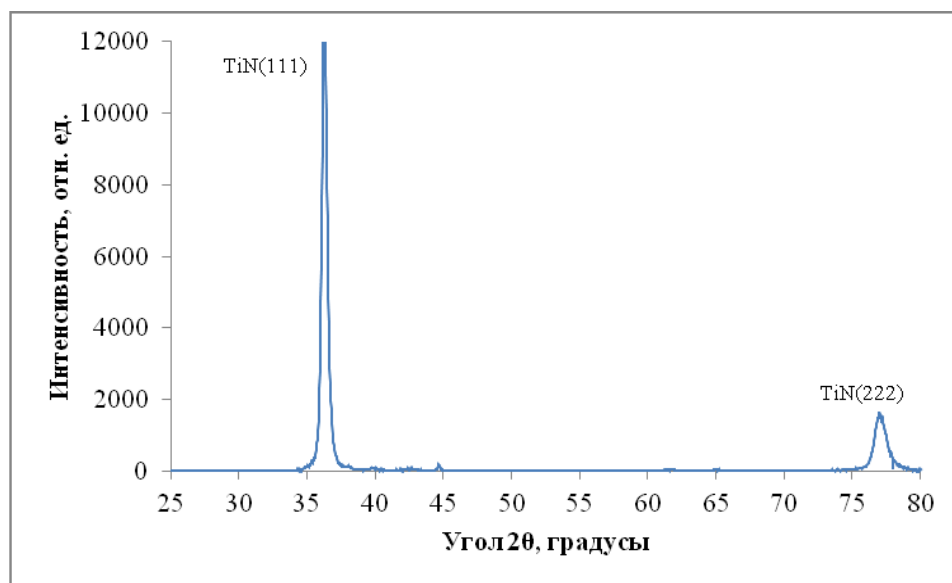


Рисунок 4.8 – Рентгеновская дифрактограмма вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L=400$ мм, $R_{об} = 100$ мм), $h = 7$ мкм

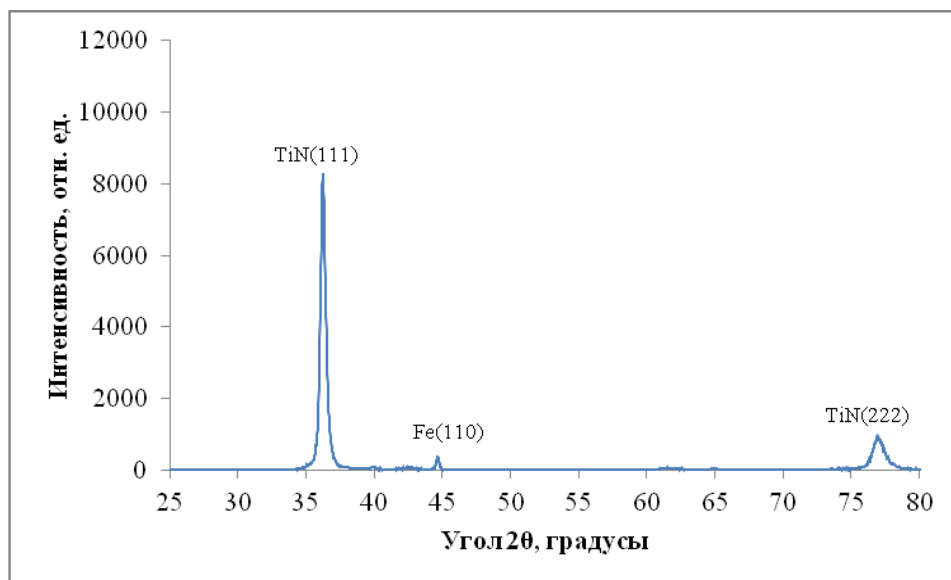


Рисунок 4.9 – Рентгеновская дифрактограмма вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L=310$ мм, $R_{об} = 200$ мм), $h = 4$ мкм

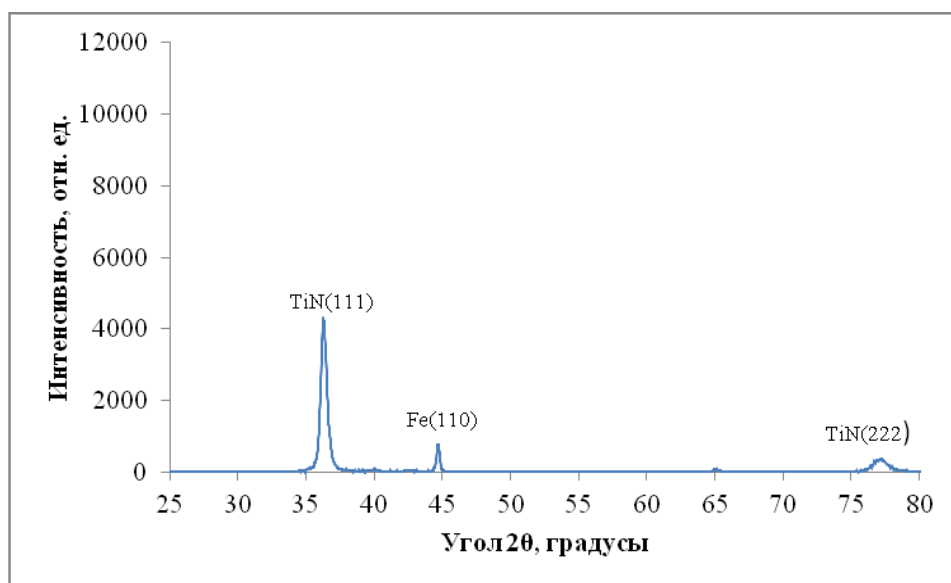


Рисунок 4.10 – Рентгеновская дифрактограмма вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN ($L=400$ мм, $R_{об} = 200$ мм), $h = 3$ мкм

Как видно из полученных рентгенограмм, при всех выбранных для исследования значений расположения деталей в вакуумной камере в покрытиях присутствуют фазы TiN и Ti. При взаимодействии титана с азотом образовались следу-

ющие фазы: твердый раствор азота в α -Ti с ГПУ решеткой (α -фаза), мононитрид TiN с ГЦК решеткой (δ -фаза). В работе [35] описаны образования указанных фаз, которые основаны на состояниях и переходах адсорбированной молекулы азота, включающие явление полисорбции молекул азота. Авторы объясняют образование данных фаз следующим образом. При этом молекула азота имеет различную энергию связи из-за этого после прохождения термической аккомодации переходит в α -состояние. Из этого состояния молекула азота может либо диссоциировать на атомы, либо десорбироваться, либо за счет поверхностной миграции перейти на другой центр сорбции в том же α -состоянии или в β_1 -состоянии. Молекула из состояния β_1 азота может также либо диссоциировать на атомы, либо за счет поверхностной миграции перейти на другой центр сорбции в том же состоянии, либо вернуться в α -состояние, либо перейти в β_2 -состояние. Приведенные в данной работе расчеты позволили определить степени заполнения адсорбционного слоя атомами металла и азота и молекулами азота при получении покрытий. Также авторами отмечается, что максимальное количество азота зависит как от энергии ионов металла (W_i), так и температуры поверхности. С увеличением W_i параметр стехиометрии покрытия сначала возрастает по линейному закону, а при достижении насыщения мало изменяется при увеличении W_i . Это объясняется наличием критической энергии ионов, которые обеспечивают максимальное количество диссоциированных молекул азота, вступивших в хемосорбцию с титаном [35].

Поскольку интенсивность для каждого сочетания расстояний от катода и оси потока разная, можно сделать вывод, что данная характеристика зависит от расположения деталей в вакуумной камере.

По результатам анализа полученных в ходе диссертационного исследования экспериментов результатов с использованием программного пакета PDXL данные кристаллических решеток присутствующих фаз TiN и Ti совпадают с табличными данными.

Влияние расположения образцов в вакуумной камере на содержание TiN и Ti представлены на рисунках 4.11 и 4.12.

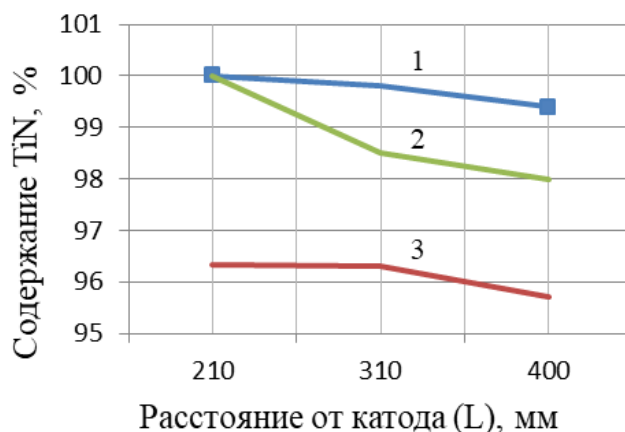


Рисунок 4.11 – Содержание TiN (osbornite) от расстояния катода при различных значениях расстояния от оси потока:

1 – $R_{06} = 0$ мм; 2 – $R_{06} = 100$ мм; 3 – $R_{06} = 200$ мм

Как видно из рисунка 4.11, на оси потока содержание TiN от расстояния катода незначительно уменьшается (от 100 до 99,4 %). На расстоянии 100 мм от оси потока содержание TiN от расстояния катода убывает (от 96,33 до 95,7 %). При расстоянии 200 мм от оси потока содержание TiN от расстояния катода также уменьшается (от 100 до 98 %). Таким образом, содержание TiN составляет 95,7-100%. Содержание TiN уменьшается при увеличении расстояния от катода, причем на оси потока TiN содержится больше.

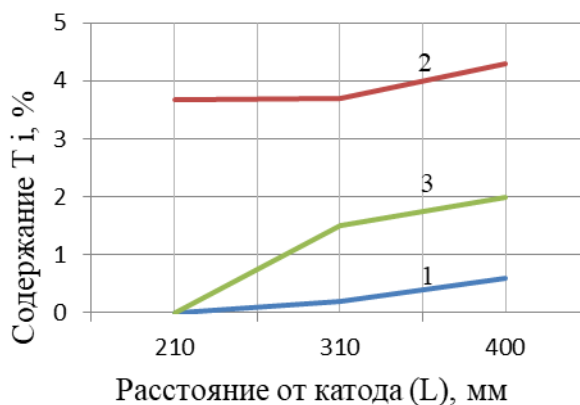


Рисунок 4.12 – Содержание Ti от расстояния катода при различных значениях расстояния детали от оси потока:

1 – $R_{06} = 0$ мм; 2 – $R_{06} = 100$ мм; 3 – $R_{06} = 200$ мм

Как видно из рисунка 4.12, на оси потока зависимость содержания Ti от расстояния катода незначительно увеличивается (от 0 до 0,6 %). На расстоянии 100 мм от оси потока содержание Ti от расстояния катода возрастает (от 3,67 до 4,3 %). А на расстоянии 200 мм от оси потока содержание Ti от расстояния катода также увеличивается (от 0 до 2 %). Таким образом, содержание Ti составляет до 4,3%. Содержание Ti увеличивается при увеличении расстояния от катода.

Экспериментальные исследования показали, что содержание TiN от расположения деталей в вакуумной камере составляет от 95,7 до 100 %, а содержания Ti от 0 до 4,3 %, причем на оси потока содержание TiN составляет 100 %. Анализ литературных источников показывает [162], что наибольшее количество капельной фазы α -Ti (9 %) зафиксированы в покрытиях, полученных при максимальном значении тока дуги (180 А). Кроме того, наличие этой фазы приводит к неоднородности покрытия, повышает шероховатость поверхности. В этой связи, для получения большего содержания TiN рекомендуется проводить осаждение при минимальном токе дуги и расположить детали ближе к оси потока.

Проведенные исследования показывают влияние расположения деталей в вакуумной камере на толщину, микротвердость и фазовый состав вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN. Эти свойства, обусловленные ходом протекания процесса нанесения данного покрытия, будут оказывать влияние и на функциональные свойства, необходимые для работы изделия с покрытием в определенных условиях эксплуатации. В этой связи данные свойства необходимо указывать в технической документации на детали ГТД, на которые наносится покрытие TiN.

4.4. Разработка технологической инструкции «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на Цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль» с учетом функциональных свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN

В настоящее время идет разработка нового газотурбинного двигателя с тягой

14 тонн, так называемый Пермский Двигатель (ПД-14) (рисунок 4.13). ПД-14 – турбореактивный двухконтурный двухвальный двигатель, работающий без смешения потоков наружного и внутреннего контуров, с реверсом и эффективной системой шумоглушения, включая шевроны. Двигатель ПД-14 рассчитан на ресурс 200 тыс. часов (или 40 тыс. полетных часов) [164, 165].

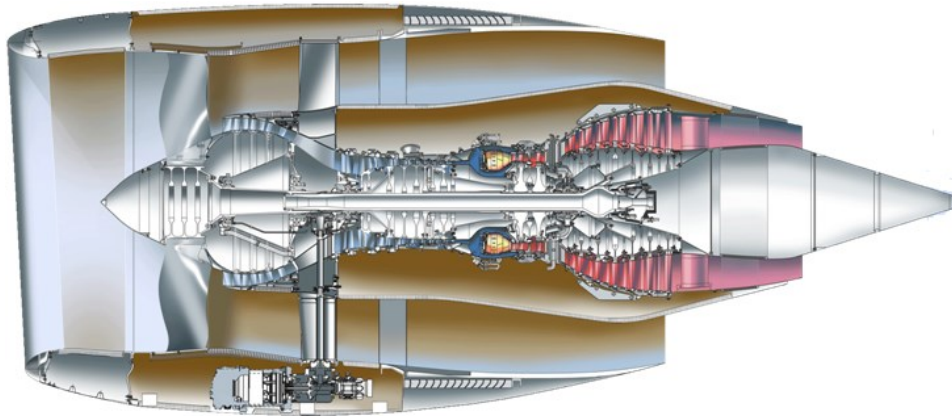


Рисунок 4.13 – Двигатель ПД-14

Цапфа служит опорой ротора высокого давления и передает крутящий момент на диски ротора. Деталь «Цапфа КВД» является особо ответственной деталью компрессора высокого давления, нагруженной центробежными и переменными газодинамическими силами, поэтому все поверхности обрабатываются с чистотой Ra 1,6. Рабочая среда – масло и воздух [166].

Заданная геометрия цапфы, точность обработки, шероховатость обработки поверхностей обеспечивают работоспособность детали при заданной рабочей температуре в течение назначенного ресурса двигателя. Цапфа передней опоры КВД соединяется с дисками третьей и четвертой ступени посредством болтового соединения, для чего на фланце цапфы выполнено 21 отверстие $\varnothing 10,5H7$ под призонные болты. На коническую поверхность цапфы по диаметрам $\varnothing 130n5$ и $\varnothing 122n5$ прессуются два воздушных лабиринта, которые крепятся штифтами. Десять отверстий $\varnothing 12$, выполненные на конической поверхности цапфы, служат для выравнивания давления за и перед стенкой фланца цапфы. По $\varnothing 130n5$ монтируется маслосборная втулка пакета уплотнения передней опоры. От осевого перемещения

пакет уплотнения предохранен гайкой, которая накручивается на цапфу по диаметру M120x1,5. Двенадцать канавок диаметрами 8 мм и 5 мм выполнены для подвода масла к шарикоподшипникам. Десять отверстий $\varnothing 10H10$ мм служат для смазки и охлаждения шарикоподшипника. Кромки $\varnothing 10H10$ мм притупляются для лучшей циркуляции масла.

На поверхность П1 под маслосборную втулку и внутренние шлицы под вал ТНД наносится покрытие TiN для повышения твердости и избежания сколов. С использованием результатов данного диссертационного исследования была впервые разработана технологическая инструкция на Цапфу компрессора высокого давления для ПД-14 (Приложение 2).

Технологическая инструкция ТИ 257.009-2017 «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на Цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль» [167] содержит следующие разделы:

- область применения;
- нормативные ссылки;
- обозначения и сокращения;
- требования к нанесению покрытия;
- контроль качества поверхности детали перед нанесением покрытия;
- оборудование и оснастка;
- подготовка образцов-свидетелей и деталей для нанесения покрытия;
- контроль качества покрытия;
- исправление дефектов;
- требования по технике безопасности.

Технологическая инструкция распространяется на технологический процесс осаждения вакуумного ионно-плазменного покрытия на основе нитрида титана на цапфу КВД, изготавливаемую из титанового сплава. Покрытие наносят на цапфу КВД в модернизированной установке ННВ-6,6-И1-М. Для нанесения покрытия применяют катод из титанового сплава по ГОСТ 9293 [168].

Применение методологии функционального моделирования IDEFO позволила показать реализацию технологического процесса нанесения вакуумного ионно-

плазменного покрытия (см. п. 2.3). Раздел 4 технологической инструкции включает дочерние диаграммы блоков А-0, А-1, А-2, А-3. Технологические режимы ионной очистки и нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия на основе нитрида титана произведены с учетом методики проведения экспериментальных исследований (см. п. 4.1), исследования влияния расположения деталей в вакуумной камере на толщину, микротвердость и фазовый состав вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN (см. п. 4.3). Метрологическая экспертиза чертежа детали «Цапфа КВД» (см. п. 2.1) выявила неполный объем требований в конструкторской документации и позволила разработать перечень свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для нормирования в технических требованиях конструкторской документации. Проведенный анализ по обобщенной схеме установления системных связей в системе «изделие - вакуумное ионно-плазменное покрытие» (см. п. 2.2) и QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия позволили определить перечень технических требований, которые необходимо отразить в технической и нормативной документации для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия (см. глава 3) [169-171].

По результатам проведенных исследований для обеспечения эксплуатационных свойств деталей газотурбинного двигателя необходимо указывать следующие технические требования в нормативной и технической документации:

- толщина покрытий;
- шероховатость поверхности до нанесения покрытий;
- шероховатость покрытий после нанесения;
- микротвердость покрытий;
- материал покрытия;
- технологические режимы обработки;
- адгезия покрытия;
- материал изделия.

Таким образом, технологическая инструкция «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль», включает в се-

бя указанные технические требования, которые в свою очередь обеспечивают эксплуатационные свойства детали «Цапфа КВД».

4.5. Выводы по главе 4

1. С помощью полного факторного эксперимента типа 3^k с двухуровневой вариацией факторов проведен анализ влияния расположения деталей в вакуумной камере на толщину и микротвердость покрытия TiN. Получены уравнения и проведены расчеты для откликов (микротвердость и толщина покрытия TiN) в зависимости от расстояния от катода и оси потока.

2. Проведен комплекс экспериментальных исследований по изучению изменения толщины и микротвердости покрытия TiN в зависимости от расположения деталей в вакуумной камере. Показано, что толщина вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN изменяется в пределах от 36 мкм до 1 мкм. Это связано с неоднородностью плазменного потока и плотности ионного тока при различном расположении деталей относительно катода и оси потока. Микротвердость вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN изменяется в пределах от 39 ГПа до 4 ГПа в зависимости от расположения деталей в вакуумной камере. Снижение микротвердости покрытия связано с уменьшением толщины покрытия при увеличении расстояния от катода.

3. Рентгеноструктурный анализ покрытия TiN, полученного при различных вариантах расположения деталей в вакуумной камере позволил определить фазовый состав покрытия. Установлено, что при взаимодействии титана с азотом образовались следующие фазы: твердый раствор азота в α -Ti с ГПУ решеткой (α -фаза) и монокристалл TiN с ГЦК решеткой (δ -фаза). Содержание фаз Ti и TiN зависит от расположения деталей в вакуумной камере. Содержание TiN уменьшается при увеличении расстояния от катода и изменяется от 95,7% до 100%. Содержание Ti увеличивается при увеличении расстояния от катода и составляет от 0 до 4,3%.

4. Разработана и внедрена в ПАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» технологическая инструкция ТИ 257.009-2017 «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль». Данная инструкция разработана с учетом типового технологического процесса нанесения покрытия TiN, паспорта на модернизированную установку ННВ-6,6-И1-М, результатов проведенных диссертационных исследований, производственного опыта, а также опытных испытаний деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведения метрологической экспертизы действующей конструкторской документации на детали газотурбинного двигателя установлено, что нормирование свойств покрытий основывается на имеющемся опыте и сложившейся производственной практике. В данной документации не нормируются те параметры покрытия, численные значения которых обеспечивают функционирование изделия с покрытием в заданных условиях эксплуатации. При этом при регламентации параметров вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN не учитываются функциональные взаимодействия, существующие в системе «изделие – покрытие». Это в значительной степени усложняет выбор показателей покрытия, необходимых для нормирования в различных видах нормативной и технической документации.

2. В результате проведения комплекса теоретических исследований определена система взаимосвязей между контролируемыми параметрами изделия с вакуумным ионно-плазменным покрытием и свойствами покрытия. Показано, что использование функционально-целевого анализа позволяет установить взаимосвязь между свойствами и функциями каждого отдельного элемента системы «изделие – покрытие» с учетом технологических особенностей нанесения покрытия и этапов его формирования. Построена структурная схема системы «технологический процесс нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия». Разработанный подход является эффективным инструментом для выбора свойств покрытия для регламентации в нормативной и технической документации, необходимых для выполнения функций изделия с покрытием в определенных условиях эксплуатации с учетом условий сборки сборочной единицы сложного агрегата.

3. Разработан алгоритм выбора свойств вакуумного ионно-плазменного покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации. Основу данного алгоритма составляют установленные системные связи между контролируемыми параметрами технологического процесса и

свойствами покрытия, которые необходимы для выполнения функций изделия с покрытием в заданных условиях эксплуатации. Это позволяет осуществить научно обоснованный выбор свойств покрытия для регламентации в нормативной, технической и конструкторской документации.

4. Разработана технологическая инструкция ТИ 257.009-2017 «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль», которая действует в условиях ПАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение». Данная инструкция разработана с учетом результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» для обучения по направлению 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривобоков, В. П. Плазменные покрытия (свойства и применение): учебное пособие / В. П. Кривобоков, Н. С. Сочугов, А. А. Соловьев. – Томск: Изд-во: Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.
2. Мухин, В. С. Современные научные, методологические и производственные проблемы высокотехнологичного машиностроения (на примере авиадвигателестроения): учебное пособие / В. С. Мухин. – Уфа: Изд-во: Уфимский гос. авиац. техн. ун-т, 2014. – 677 с.
3. Безъязычный, В. Ф. Основы обеспечения качества металлических изделий с неорганическими покрытиями: учебное пособие / В. Ф. Безъязычный, В. Ю. Замятин, А. Ю. Замятин, Ю. П. Замятин. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.
4. Мухин, В. С. Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроение): учебник / В. С. Мухин. – Уфа: Изд-во: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2013. – 470 с.
5. Лобанов, М. Л. Защитные покрытия: учебное пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург: Изд-во: Урал. ун-та, 2014. – 200 с.
6. ГОСТ 9.008-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 16 с.
7. ГОСТ 28076-89. Газотермическое напыление. Термины и определения. – М.: Стандартинформ. – 16 с.
8. ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования. – М.: Стандартинформ. – 16 с.
9. ГОСТ 9.303-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору. – М.: Стандартинформ. – 46 с.

10. ГОСТ Р 9.316 – 2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия термодиффузионные цинковые. Общие требования и методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2006. – 13 с.

11. ГОСТ 4.54-79. Система показателей качества продукции. Покрытия полимерные защитные изолирующие локализирующие, дезактивирующие и аккумулярующие. Номенклатура показателей. – М.: Стандартинформ. – 7 с.

12. ГОСТ 4.86-83. Система показателей качества продукции. Покрытия полимерные защитные дезактивируемые. Номенклатура показателей. – М.: Стандартинформ. – 3 с.

13. ГОСТ 4.457-86. Система показателей качества продукции. Линии для химической, электрохимической обработки поверхности и получения покрытий. Номенклатура показателей. – М.: Стандартинформ. – 8 с.

14. ГОСТ Р ИСО 10683-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Изделия крепежные. Неэлектролитические цинк-ламельные покрытия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 14 с.

15. ГОСТ ISO 4042-2015. Межгосударственный стандарт. Изделия крепежные. Электролитические покрытия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

16. ГОСТ 31577-2012. Протезы зубные металлические с защитными покрытиями. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 13 с.

17. ГОСТ Р 57408-2017. Наноматериалы. Нанопокрyтия сверхтвердые и износостойкие. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 10 с.

18. ГОСТ 9.031-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия анодно-окисные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля. – М.: Стандартинформ. – 14 с.

19. ГОСТ 9.304-87. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 11 с.

20. ГОСТ 9.307-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля. – М.: Стандартиформ. – 8 с.

21. ГОСТ 9.315-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия алюминиевые горячие. Общие требования и методы контроля. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 8 с.

22. ГОСТ 27953-88. Покрытия детонационные. Общие требования. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 12 с.

23. ГОСТ 28844-90. Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 11 с.

24. ГОСТ ISO 2081-2017. Металлические и другие неорганические покрытия. Электролитические покрытия цинком с дополнительной обработкой по чугуну и стали. – М.: Стандартиформ, 2018. – 20 с.

25. ГОСТ Р 51163-98. Покрытия термодиффузионные цинковые на крепежных и других мелких изделиях. Общие требования и методы контроля. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 8 с.

26. ГОСТ Р 50575-93. Проволока стальная. Требования к цинковому покрытию и методы испытания покрытия. – М.: Стандартиформ. – 9 с.

27. ГОСТ ISO 10684-2015. Межгосударственный стандарт. Изделия крепежные. Покрытия, нанесенные методом горячего цинкования. – М.: Стандартиформ, 2016. – 24 с.

28. ГОСТ 28302-89. Покрытия газотермические защитные из цинка и алюминия металлических конструкций. Общие требования к типовому технологическому процессу. – М.: Стандартиформ, 2006. – 22 с.

29. ГОСТ Р 57410-2017. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита от коррозии изделий из сплавов цветных металлов методом диффузионной обработки цинком. Общие требования к технологическому процессу. – М.: Стандартиформ, 2017. – 15 с.

30. ГОСТ Р 57411-2017. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита от коррозии изделий из чугуна и стали методом диффузионной обработки

цинком. Общие требования к технологическому процессу. – М.: Стандартиформ, 2017. – 15 с.

31. ГОСТ Р 57419-2017. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита от коррозии металлоизделий из сталей повышенной и высокой прочности методом диффузионной обработки цинком. Общие требования к технологическому процессу. – М.: Стандартиформ, 2017. – 15 с.

32. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартиформ, 2010. – 60 с.

33. ГОСТ 9.005-72. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами. – М.: Стандартиформ, 2008. – 28 с.

34. Трифанов, И. В. Метрологическая экспертиза нормативной документации. Конспект лекций для студентов направления 27.04.01- Стандартизация и метрология всех форм обучения. / И. В. Трифанов, А. А. Снежко, Л. В. Русяева // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sibsau.ru/sveden/edufiles/47542>.

35. Барвинок, В. А. Физическое и математическое моделирование процесса плазмохимического гетерогенного синтеза покрытий из плазменных потоков / В. А. Барвинок, В. И. Богданович // Журнал технической физики. – 2008. - №1, Т.78. – С. 68-73.

36. Клейменов, Ю. А. Единство измерений на службе качества оборонной продукции. Часть 1 / Ю. А. Клейменов // Стандарты и качество. – 2015. - №1(931). – С. 66-71.

37. РМГ 63-2003. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологи-

ческая экспертиза технической документации. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 16 с.

38. ГОСТ 2.701-2008. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М.: Стандартинформ, 2009. – 17 с.

39. Полякова, О. В. Метрологическая экспертиза технической документации (Ч.5) / О. В. Полякова // Главный метролог. – 2010. - №4. – С. 34-39.

40. ГОСТ 8.596 – 2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с.

41. РМГ 29-2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.

42. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.

43. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 27 с.

44. МИ 1317-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров образцов продукции и контроле их параметров. – М.: Стандартинформ, 2004. – 53 с.

45. Правиков, Ю.М. Метрологическая экспертиза рабочих чертежей деталей машин как этап технологической подготовки производства / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина // Вестник УлГТУ. – 2008. - №2. – С. 48-52.

46. Шевченко, М. И. Вопросы метрологического обеспечения испытаний авиационной техники / М. И. Шевченко, Л. Ф. Моисеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т. 16, № 1(2), 2014. – С. 561-565.

47. Мезин, И. Ю. Оценка результативности метрологического обеспечения производства автокомпонентов / И. Ю. Мезин, Е. С. Яковлева // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2009. - №3. – С. 49-52.

48. Полякова, О. В. Метрологическая экспертиза технической документации (Ч.3) / О. В. Полякова // Главный метролог. – 2010. - №2. – С. 41-45.

49. Полякова, О. В. Метрологическая экспертиза технической документации (Ч.4) / О. В. Полякова // Главный метролог. – 2010. - №3. – С. 28-33.

50. Пат. 2570105 Российская Федерация, МПК G01B5/20. Способ контроля формы и положения профиля рабочих лопаток моноколеса. Мингажев А.Д., Янсаитова М.И., Кубышко Л. Н., Сафин Э. В., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «УГАТУ». – №2014120582/28, заявл. 21.05.2014, опубл. 10.12.2015. – 10 с.

51. Криони, Н. К. Контроль формы и положения профиля рабочих лопаток моноколеса газовой турбины / Н. К. Криони, А. В. Новиков, А. Д. Мингажев, Е. А. Наумкин, Э. В. Сафин, М. И. Янсаитова, В. А. Гафарова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2015. - № 4. – С. 255-267.

52. Сысоев, Ю. А. Обеспечение качества вакуумно-дуговых ионно-плазменных покрытий / Сысоев Ю. А. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. - №63. – С. 84-90.

53. Гадалов, В. Н. Оптимизация режимов нанесения ионно-вакуумного покрытия TiN / В. Н. Гадалов, В. Г. Сальников, В. В. Статинов, Т. Н. Розина, А. В. Ляхов и др. // Сварочное производство. – 2012. - №3. – С. 48-50.

54. Будилов, В. В. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов / В. В. Будилов, Н. Н. Коваль, Р. М. Киреев, К. Н. Рамазанов. – М.: Машиностроение, 2013. – 320 с.

55. Будилов, В. В. Математическое моделирование процессов осаждения вакуумных ионно-плазменных покрытий / В. В. Будилов, В. С. Мухин, О. Б. Минаева // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1995. - №1. – С. 92-95.

56. Будилов, В. В. Технология вакуумной ионно-плазменной обработки: учебное пособие / В. В. Будилов, Р. М. Киреев, С. Р. Шехтман. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 155 с.

57. Будилов, В. В. Технологическая наследственность, качество поверхности, точность и эксплуатационные свойства деталей с покрытиями из плазмы вакуумного дугового разряда: монография / В. В. Будилов, В. С. Мухин, И. И. Ягафаров. – М.: Машиностроение, 2015. – 269 с.

58. Будилов, В. В. Оценка точности деталей ГТД при ионно-плазменном нанесении покрытий / В. В. Будилов, Р. М. Киреев, И. И. Ягафаров // Известия вузов. Авиационная техника. – 2012. - №2. – С. 65-68.

59. Мухин, В. С. Технология нанесения вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий Ti-TiN / В. С. Мухин, Р. М. Киреев, С. Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – 2011. – №4(44), Т. 15. – С. 212-214.

60. Шехтман, С. Р. Автоматизация выбора параметров технологического процесса нанесения защитного покрытия / С. Р. Шехтман, А. Р. Исаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. - №1(2), Т. 19. – С. 315-318.

61. Мухин, В. С. Методология создания покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами и технологии их нанесения на лопатки компрессора ГТД / В. С. Мухин, В. В. Будилов, С. Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – 2012. - №5(50), Т. 16. – С. 149-153.

62. Соболев, О. В. О влиянии высоковольтных импульсов на структуру и свойство вакуумно-дуговых покрытий нитрида титана / О. В. Соболев, А. А. Андреев, С. Н. Григорьев, В. Ф. Горбань, М. А. Волосова, С. В. Алешин, В. А. Столбовой // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. - №4(682). – С.43-51.

63. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые наноструктурные TiN покрытия / А. А. Андреев, С. Н. Григорьев, В. Ф. Горбань // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. - №3(11). – С.14 – 17.

64. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Харьков: ННЦХФТИ, 2005. – 236 с.

65. Васильев, В. В. Структура и твердость Ti – N и Ti-Si-N- покрытий, осажденных из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы / В. В. Васильев, А. А. Лучанинов, Е. Н. Решетняк, В. Е. Стрельницкий, Г. Н. Толмачева, М. В. Решетняк // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. - №2. – С. 173-180.

66. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговые сверхтвердые TiN покрытия и их использование для упрочнения инструментов / А. А. Андреев, В. А. Столбовой, И. В. Сердюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. - №2/5(50). – С.65 – 69.

67. Аксенов, И. И. Об условиях синтеза нитридов при конденсации плазменных потоков / И. И. Аксенов, Ю. П. Антуфьев, В. Г. Брень, В. Г. Падалка, А. И. Попов, В. М. Хороших // Физика и химия обработки материалов. – 1981. - №4. – С. 43 – 46.

68. Аксенов, И. И. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы / И. И. Аксенов, В. Г. Брень, В. Г. Падалка, В. М. Хороших // Журнал технической физики. – 1978. – №6 (Т. 48). – С. 1165 – 1169.

69. Тарасенко, Ю. П. Оптимизация технологии нанесения ионно-плазменного покрытия нитрида титана на малогабаритные тонкостенные детали / Тарасенко Ю. П., Кривина Л. А., Царева И. Н., Ильичев В. А. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. - №3 (27). – С.170-174.

70. Коваль, Н. Н. Нанокристаллические покрытия, получаемые вакуумно-дуговым методом с плазменным ассистированием: синтез, структура, характеристика / Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов, О. В. Крысина, В. С. Ложкин, А. Ю. Чумаренко // Обработка металлов. – 2011. - №(52). – С.77-79.

71. Панькин, Н. А. Остаточные напряжения и микротвердость конденсата, полученного вблизи титанового катода при нанесении TiN – покрытий методом

конденсации с ионной бомбардировкой / Н. А. Панькин, Н. А. Смоланов // Прикладная физика. – 2009. - №3. – С. 99-101.

72. Фатхутдинов, Р. А. «Функции-процессы» в управлении конкурентоспособностью / Р. А. Фатхутдинов // Стандарты и качество. – 2008. - №2. – С. 74-78.

73. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: Стандартиформ, 2012. – 16 с.

74. [Электронный ресурс]. URL: https://studme.org/36285/tovarovedenie/tehnologicheskie_protssesy_v_mashinostroenii.

75. Садовский, В. В. Производственные технологии / В. В. Садовский, М. В. Самойлов, Н. П. Кошно. – Минск: БГЭУ, 2008. – 431 с.

76. Докукина, И. А. Методологические принципы выбора состава и разработки технологии нанесения плазменных защитных покрытий / И. А. Докукина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. - №3(2), Т. 11. – С.445-449.

77. Докукина, И. А. Выбор состава и проектирование технологий нанесения плазменных защитных покрытий деталей ГТД / И. А. Докукина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. - №3(34). – С.167-172.

78. Мухин, В. С. Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования / В. С. Мухин, С. Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – 2007. - №1 (19), Т. 9. – С. 84-91.

79. Никитин, М. М. Технология и оборудование вакуумного напыления / М. М. Никитин – М.: Металлургия, 1992. – 112 с.

80. Киреев, Р. М. Обеспечение точности деталей при ионно-плазменном нанесении покрытий / Р. М. Киреев, И. И. Ягафаров // Вестник УГАТУ. – 2012. – №1(46), Т.16. – С. 88-93.

81. Шехтман, С. Р. Технология получения наноструктурированных защитных покрытий / С.Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – 2006. - №1. – С.188-191.

82. Селезнев, А. Е. Разработка и исследование вакуумно-плазменных покрытий для повышения работоспособности разделительных штампов /

А. Е. Селезнев, А. А. Шеин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. - №7 (127). – С. 19-25.

83. Клейменов, Ю. А. Единство измерений на службе качества оборонной продукции. Часть 2 / Ю.А. Клейменов // Стандарты и качество. – 2015. - №2(932). – С. 77-78.

84. Зими́на, Е. В. Метрологическая экспертиза конструкторской документации продукции машиностроения / Е. В. Зими́на, В. Н. Кайнова, В. Г. Кутяйкин // Компетентность. – 2015. - №7 (128). – С. 43-46.

85. Полякова, О. В. Метрологическая экспертиза технической документации (Ч.1) / О. В. Полякова // Главный метролог. – 2009. - №6. – С. 34-40.

86. Полякова, О. В. Метрологическая экспертиза технической документации (Ч.2) / О. В. Полякова // Главный метролог. – 2010. - №1. – С. 35-40.

87. ГОСТ 25346-89. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – М.: Стандартиформ. – 23 с.

88. ГОСТ 25347-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки. – М.: Стандартиформ. – 53 с.

89. Артемьев, Б. Г. Справочное пособие для работников метрологических служб / Б. Г. Артемьев, С. М. Голубев. - М.: Изд-во стандартов, 1990. – 528 с.

90. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 18 с.

91. ГОСТ 8.010-2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 31 с.

92. Янсаитова, М. И. Метрологическое обеспечение элементов технологического процесса покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова // Качество. Инновации. Образование. – 2017. - №5 (144). – С. 27-30.

93. Янсаитова, М. И. Метрологическая экспертиза технической документации, используемой при технологическом процессе покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова, С. Р. Шехтман // Качество и жизнь. – 2017. - № 3(15). – С.63-66.

94. ОСТ 1 00086-73. Соединения зубчатые (шлицевые) эвольвентные. – М.: Стандартиформ. – 8 с.

95. ПИ 1.2.352-87. Термическая обработка деталей и сборочных единиц из сталей конструкционных и коррозионных для самолето-, двигателе- и агрегатостроения. – М.: Стандартиформ. – 66 с.

96. Хубко, В. Теория технических систем / Пер. с нем.- М.: Мир, 1987. – 208 с.

97. Маркелов, В. В. Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Э. Н. Камышная // Надежность и качество сложных систем. – 2014. - №1(5). – С. 35-42.

98. Кириллов, Н.П. Признаки класса и определение понятия «технические системы» / Н.П. Кириллов // Авиакосмическое приборостроение. - 2009. - №8. – С. 1-6.

99. Щербатов, И. А. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы / И. А. Щербатов, О. М. Проталинский // Управление большими системами. Выпуск 45. – С. 30-46.

100. Запорожцев, А. В. Моделирование технических систем / А. В. Запорожцев // Фундаментальные исследования. – 2014. – №8-6. – С. 1288-1294.

101. Кириллов, Н. П. Признаки класса и определение понятия технические системы / Н. П. Кириллов // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. - № 8. – С. 1-6.

102. Юрков, Н. К. Системный подход к организации жизненного цикла сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. - №1. – С. 27-34.

103. Щербатов, И. А. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы / И. А. Щербатов, О. М. Проталинский // Управление большими системами. Выпуск 45. – 2013. – С. 30-46.

104. Алешков, А. В. Перспективах QFD-анализа при разработке инновационной продукции / А. В. Алешков, М. А. Алешкова // Известия иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права) (электронный журнал). - 2015. - Т. 6, № 1.

105. Зайцев, Д. А. Функционально-стоимостной анализ для малой инновационной компании // Иннов: электронный научный журнал, 2012. №3 (12). URL: <http://www.innov.ru/science/economy/statyainvestitsii-i-finansy-1/>.

106. Лебедеко, О. В. Функционально-стоимостной анализ при оценке менеджмента качества / О. В. Лебедеко // Российское предпринимательство. -2010. - № 10 (1). – С. 78-82.

107. Данченко, Е. Б. Функционально-стоимостной анализ в системе организационного проектирования промышленного предприятия / Е. Б. Данченко, Л. С. Чернова // Управління проектами та розвиток виробництва: Зб.наук.пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2010. – № 4(36). – С. 21-33.

108. Верещагина, Л.С. Выявление резервов повышения эффективности деятельности реализационных подразделений промышленных предприятий с использованием функционально-стоимостного анализа / Л. С. Верещагина // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. - № 3 (57). Выпуск 1. – С. 331-336.

109. Шишкина, М. А. Функционально-стоимостной анализ как метод учета и снижения затрат на производство / М. А. Шишкина // Новый университет. Серия «Экономика и право». – 2012. - № 12 (22). – С. 80-83.

110. Елисеев, Т. А. Анализ рисков принятия управленческих решений при использовании экспертных методов оценки надежности / Т. А. Елисеева, Е. В. Плахотникова, С. И. Соловьёв // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2016. - №3 - <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3681>.

111. Мирошников, В.В. Комплексный метод многоуровневого FMEA-анализа в системе менеджмента качества организации / В. В. Мирошников, Н. М. Борбаць, Т. П. Дементьева // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. - №3(35). – С. 121-129

112. Круглов, М. Г. Менеджмент качества в инновационных процессах / Г. М. Круглов // Инновации. – 2006. - №1(88). – С. 50-53.

113. Данилова, Ю. В. Совершенствование процедуры разработки стандартов на металлоизделия формализацией согласования позиций заинтересованных сторон: дис. канд. техн. наук. / Данилова Юлия Владимировна. – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2016. 155 с.

114. Рубин, Г. Ш. Развитие научных основ стандартизации / Г. Ш. Рубин, М. А. Полякова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2014. - №1. – С. 97-101.

115. Рубин, Г. Ш. Стандартизация метизной продукции: особенности, проблемы, перспективы развития / Г. Ш. Рубин, Г. С. Гун, М. А. Полякова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 10. Ч. 2. – С. 27-34.

116. Чукин, В. В. Проблема повышения качества крепежных изделий / В. В. Чукин, В. И. Артюхин, Г. Ш. Рубин, Ф. Т. Вахитова, Е. Н. Гусева // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. - №4. – С. 99-102.

117. Данилова, Ю. В. Поиск консенсуса между потребителем и производителем – важный этап при разработке нормативных документов / Ю. В. Данилова, М. А. Полякова, Г. Ш. Рубин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. - № 2. – С. 79-84.

118. Гун, Г. С. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г. С. Гун, И. Ю. Мезин, Г. Ш. Рубин, А. А. Минаев, А. Б. Назайбеков, Х. Дыя // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2014. - №1. – С. 92-96.

119. Рубин, Г. Ш. Функционально-целевой анализ качества изделий / Г. Ш. Рубин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. - № 2. – С. 29-30.

120. Рубин, Г. Ш. Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий / Рубин Г. Ш., Чукин М. В., Гун Г. С., Полякова М. А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Том 59. №10. – С. 715 – 719.

121. Рубин, Г. Ш. Квалиметрия метизного производства: монография / Г. Ш. Рубин – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2012. – 167 с.

122. Полякова, М. А. Методика определения свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий на основе установления системных связей / М. А. Полякова, М. И. Янсаитова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т.17. - №4. – С. 44–51.

123. Polyakova, M. A. Application of System Analysis for Technological Processes Investigation / M. Polyakova, E. Shiriaeva, M. Iansaitova // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 834. – P. 24-31.

124. Янсаитова, М. И. Повышение качества покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда, на основе разработки показателей, рекомендованных к стандартизации / М. И. Янсаитова, С. Р. Шехтман, М. А. Полякова // Magnitogorsk Rolling Practice 2018: материалы III молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2018. – С. 101-103.

125. Янсаитова, М. И. Функционально-целевой анализ метода нанесения тонких покрытий осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова, М. А. Полякова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2019. - Т.1. – С. 162-163.

126. Янсаитова, М. И. Процедура согласования технических требований к покрытиям, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда, и технических возможностей технологического процесса нанесения покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов

докладов - М.: МАИ. – 2018. – С. 114-116.

127. Черемных, С. В. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С. Ручкин // М.: Финансы и статистика, 2006. – 192 с.

128. ГОСТ Р 50.1.028–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 50 с.

129. Шехтман, С. Р. Управление качеством технологического процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий / С. Р. Шехтман, М. И. Янсаитова // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: сборник тезисов докладов. – М.: МАИ. – 2017. – С. 1246-1247.

130. Янсаитова, М. И. Подход к оценке показателей качества металлоизделий на основе комплексного анализа технологического обеспечения / М. И. Янсаитова, М. А. Полякова, С. Р. Шехтман // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: материалы IV молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019.– С. 123-124.

131. Янсаитова, М. И. Структурно-функциональная модель технологического процесса нанесения покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова // Качество и жизнь. – 2018. - № 1 (17). – С. 46-50.

132. Янсаитова, М. И. Анализ качества технологического процесса нанесения покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова // Мавлютовские чтения: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. - 2015. – Т. 1. - С. 652-654.

133. Шехтман, С. Р. Анализ показателей качества технологического процесса нанесения покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / С. Р. Шехтман, Н. А. Сухова, М. И. Янсаитова // Качество. Инновации. Образование. – 2017. - №1 (140). – С. 40-45.

134. Янсаитова, М. И. Анализ технологического процесса нанесения покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда на основе построения структурно-функциональной модели / М. И. Янсаитова // Избранные научные труды Семнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством» – М.: МАИ. – 2018. – С. 437 – 442.

135. Будилов, В. В. Управление качеством высокоэффективных технологий на основе принципов стандартизации / В. В. Будилов, Н. А. Сухова, М. И. Янсаитова // Управление экономикой: методы, модели, технологии: материалы XV Международной научной конференции. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – 2015. – Т. 1. - С. 26-29.

136. Ковенский, И. М. Металловедение покрытий: Учебник для вузов / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1999. – 296 с.

137. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.

138. Колесник, М. А. Оценка эффективности процессов нанесения тонких пленок на изделия в вакууме с позиции менеджмента качества / М. А. Колесник, Л. Л. Колесник // Электронный журнал [http:// technomag.edu.ru](http://technomag.edu.ru). – 2011. – С. 1-14.

139. Будилов, В. В. Анализ и прогнозирование эксплуатационных повреждений покрытий TiN при воздействии климатических факторов и коррозионно-активных сред / В. В. Будилов, К. Н. Рамазанов, И. И. Ягафаров, С. Х. Даутов, М. И. Янсаитова // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. - №5 (17). – С. 2.

140. Барвинок, В. А. Упрочнение периферии лопаток компрессоров авиационных двигателей с целью предотвращения снижения усталостной прочности после касания о статор / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, Е. А. Ананьева, В. А. Костышев, Л. И. Симма, С. А. Косырев., П. А. Тополянский // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.plasmacentre.ru/file/nashy-public/213.pdf>.

141. Мубояджян, С. А. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД / С. А. Мубояджян, Д. А. Александров, Д. С. Горлов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2011. – С. 3-8.

142. Белоус, В. Я. Повышение коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД путем применения ионно-плазменного покрытия / В. Я. Белоус, А. Д. Жирнов, А. Н. Луценко, С. А. Мубояджян // *Авиационные материалы и технологии*. – 2006. – С. 53-60.

143. Михайлов, А. Н. Особенности полировки лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А. П. Недашковский // *Прогресивні технології і системи машинобудування*. – 2014. - №1(47). – С. 207-212.

144. Тарасенко, Ю. П. Технологические особенности формирования полифункциональных наноструктурированных покрытий нитрида титана для компрессорных лопаток авиационных ГТД / Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева, Е. П. Кочеров, Л. М. Вязовская // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2012. - №3(34). – С. 296-302.

145. Щербаковский, Г. З. Классификация и типологизация как методологические процедуры теоретико-правовых исследований. / Г. З. Щербаковский, С. А. Маркова-Мурашова, О. К. Биктасов, В. В. Ильичев // *Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России*. – 2006. - №1(29). – С. 67-73.

146. Гадышев, В. А. Классификация угроз экономической безопасности предприятия / В. А. Гадышев, О. Г. Поскочинова // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России»*. – 2011. - С. 27-31.

147. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов / С. Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.

148. Кане, М. М. Системы, методы и инструменты менеджмента качества: учебное пособие / М.М. Кане, Б.В. Иванов. – СПб.: Питер, 2008. – 560 с.
149. Литовченко, В. И. Классификация и систематизация терминов / В. И. Литовченко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2006. – С. 156-159.
150. [Электронный ресурс]. URL: <http://lib.chdu.edu.ua/pdf/monograf/4/3.pdf>.
151. Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
152. Янсаитова, М. И. Классификация параметров покрытий, получаемых осаждением из вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова // Мавлютовские чтения: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. - 2015. - Т. 1. – С. 654-655.
153. Янсаитова, М. И. Стандартизация параметров покрытия TiN при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова, С. Р. Шехтман // Современное состояние и перспективы развития научной мысли. Сборник статей международной научно-практической конференции. – Уфа: - 2017. – С. 42-45.
154. Ягафаров, И. И. Технология нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на детали ГТД высокой точности / И. И. Ягафаров, Р. М. Киреев, В. В. Будилов // Наноинженерия. – 2013. - №4 (22). – С. 38-42.
155. Табаков, В. П. Исследование трещиностойкости многослойных покрытий / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. - №6. – С. 7-13.
156. Будилов, В. В. Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов: Физические основы и технические решения / В. В. Будилов, В. С. Мухин, С. Р. Шехтман. – М.: Наука, 2008. – 194 с.
157. Янсаитова, М. И. Факторный анализ зависимости микротвердости и толщины покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда / М. И. Янсаитова, А. Ф. Сафина, С. В. Устюжанина, С. Р. Шехтман // Качество. Инновации. Образование. – 2017. - №3 (142). – С. 38-44.

158. Ямилева, А. М. Факторный анализ 3D-модели упругой стадии процесса линейной сварки трением / А. М. Ямилева // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т.16, №7(52). – С.122-127.

159. Гишваров, А. С. Комплексная оптимизация планов экспериментального исследования характеристик авиационных ГТД / А. С. Гишваров // Известия вузов. Авиационная техника. – 2006. - №1. – С. 22-25.

160. Будилов, В. В. Исследование зависимости микротвердости и фазового состава покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда / Будилов В. В., Ягафаров И. И., Янсаетова М. И. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. - №1 (145). – С. 20-23.

161. Polyakova M. A. Perspectives for development of multioperational technological processes of metal ware manufacturing based on system analysis / M. A. Polyakova, E. N. Shiriaeva, M. Ya. Iansaitova, E. Yu. Bosikova // International Conference “Functional Materials: Predicting properties and manufacturing Technologies” (ICFM-2019) (Perm, April 15-18, 2019). Ed. by V.Yu. Stolbov. / Perm: Publishing house of Perm national research polytechnic university, 2019. – P. 43.

162. Кривина, Л. А. Повышение прочностных и трибологических характеристик металлических деталей пар трения методами ионно-плазменного воздействия: дис. канд. техн. наук. / Кривина Людмила Александровна. - Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) – Филиал Федерального Государственного Бюджетного Научного Учреждения «Федеральный Исследовательский Центр Институт прикладной физики Российской Академии Наук, 2019. 181 с.

163. Афанасьева, Ю. Д. Технология нанесения покрытия Ti-TiN на режущий инструмент / Ю. Д. Афанасьева, С. Р. Шехтман // Вестник УГАТУ. – 2018. - №3 (81), Т.22. – С. 3-9.

164. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий // [Электронный ресурс]. URL: <http://bookfi.net/book/635849>.

165. Вьюнов, С. А. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные

двигатели и энергетические установки» / С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов и др.; под общ. ред. Д.В. Хромина. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

166. Безъязычный, В. Ф. Авиадвигателестроение. Качество, сертификация и лицензирование: учебное пособие / В. Ф. Безъязычный, А. Ю. Замятин, В. Ю. Замятин и др.; Под общ.ред. В. Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2003. – 840 с.

167. ТИ 257.009-2017. «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на Цаффу КВД. Требования к нанесению, контроль». – Уфа, 2017. – 14 с.

168. ГОСТ 9293-74. Азот газообразный и жидкий. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2007. – 17 с.

169. Янсаитова, М. И. Стандартизация и метрологическое обеспечение покрытий, получаемых осаждением из вакуумных дуг / М. И. Янсаитова, С. Р. Шехтман // НАУКА - ПРОИЗВОДСТВУ. Ежегодный научно-технический сборник. Под общей редакцией В.Л. Юрьева. – Уфа. – 2014. – С. 204-207.

170. Янсаитова, М. И. Разработка и обоснование параметров покрытия TiN при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда, рекомендуемых к стандартизации / М. И. Янсаитова, С. Р. Шехтман // Избранные научные труды Шестнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – М.: МАИ. – 2017. – С. 404-408.

171. Полякова, М. А. Разработка подхода к выбору свойств покрытий для нормирования в нормативной и технической документации / М.А. Полякова, М. И. Янсаитова // Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний. Сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рудненского индустриального института. – Рудный: Рудненский индустриальный институт, 2019. - С. 447-456.

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия														
	Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**
Износостойкость	5	3	2	3	1	3	3	3	1	1	3	2	3	1
Коррозионная стойкость	4	2	3	3	1	3	3	2	3	2	3	2	3	1
Эрозионная стойкость	4	2	2	3	1	3	3	1	1	2	3	2	3	1
Теплостойкость	3	2	3	3	1	3	3	1	1	1	3	2	1	1
Термостойкость	2	2	3	3	1	3	3	1	1	1	3	2	1	1
Трещиностойкость	2	1	3	3	1	3	3	1	1	1	3	2	1	1
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, балл		43	51	60	20	60	60	34	28	28	60	40	46	20
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия, %		7,8	9,3	10,9	3,6	10,9	10,9	6,2	5,1	5,1	10,9	7,3	8,4	3,6
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		7	5	1-4	12-13	1-4	1-4	9	10-11	10-11	1-4	8	6	12-13

Рисунок П1.1 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (1 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия														
	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	5	2	1	3	2	3	3	3	3	3	2	3	2	2
Коррозионная стойкость	3	1	1	3	1	3	1	3	1	2	3	2	2	2
Эрозионная стойкость	3	3	1	3	2	3	3	1	3	1	2	3	2	2
Теплостойкость	1	3	3	3	3	3	1	1	3	1	2	2	2	2
Термостойкость	1	3	3	3	3	3	1	1	3	1	2	2	2	2
Трещиностойкость	1	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	2	2
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		31	20	42	27	42	32	26	42	26	28	39	28	28
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		7,5	4,9	10,2	6,6	10,2	7,8	6,3	10,2	6,3	6,8	9,5	6,8	6,8
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		6	13	1-3	10	1-3	5	11-12	1-3	11-12	7-9	4	7-9	7-9

Рисунок П1.2 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (2 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия	Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия													
	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	5	1	3	3	1	3	3	3	2	2	3	2	3	2
Коррозионная стойкость	5	1	3	3	1	2	3	2	3	2	3	2	2	2
Эрозионная стойкость	5	2	3	3	1	3	3	3	3	2	3	2	3	2
Теплостойкость	3	1	3	3	1	3	2	2	3	2	3	2	2	2
Термостойкость	3	1	3	3	1	3	2	2	3	2	3	2	2	2
Трещиностойкость	5	2	3	3	1	3	3	3	3	3	3	2	3	3
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		36	78	78	26	73	72	67	73	57	78	52	67	57
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		4,4	9,6	9,6	3,2	9,0	8,8	8,2	9,0	7,0	9,6	6,4	8,2	7,0
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		12	1-3	1-3	13	4-5	6	7-8	4-5	9-10	1-3	11	7-8	9-10

Рисунок П1.3 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (3 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия	Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия													
	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	5	3	2	3	1	2	3	3	3	3	3	2	2	1
Коррозионная стойкость	5	3	2	3	1	2	3	3	3	3	3	2	2	1
Эрозионная стойкость	5	3	2	3	1	2	3	1	3	3	3	2	2	1
Теплостойкость	2	1	1	3	1	1	1	1	3	1	3	2	2	1
Термостойкость	4	1	1	3	1	1	1	1	3	1	3	2	2	1
Трещиностойкость	3	1	1	3	1	1	1	1	3	1	3	2	2	1
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		54	39	72	24	39	54	44	72	54	72	48	48	24
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		8,4	6,1	11,2	3,7	6,1	8,4	6,8	11,2	8,4	11,2	7,5	7,5	3,7
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		4-6	10-11	1-3	12-13	10-11	4-6	9	1-3	4-6	1-3	7-8	7-8	12-13

Рисунок П1.4 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (4 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия														
	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	5	1	1	3	1	3	1	3	1	1	1	1	3	1
Коррозионная стойкость	1	1	3	3	1	3	1	1	1	3	1	1	3	1
Эрозионная стойкость	2	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Теплостойкость	3	1	3	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1
Термостойкость	2	1	2	2	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Трещиностойкость	4	1	2	1	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		17	31	41	17	43	25	27	23	19	25	17	29	17
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		5,1	9,4	12,4	5,1	13,0	7,6	8,2	5,7	7,6	6,9	5,1	8,8	5,1
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		10-13	3	2	10-13	1	6-7	5	9	6-7	8	10-13	4	10-13

Рисунок П1.5 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (5 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия														
	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	5	3	2	3	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2
Коррозионная стойкость	3	2	3	3	1	3	3	3	3	1	3	2	2	2
Эрозионная стойкость	3	3	2	3	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2
Теплостойкость	2	2	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	2	2
Термостойкость	2	2	3	3	1	3	3	2	3	1	3	2	2	2
Трещиностойкость	3	2	2	3	1	3	3	3	3	1	3	2	2	2
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		44	43	54	18	54	54	50	54	34	54	36	36	36
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		7,8	7,6	9,5	3,2	9,5	9,5	8,8	9,5	6,0	9,5	6,3	6,3	6,3
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		7	8	1-5	13	1-5	1-5	6	1-5	12	1-5	9-11	9-11	9-11

Рисунок П1.6 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (6 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия	Весомость													
		Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	5	1	3	3	1	1	3	3	2	3	3	2	3	2
Коррозионная стойкость	5	1	1	3	1	3	3	2	3	3	3	2	3	3
Эрозионная стойкость	5	1	3	3	1	1	3	3	2	3	3	2	3	2
Теплостойкость	2	1	2	1	2	2	1	1	3	1	2	1	1	1
Термостойкость	4	1	2	2	3	2	1	1	2	1	2	1	1	1
Трещиностойкость	3	1	1	2	1	3	2	2	1	2	2	2	2	2
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		24	50	61	34	46	57	52	52	57	63	42	57	47
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		3,7	7,8	9,5	5,3	7,2	8,9	8,1	8,1	8,9	9,8	6,5	8,9	7,3
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		13	8	2	12	10	3-5	6-7	6-7	3-5	1	11	3-5	9

Рисунок П1.7 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (7 эксперт)

Технические требования для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия	Требования к функциональным свойствам вакуумного ионно-плазменного покрытия													
	Весомость	Геометрические размеры до нанесения покрытия	Материал изделия	Материал покрытия	Масса изделия с покрытием	Толщина покрытия	Адгезия покрытия	Микротвердость покрытия	Шероховатость покрытия	Пористость покрытия	Технологические режимы обработки*	Расположение изделий в вакуумной камере	Вид подготовки поверхности изделия**	Исходные показатели поверхности***
Износостойкость	3	3	3	3	1	2	3	3	2	3	2	2	2	2
Коррозионная стойкость	4	2	2	3	1	3	3	2	3	3	3	3	2	2
Эрозионная стойкость	5	2	2	3	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2
Теплостойкость	5	2	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2
Термостойкость	5	2	3	3	2	2	3	2	3	2	3	2	2	2
Трещиностойкость	4	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2
Важность технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		55	69	74	45	61	78	60	71	59	61	56	52	52
Удельный вес технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		6,9	8,7	9,3	5,7	7,7	9,8	7,6	9,0	7,4	7,7	7,1	6,6	6,6
Ранг технических требований для реализации технологического процесса нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия		10	4	2	13	5-6	1	7	3	8	5-6	9	11-12	11-12

Рисунок П1.8 - QFD-анализ для вакуумного ионно-плазменного покрытия (8 эксперт)

Экз. № 1

Публичное акционерное общество
«Уфимское моторостроительное производственное объединение»



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ИНСТРУКЦИЯ

ТИ 257.009-2017

**ВАКУУМНОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ
ПОКРЫТИЕ TIN НА ЦАПФУ КВД**

Требования к нанесению, контроль

Уфа
2017

	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
				Дата

**Лист регистрации ознакомившихся с содержанием
ТИ 257.009-2017**

Ознакомиться с содержанием ТИ

_____ кому (устанавливается руководителем подразделения)

Срок _____

(устанавливается руководителем подразделения)

руководитель подразделения

подпись, дата

.и.о. фамилия

С ТИ ознакомлены:

Фамилия, и. о.	Должность	Подпись	Дата

	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
				Дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

**Публичное акционерное общество
«Уфимское моторостроительное производственное объединение»**



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ИНСТРУКЦИЯ**

ТИ 257.009-2017

**ВАКУУМНОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ
ПОКРЫТИЕ TIN НА ЦАПФУ КВД**

Требования к нанесению, контроль

Инов. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	Подпись и дата

**Уфа
2017**

ТИ 257.009-2017 С. II

Предисловие

1 РАЗРАБОТАНА кафедрой технологии машиностроения УГАТУ.

2 УТВЕРЖДЕНА И ВВЕДЕНА В ДЕЙСТВИЕ главным сварщиком ПАО «УМПО» от “27” апреля 2017 г.

3 Технологическая инструкция разработана с учетом типового технологического процесса нанесения покрытия TiN, паспорта на модернизированную установку ННВ-6,6-И1-М, результатов научно-исследовательских работ, производственного опыта, а также опытных испытаний деталей.

4 ВВЕДЕНА ВПЕРВЫЕ.

5 РАССЫЛКА: подразделениям объединения в соответствии с перечнем рассылки ОГС.

		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

ТИ 257.009-2017 С. III

Содержание

1	Область применения.....	1
2	Нормативные ссылки.....	2
3	Обозначения и сокращения.....	2
4	Требования к нанесению покрытия.....	3
5	Контроль качества поверхности детали перед нанесением покрытия	4
6	Оборудование и оснастка.....	4
7	Подготовка образцов-свидетелей и деталей для нанесения покрытия	5
8	Контроль качества покрытия.....	5
9	Исправление дефектов.....	6
10	Требования по технике безопасности.....	6
	Лист регистрации изменений.....	9

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

УТВЕРЖДАЮ
Главный сварщик

С.Х. Даутов
С.Х. Даутов
"21" 07 2017г.
Уфимское
материальное
Публичное
Общество
с ограниченной
ответственностью
с/о

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ

**ВАКУУМНОЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ
ПОКРЫТИЕ TiN НА ЦАПФУ КВД**
Требования к нанесению, контроль

ТИ 257.009 -2017

Введена впервые

Дата введения 2017 - 04 - 27

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взам инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата
--------------	----------------	-------------	--------------	----------------

1 Область применения

Настоящая инструкция распространяется на технологический процесс осаждения вакуумного ионно-плазменного покрытия на основе нитрида титана на цапфу КВД (далее – детали), изготавливаемую из титанового сплава.

		Дата
		Подп.
		№ докум.
		Лист
		Изм.

2 Нормативные ссылки

В настоящей инструкции использованы ссылки на следующие документы:

- ГОСТ 5007-2014 Изделия трикотажные перчаточные. Общие технические условия.
 ГОСТ 9293-74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия.
 ГОСТ 25706-83 Лупы. Типы, основные параметры. Общие технические требования.
 ГОСТ 2603-79 Реактивы. Ацетон. Технические условия.
 ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
 ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.
 ГОСТ 12.3.002-2014 Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности.
 ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования.

3 Обозначения и сокращения

В настоящей инструкции применены следующие обозначения и сокращения:

- ГОСТ – межгосударственный стандарт
 ТИ – технологическая инструкция
 ТТ – технические требования
 ТП – технологический процесс
 ТУ – технические условия
 УГАТУ – Уфимский государственный авиационный технический университет
 ПАО «УМПО» – открытое акционерное общество «Уфимское моторостроительное производственное объединение»
 ОГС – отдел главного сварщика
 ОКСС – отдел качества, стандартизации, сертификации
 ТБН – технологическое бюро напыления
 Инв. – инвентарный
 Кат. – категории
 Экз. – экземпляры

	Подпись и дата
	Инов. № дубл.
	Взам. инв. №
	Подпись и дата
Инв. № подл.	

4 Требования к нанесению покрытия

4.1 Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN (далее – покрытие) наносят на шлицы детали согласно ТТ чертежа.

4.2 Покрытие наносят на детали в модернизированной установке ННВ-6,6-И1-М.

4.3 Для нанесения покрытия применяют катод из титанового сплава по ГОСТ 9293.

4.4 Перед нанесением необходимо проводить обезжиривание:

- работу производят в вытяжном шкафу в чистых резиновых перчатках по ГОСТ 5007;

- промывают детали и образцы в нефрасе в течение 20-40 минут;

- протирают детали и образцы чистой белой хлопчатобумажной салфеткой, смоченной в спирте;

- промывают детали в ацетоне многократным погружением деталей в ванну с ацетоном по ГОСТ 2603 в течение 15-20 минут. Качество промывки контролируют по разрыву стекающей пленки. Несплошность пленки ацетона не допускается. На деталях не допускаются следы подтеков и разводов;

- просушивают детали в вытяжном шкафу в течение 15-20 минут.

4.5 Перед нанесением покрытия проводят ионную очистку по режиму:

- давление $4 \cdot 10^{-2}$ Па;

- опорное напряжение 800 В;

- ток магнитной катушки 0,4 А;

- ток дуги для дуговых испарителей 80 А;

- ток фокусировки 0,2 А;

- ток стабилизации 0,8 А;

- время очистки 55-60 секунд.

4.6 Нанесение покрытия производят по режиму:

- давление $1 \cdot 10^{-1}$ Па;

- опорное напряжение 160 В;

- ток магнитной катушки 0,4 А;

- ток дуги для дуговых испарителей 80-100 А;

- ток фокусировки 0,2 А;

- ток стабилизации 0,8 А;

- время обработки 19-20 минут.

4.7 Охлаждение деталей после окончания процесса нанесения покрытия производят в камере не менее 180 минут.

4.8 Толщина покрытия устанавливается чертежом и обеспечивается технологией нанесения покрытия.

			Изм.	Дата
			Лист	
			№ докум.	
			Подп.	

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Индв. № дубл.	Подпись и дата

5 Контроль качества поверхности детали перед нанесением покрытия

Перед нанесением покрытия детали проверить:

- визуально на отсутствие механических повреждений (забоины, вмятин, трещины, грубые риски и другие);
- наличие и количество образцов – к детали прикладывается три образца (для контроля прочности сцепления) и три образца (для контроля толщины);
- отсутствие загрязнений, краски, масла, следов подтеков засорения отверстий и внутренних полостей не допускается.

6 Оборудование и оснастка

6.1 Для операций по нанесению покрытий на поверхности деталей, применяют оборудование, приведенное в таблице 1.

Т а б л и ц а 1- Перечень применяемого оборудования

Наименование	Тип, модель	Назначение
Модернизированная вакуумная ионно-плазменная установка	ННВ-6,6-И1-М	Нанесения карбидов и нитридов металлов
Шкаф вытяжной	Любой: 1000x1000x1000	Для очистки поверхности с помощью ЛВЖ
Сушильный шкаф	СНОЛ 2,5/2,5	Для сушки поверхности

6.2 Оснастка должна обеспечивать:

- надежное крепление деталей и образцов-свидетелей в процессе нанесения покрытия;
- положение деталей относительно катода для равномерного распределения толщины покрытия по поверхности детали;
- одинаковое положение образцов-свидетелей и деталей относительно катода.

6.3 Все работы по подготовке, выгрузке и контролю покрытия выполняются в чистых хлопчатобумажных перчатках по ГОСТ 5007.

Им.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Инв. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

7 Подготовка образцов-свидетелей и деталей для нанесения покрытия

Перед нанесением покрытия детали и образцы-свидетели должны пройти все предшествующие операции по технологическому процессу. Образцы-свидетели должны быть изготовлены из материала идентичного деталям.

8 Контроль качества покрытия

8.1 Контроль качества покрытия производят в соответствии с требованиями чертежа, настоящей инструкции и утвержденного технологического процесса.

8.2 Для обеспечения качества покрытия применяют следующие виды контроля:

- контроль своевременного проведения регламентных работ, технологического обслуживания и проверок оборудования (ф.257.0946), согласно инструкции на их эксплуатацию;
- контроль за соблюдением стабильности режимов проверяют по приборам в процессе напыления;
- внешний осмотр лупой ГОСТ 25706-83 с увеличением до 7 крат подвергается 100% площади покрытия после напыления. Проверить детали внешним осмотром качество покрытия и внешний вид нанесенного покрытия, отсутствие сколов, трещин, шелушения, отслаивания покрытия, вздутий, несплошностей покрытия на поверхности шлиц.

Покрытие перед осмотром должно быть обдуто сухим сжатым воздухом.

8.3 Измерение толщины покрытия проводят аттестованным измерительным инструментом. Контроль толщины покрытия проводится на образцах-свидетелях с помощью металлографического микроскопа на шлифах (допускается использование других приборов для замера толщины).

8.4 Контроль микротвердости проводится на образцах - свидетелях на аттестованном приборе. Форма и размер образцов приведен в паспорте модернизированной установки ННВ-6,6-И1-М (допускается использование других приборов для замера микротвердости).

8.5 Контроль прочности сцепления проводится на образцах-свидетелях из материала идентичного основе $h = 0,8 - 1,2$ мм, $b = 10$ мм, $l = 100$ мм. Контроль прочности сцепления проводят изгибом образца под углом 90 ± 5 град, с радиусом $R \leq 11$ мм.

Отслоений и сколов не допускается. Допускается микротрещины вдоль изгиба образцов.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Ив. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	Подпись и дата

Примечание - При отсутствии листового материала идентичного основе, поставляемого промышленностью, выбор материала образцов производят по ТП.

9 Исправление дефектов

9.1 Детали с дефектами покрытия, подлежащие исправлению, должны быть предъявлены до и после исправления работникам ОГС, уполномоченным за качество данных работ.

9.2 Все работы, проводимые по исправлению дефектов покрытия, должны отражаться в соответствующей документации (например, в карте устранения дефектов и т.п.).

9.3 В случае недостаточной толщины покрытия разрешается проводить повторное напыление по основному режиму при условии, если перерыв в напылении не превышает 30 минут. Местное напыление повторно проводить не допускается.

9.4 Покрытие, нанесенное на поверхность не подлежащую напылению, удаляют механическим способом путем зачистки, не нарушая требований чертежа по толщине и чистоте обработки детали.

9.5 Сколы шириной до 2 мм по краям напыленного слоя, образовавшиеся в результате механического воздействия и не связанные с качеством покрытия, зачищают механическим способом с плавным переходом.

9.6 В случае образования сетки трещин, вспучивания и отслоения покрытия, последнее вместе с подслоем должно быть полностью удалено механическим или химическим способом, после чего следует напыление по утвержденному ТП.

В случае невозможности удаления подслоя разрешается повторное напыление не более двух раз с предварительным опескоструиванием и напылением подслоя толщиной не более 0,1 мм.

10 Требования по технике безопасности

10.1 Все требования по технике безопасности труда и промышленной санитарии должны выполняться в соответствии с установленными правилами безопасности труда при плазменном напылении.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Изм. № подл.	Подпись и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подпись и дата

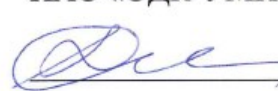


Публичное акционерное общество «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ПАО «ОДК-УМПО») ул. Ферина, 2, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, 450039
Телетайп/телекс: 162340, «RICA RU», тел.: +7 (347) 238-33-66, 238-18-63, факс: +7 (347) 238-37-44, http://www.umpo.ru, e-mail: umpo@umpo.ru
СГРН 1020202388359, ИНН 0273008320, КПП 027301001

28.05.2019 № 257.062-2019
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Главный сварщик
ПАО «ОДК-УМПО»

 С.Х. Даутов



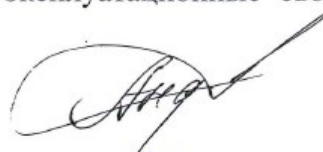
Акт
о внедрении
результатов диссертационной работы
Янсаитовой Миляуши Исмагиловны

Научные результаты диссертационной работы Янсаитовой Миляуши Исмагиловны внедрены в ПАО «ОДК-УМПО» в виде технологической инструкции на технологический процесс осаждения вакуумного ионно-плазменного покрытия на основе нитрида титана на цапфу компрессора высокого давления.

Разработанная технологическая инструкция состоит из следующих разделов: область применения, нормативные ссылки, требования к нанесению покрытия, контроль качества поверхности детали перед нанесением покрытия, оборудование и оснастка, подготовка образцов-свидетелей и деталей для нанесения покрытия, контроль качества покрытия, исправление дефектов и требования по технике безопасности.


На основании проведенных в диссертационной работе М.И. Янсаитовой исследований в технологическую инструкцию «Вакуумное ионно-плазменное покрытие TiN на цапфу КВД. Требования к нанесению, контроль» включены показатели качества вакуумного ионно-плазменного покрытия, режимы ионной очистки и нанесения покрытия на модернизированной вакуумной ионно-плазменной установке ННВ-6,6-И1-М. Требования, указанные в технологической инструкции, позволяют обеспечить необходимые эксплуатационные свойства деталей газотурбинных двигателей.

Начальник ТБН ОГС



М.С. Андреев

Инженер-технолог ОГС

 13.05.19

Н.Н. Сунагатуллин



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по УМР
ФГБОУ ВО «УГАТУ»

Ю.В. Рахманова

13.05.2019

Акт

об использовании в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
результатов диссертационной работы
Янсаитовой Миляуши Исмагиловны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Янсаитовой Миляуши Исмагиловны используются в учебном процессе студентов, обучающихся по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» на кафедре «Технология машиностроения» при изучении курса «Технология и оборудование высокоэффективных методов обработки».

Обучающиеся используют полученные в диссертационной работе М.И. Янсаитовой результаты для проведения цикла научно-исследовательских работ, выполнении курсовых проектов, выпускных квалификационных работ. Системный анализ технологического процесса ионно-плазменного нанесения покрытий, разработанная методика функционально-целевого анализа технологического процесса нанесения ионно-плазменных покрытий демонстрируют обучающимся сущность комплексного анализа технологического процесса, что является теоретической основой для выбора показателей качества покрытия. Данные результаты являются примером установления межпредметных связей как основы современных методов обучения в высшей школе.

Рассмотренные в диссертационной работе вопросы метрологического обеспечения технологической документации демонстрируют обучающимся связь теории и практики работ в области стандартизации, а также возможности использования результатов теоретических исследований для решения конкретных практических задач.

Использование результатов диссертационной работы М.И. Янсаитовой в учебный процесс позволяет расширить и углубить знания обучающихся в области практической стандартизации.

Зам. зав. кафедрой «Технология машиностроения»,
канд. техн. наук, доцент

Р.М. Янбухтин