

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ОБОРОНЫ «АЛМАЗ – АНТЕЙ» ИМ. АКАДЕМИКА В.П. ЕФРЕМОВА»

На правах рукописи



Ефремов Андрей Николаевич

**МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА
КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 2.5.22 – Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
Юдин Сергей Владимирович

Москва – 2026

	Стр.
Введение.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	10
1.1. Требования к организации контроля качества в авиационной промышленности	10
1.2. Методы оценки качества комплектующих изделий авиационной промышленности	12
1.3. Методы нанесения защитных покрытий на комплектующие изделия в авиационной промышленности	15
1.4. Анализ отказов и причин появления отказов комплектующих изделий авиационной промышленности.....	18
1.5. Выводы по ГЛАВЕ 1	27
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	29
2.1. Требования к качеству анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.....	29
2.2. Свойства покрытий и условия анодирования, оказывающие влияние на параметры качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.....	37
2.3. Оценка существующих методов прогнозирования параметров качества покрытий на основе методов статистического анализа	41
2.4. Определение дополнительных параметров качества, влияющих на работоспособность комплектующих изделий авиационной промышленности при эксплуатации.....	43
2.5. Выводы по ГЛАВЕ 2	45

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	46
3.1. Архитектура математической модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.....	46
3.2. Определение исходных данных для моделирования свойств и параметров качества.....	52
3.3. Математические модели свойств анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах.....	61
3.4. Математическая модель прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.....	71
3.5. Выводы по ГЛАВЕ 3	77
ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РЕАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	78
4.1. Методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий	78
4.2. Алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности	88
4.3. Реорганизация процесса контроля качества на производственном участке.....	103
4.4. Предложения и рекомендации по использованию модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.....	105
4.5. Выводы по ГЛАВЕ 4	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	121

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях авиационная промышленность является одной из наукоемких отраслей экономики, способной оказать существенное влияние на темпы инновационного развития, достижение стабильного экономического роста нашей страны. Предприятия авиационной промышленности функционируют в условиях усиления конкуренции, это предполагает повышение требований к качеству применяемых при производстве материалов и изготовленных из них комплектующих, которые влияют на надежность и качество финального изделия. Особенно это проявляется в качестве комплектующих, где важна их износостойкость в процессе эксплуатации – детали авиационных двигателей, винтов, элементов обшивки корпуса самолета, топливных баков, различных нагреваемых элементов.

Комплектующие финального изделия при эксплуатации работают в различных средах (влажный воздух, водные растворы, смазочные масла, кислоты, щелочи и др.), при различных температурах и давлениях. Вследствие воздействия этих факторов внешней среды, а также взаимодействия с сопрягаемыми деталями в процессе эксплуатации их поверхностные слои подвергаются наибольшим нагрузкам. По данным Межгосударственного авиационного комитета (МАК), в гражданской авиации государств-участников межгосударственного Соглашения о гражданской авиации в период с 2007 по 2024 г. произошло 473 авиационных происшествия, из них 73 – из-за отказа или повреждения двигателя. Анализ основных причин авиационных происшествий, произошедших из-за неисправности двигателя, показал, что в 40% случаев преобладающими причинами повреждения двигателя являются прочностные и функциональные отказы. Поэтому качество защитных покрытий комплектующих финального изделия наряду с прочностными характеристиками основного материала является определяющим критерием их долговечности при различных условиях эксплуатации.

Благодаря комплексу технически ценных свойств в авиационной промышленности наибольшее распространение получили неупрочняемые деформируемые сплавы алюминия. Однако введение легирующих добавок в состав данных сплавов ухудшает их коррозионные свойства, поэтому комплектующие из алюминиевых сплавов нуждаются в дополнительной защите для обеспечения качества и надежности финальных изделий в процессе эксплуатации.

В настоящее время процесс контроля качества комплектующих финальных изделий в авиационной промышленности осуществляется на финальном этапе изготовления. Такой метод контроля не улучшает их качество, а только позволяет выявить дефектные комплектующие. Поэтому необходимо обеспечить контроль всех этапов производственного процесса для проведения своевременной реорганизации, направленной на обеспечение заданного качества производимой продукции. Существующая в производственном процессе система предупредительного контроля, включающая входной контроль, комплекс методов неразрушающего контроля и другие методы, является достаточно трудоемкой, позволяет контролировать параметры качества, определенные в технической документации, и не учитывает параметры, оказывающие влияние на работоспособность комплектующих финального изделия в процессе эксплуатации.

Данный аспект обуславливает актуальность создания научно-технических решений для повышения эффективности производственных процессов по изготовлению комплектующих изделий в авиационной промышленности на основе объединения основных параметров качества, регламентированных технической документацией, и дополнительных параметров качества, оказывающих влияние на работоспособность финального изделия в процессе эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования:

Проблемы управления, контроля и оценки качества применительно к различным видам продукции рассматривались во многих научных исследованиях.

Разработкам методов оптимизации, математических и информационных моделей состояния и динамики качества различных объектов посвящены работы

Омельченко И.Н., Дроговоза П.А., Бойцова Б.В., Васильева В.А., Васина С.А., Козловского В.Н., Червякова Л.М. и др.

На разработку и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов ориентированы исследования Г.Г. Азгальдова, В.П. Беспалько, А.Г. Варжапетяна, В.Н. Васильева, А.В. Гличева, В.М. Кларина, Г.И. Коршунова, В.И. Круглова, В.М. Кутузова, В.А. Липатникова, Л.С. Лисицыной, Н.Н. Рожкова, С.А. Степанова, И.В. Степанова, В.С. Соболева, А.И. Субетто, М.Е. Ставровского, Е.Г. Семеновой, В.М. Соколова, В.Н. Тисенко, Ю.Г. Татура, В.К. Федюкина, А.А. Шехонина, и др., а также труды зарубежных ученых Б. Блума, У.Э. Деминга, Дж. Харрингтона и др.

Цель работы заключается в повышении качества изделий на основе применения разработанных моделей прогнозирования качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

Объектом исследования является производственный процесс нанесения анодно-окисных покрытий на комплектующие изделий авиационной промышленности.

Предмет исследований – процесс прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

Область исследований диссертации соответствует пунктам 1 и 9 паспорта специальности 2.5.22:

1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики качества объектов.

9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих моделей организации процессов контроля и методов оценки качества изделий авиационной промышленности.

2. Провести анализ отказов изделий авиационной промышленности в процессе эксплуатации.

3. Определить параметры качества комплектующих изделий авиационной промышленности, оказывающих влияние на работоспособность изделий в процессе эксплуатации.

4. Разработать модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности.

5. Разработать и внедрить методику и алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности.

6. Разработать предложения и рекомендации по использованию модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности.

Научная новизна работы:

1. Модель прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, отличающаяся от существующих моделей тем, что включает дополнительные параметры качества: теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость.

2. Метод прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, включающий модели, методику и алгоритм прогнозирования параметров качества, учитывающие условия эксплуатации комплектующих изделий авиационной промышленности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модели прогнозирования параметров качества, учитывающие дополнительные параметры качества в зависимости от условий эксплуатации комплектующих изделий авиационной промышленности и не регламентированные нормативно-технической документацией, и позволяющие обеспечить требуемые характеристики работоспособности изделий в процессе эксплуатации.

2. Методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий, которая позволяет повысить качество финальных изделий авиационной промышленности.

3. Алгоритм прогнозирования параметров качества, позволяющий повысить эффективность процесса контроля качества за счет сокращения времени

и числа контрольных операций в процессе производства комплектующих изделий авиационной промышленности.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности, позволяющих обеспечить требуемые характеристики работоспособности комплектующих в процессе эксплуатации.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке методики и алгоритма прогнозирования качества комплектующих, определяющих работоспособность изделия в процессе эксплуатации и позволяющих повысить качество изделий авиационной промышленности.

Методология и методы исследования:

Теоретические исследования в диссертационной работе основаны на положениях теории организации производства, бережливого производства, сравнительного анализа и математического моделирования производственных процессов с использованием систем автоматизированного проектирования.

В работе использованы методы статистического анализа, модельно-ориентированного системного инжиниринга, теории вероятности и математической статистики и методы математического моделирования.

Степень достоверности и апробация результатов:

Достоверность результатов исследования подтверждается современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в работе научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на значительном объеме фактических данных, полученных в реальных производственных условиях. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждена апробацией и результатами практической реализации результатов работы. Результаты работы использованы ПАО «Машиностроительный завод

имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» в организации производственного процесса.

Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, представлялись и обсуждались на следующих научно-практических конференциях: III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2022); VII научно-техническая конференция «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО» (Москва, 2022); X Международная научно-практическая конференция «Fundamental Science and Technology» (Уфа, 2022); IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2023); Конференция «Радионавигация и время – 2023» (Санкт-Петербург, 2023); Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества» (Тула, 2023); V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2024).

Публикации:

Основное положение работы отражено в 14 научных трудах, общим объемом 8,91 п.л. (из них 8,58 авторские), в том числе в журналах, рекомендованных ВАК РФ – 6 [1-5, 10], 5 из которых по специальности 2.5.22, 7 статей в материалах научных конференций [6-8, 11-14].

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, списка литературы из 104 наименований. Диссертация содержит 120 страниц основного текста, 24 рисунка, 13 таблиц.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1. Модели организации процессов контроля качества в авиационной промышленности

Авиационная промышленность характеризуется высочайшими требованиями к безопасности и надежности, что предопределяет необходимость существования строгих и комплексных моделей контроля качества. Эти модели эволюционировали от простого выявления дефектов к интегрированным, превентивным системам, охватывающим весь жизненный цикл продукции. В российской практике наблюдается синтез унаследованных robust-подходов (таких, как система военной приемки) и современных международных стандартов.

Фундаментальной моделью организации контроля качества является внедрение требований стандарта ГОСТ Р ЕН 9100-2011 [1] (российский аналог международного стандарта AS9100). С 2020 г. этот стандарт был заменен ГОСТ Р 58876-2020 [2]. В обоих стандартах модель предполагает переход от контроля продукции к управлению процессами. Дополнительные требования нового стандарта рассмотрены в работе М.Л. Рахманова [3].

Суть модели заключается в том, что она предписывает создание системы менеджмента качества (СМК), где каждый процесс – от проектирования до послепродажного обслуживания – регламентирован, измерим и непрерывно улучшается. Ключевыми элементами являются управление рисками, прослеживаемость (traceability) и контроль изменений (configuration management).

Так, внедрение данной модели в холдинге «Вертолеты России» позволило структурировать взаимодействие с поставщиками, унифицировать процессы и повысить прозрачность производства. Акцент сместился с финального контроля на предупреждение возникновения несоответствий.

Как отмечается в исследовании М.Ю. Горячевой и Ю.Г. Малахова [4], успешное внедрение стандарта [2] требует глубокой трансформации корпоративной культуры и является стратегическим решением, а не формальным получением сертификата. Авторы подчеркивают, что эта модель служит основой для интеграции других, более специализированных методов контроля.

Важной частью системы управления качеством в последние годы является модель «Бережливого производства» (Lean) как инструмент встроенного качества.

Суть модели: качество «встраивается» в процесс, а не проверяется на выходе. Основные инструменты: стандартизированная работа, визуализация, Рока-Уоке (защита от ошибок) и система решения проблем.

В работе В.В. Рыжкова и М.А. Бояринцевой [5] рассмотрена практика применения бережливого производства на предприятиях авиастроения. Показано, что использование соответствующих стандартов позволяет существенно снизить как уровень брака, так и общую трудоемкость производства изделий. Приведены примеры внедрения Lean-технологий на Иркутском и Воронежском авиационных заводах.

Методы внедрения и использования бережливого производства, включая Six Sigma и PRINCE2, описаны в работе И.В. Гаранина и Н.Е. Садковской [6]. Они показали, что внедрение указанных методик позволяет не только обеспечить качество продукции, но и ускорить внедрение изменений, постоянно возникающих при анализе рынка, проектировании, производстве.

В целом современный подход к управлению качеством представлен в работе А. Gummati [7].

Можно отметить, что эволюция моделей контроля качества в авиапромышленности демонстрирует переход от фрагментарного контроля к целостной системе. Современная российская практика – это интегрированная модель, ядром которой является стандартизированная СМК (ГОСТ Р 58876-2020 [2]), оптимизированная с помощью инструментов Lean и усиленная цифровыми технологиями (цифровые двойники, advanced NDT). Эта триада позволяет создавать не просто систему обнаружения дефектов, а среду проактивного

управления рисками и гарантированного обеспечения высочайшего уровня качества и безопасности авиационной техники.

1.2. Методы оценки качества комплектующих изделий авиационной промышленности

Контроль покупных комплектующих изделий (ПКИ) в авиакосмической промышленности (верификация закупленной продукции) – это процесс, направленный на проверку соответствия ПКИ установленным требованиям, их комплектности и качества. Цель – установить, что продукция, поступающая от поставщиков, пригодна для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации.

Требования к контролю ПКИ в авиакосмической промышленности закреплены в ГОСТ Р 58044-2017 [8]. Документ определяет организацию работ, полномочия и ответственность персонала служб и подразделений предприятий и организаций авиационной промышленности при проведении и документальном оформлении результатов верификации ПКИ.

Обеспечение качества ПКИ в авиапромышленности – это многоуровневый процесс, основанный на строгих стандартах и современных методах контроля. Российская практика сочетает унаследованные советские подходы (система ВП — военной приемки) с адаптацией международных стандартов. Ключевые методы можно разделить на три группы: управленческие, экспериментальные и диагностические. Рассмотрению этого вопроса посвящена работа С.Б. Дорохова [9], отметившего, что особенности развития российского авиастроения «... привели к тому, что внедрение и функционирование системы менеджмента качества, внедрение бережливого производства, управление стоимостью жизненного цикла изделия, проектный менеджмент, параллельный инжиниринг и другие управленческие инновации не рассматривались серьезно и системно при построении производственных моделей авиа- и вертолетостроительных предприятий» [9, с. 3].

Аналогичные проблемы отмечены в статье Р.Б. Урманова [10].

Российские компании пока очень слабо продвигаются в направлении улучшения отношений «поставщик – потребитель», что является сильным ограничителем общих возможностей улучшения качества продукции.

Основой для допуска ПКИ к производству является не разовый контроль партии, а глубокая оценка возможности поставщика стабильно обеспечивать качество.

Можно отметить статью О.В. Горбунова, главного специалиста сектора качества по работе с поставщиками ПАО «ОДК–Сатурн» [11]. Были разработаны шесть стандартов предприятия, которые включают в себя, как требования к поставщикам, так и ответственность специалистов при принятии решений. В оценке и утверждении поставщиков можно выделить три направления деятельности. Первое – это предварительное одобрение и поставка опытных партий продукции. Второе – входной контроль опытных поставок и принятие решения об окончательном утверждении поставщика. Третье – надзор за утвержденными поставщиками и претензионная деятельность. В работе приведен пример аудита одного из предприятий-поставщиков на соответствие техническим требованиям и требованиям договора с ПАО «ОДК–Сатурн». Были обнаружены несоответствия при производстве и контроле качества ПКИ, с которыми поставщик согласился и принял решение о внедрении соответствующих корректирующих мероприятий.

В статье Ю.Н. Дорохина и др. [12] указано, что входной контроль и постоянная работа с поставщиками позволяет повысить качество ПКИ и снизить общие расходы на производство изделий.

В работе А.В. Лобанова и др. [13], как основные проблемные вопросы, выделены следующие: документальное оформление подтверждения соответствия на закупаемую у поставщиков продукцию, которые не связаны с выполнением государственного оборонного заказа, и предъявление деталей и сборочных единиц на операционный контроль отделу технического контроля.

Одним из важнейших направлений в контроле качества ПКИ являются методы неразрушающего контроля.

В материалах XIII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат" [14] большое внимание уделено средствам и технологиям неразрушающего контроля.

Вопросы неразрушающего контроля рассмотрены также в статье А.В. Славина и др. [15], в которой особое внимание было уделено акустическим методам, приведен пример реализации основных тенденций развития ультразвукового контроля (УЗК) в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. Показано, что они имеют многочисленные преимущества перед ранее используемыми методами.

Также широко используются методы вибродиагностики [16].

Для оценки качества массовых ПКИ и для оценки их надежности в течение жизненного цикла применяются статистические методы. Этих методов достаточно много, они описаны, например, в сборнике статей «Современные статистические методы управления качеством» под редакцией Юдина С.В. [17]. В нем рассмотрены основные методы, даны ссылки на необходимые стандарты, рассмотрены вопросы как массового, так и мелкосерийного (штучного) производства или закупок ПКИ в массовом или штучном порядке.

Таким образом, современная система оценки качества комплектующих в российской авиапромышленности базируется на трех «китах»:

1. административно-управленческие методы (аудит СМК по ГОСТ Р 58876-2020 [2]), оценивающие потенциал поставщика;
2. экспериментально-инструментальные методы (вибродиагностика, УЗК, рентген), объективно оценивающие физические свойства ПКИ;
3. вероятностно-статистические методы, обеспечивающие эффективность и математическую обоснованность контроля.

Общий тренд направлен на интеграцию данных со всех этапов в единую цифровую среду для перехода от констатации качества к его прогнозированию.

1.3. Методы нанесения защитных покрытий на комплектующие изделий в авиационной промышленности

Конструктивная прочность материалов является основополагающим фактором, определяющим надёжность и долговечность деталей машин и механизмов. Такие эксплуатационные характеристики изделий, как износостойкость, коррозионная стойкость, теплосопrotивление и отражательная способность, в значительной мере обусловлены свойствами их поверхностного слоя. С целью улучшения конструктивной прочности поверхностных слоёв широко используются различные технологии нанесения покрытий. Эти методы позволяют защитить основной материал от внешних воздействий; увеличить срок службы деталей; сократить расходы на ремонт оборудования.

Благодаря комплексу технически ценных свойств в авиационной промышленности наиболее широкое распространение получили неупрочняемые деформируемые сплавы алюминия. Однако введение легирующих добавок в состав данных сплавов ухудшает их коррозионные свойства, поэтому комплектующие из алюминиевых сплавов нуждаются в дополнительной защите для обеспечения качества и надёжности изделий в процессе эксплуатации.

Среди известных методов защиты алюминия и его сплавов от коррозии наиболее признанным является оксидирование. После оксидирования поверхностные слои деталей приобретают не только повышенную коррозионную стойкость в различных средах, но и комплекс ценных функциональных свойств – твердость, износостойкость, электроизоляционную способность и др. [18,19].

Оксидный слой на поверхности алюминия и его сплавов формируется двумя способами – химическим или электрохимическим оксидированием [18]. Условиями проведения процесса можно варьировать толщину и структуру покрытия, акцентируясь на тех свойствах, которые необходимы при эксплуатации изделия.

Благодаря своей доступности и сравнительной дешевизне анодное оксидирование является самым распространенным видом обработки алюминия и

его сплавов. В большинстве случаев данный метод позволяет продуктивно решать возникающие задачи модифицирования поверхности деталей с целью придания им требуемых структурных, защитных, функциональных и физико-механических свойств.

Проведенные различными отечественными и зарубежными учеными исследования в области электрохимического оксидирования алюминия и его сплавов позволили выявить механизм образования оксидной пленки, а также влияние условий ведения процесса анодирования на ее основные свойства. Аккумулирован и большой производственный опыт применения технологий анодного оксидирования алюминия и его сплавов, представленный в справочной литературе [18-36].

Различают анодное оксидирование в водных растворах электролитов, в расплавах солей, в газовой плазме, плазменно-электролитическое, разновидностью которого является микродуговое оксидирование, получившее широкое распространение в последние годы [37-42]. Наиболее распространенным и универсальным способом, который легко поддается автоматизации и не требует применения мощных источников тока, является метод оксидирования в водных растворах электролитов [19]. В Таблице 1 представлена сравнительная характеристика различных методов анодирования.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика способов анодирования [19]

Технология анодирования	Толщина оксида, мкм (до)	Скорость роста оксида, мкм/мин (до)	Рабочая среда*	Эффективность формирования оксида, %	Микротвердость оксида	Разовая нагрузка оборудования, м ² (до)	Напряжение, В
В водных растворах электролитов	200	1	К или Щ	100	1200	100	12-24
В расплавах солей	50	1	Р	100	600	0,01	12-24
В газовой плазме	1	0,03	О ₂ или воздух	30	–	0,01	500-1500
Плазменно-электролитическое	300	50	К или Щ	30-60	600	0,01	500-1500

* К или Щ – водные растворы кислот или щелочей; Р – расплавы солей; О₂ или воздух – газообразные кислород или воздух.

В настоящее время в качестве электролитов для анодного оксидирования алюминия и его сплавов предлагаются как кислые, так и щелочные растворы, а также множество добавок к ним [18,19].

В мировой промышленной практике получили применение три электрохимических способа оксидирования – в серной [43-47], хромовой и щавелевой кислотах [48,49]. В отечественной промышленности, в том числе и в ПАО «Машиностроительный завод им. М.И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО МЗИК), наибольшее распространение находит анодное оксидирование в растворе серной кислоты. Данный способ более экономичен и прост в реализации, легко поддается автоматизации, дает возможность применения и постоянного, и переменного тока, образует оксидные покрытия, обладающие высокими адсорбционными свойствами к лакокрасочным, теплозащитным и другим видам покрытий [18-23].

Технологический процесс анодного оксидирования алюминия и его сплавов состоит из подготовительных операций, собственно оксидирования и финишной (заключительной) обработки полученной оксидной пленки. После каждой технологической операции предусматривается межоперационная промывка для удаления остатков солей.

На Рисунке 1.1 представлена принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов, применяемая на ПАО МЗИК.

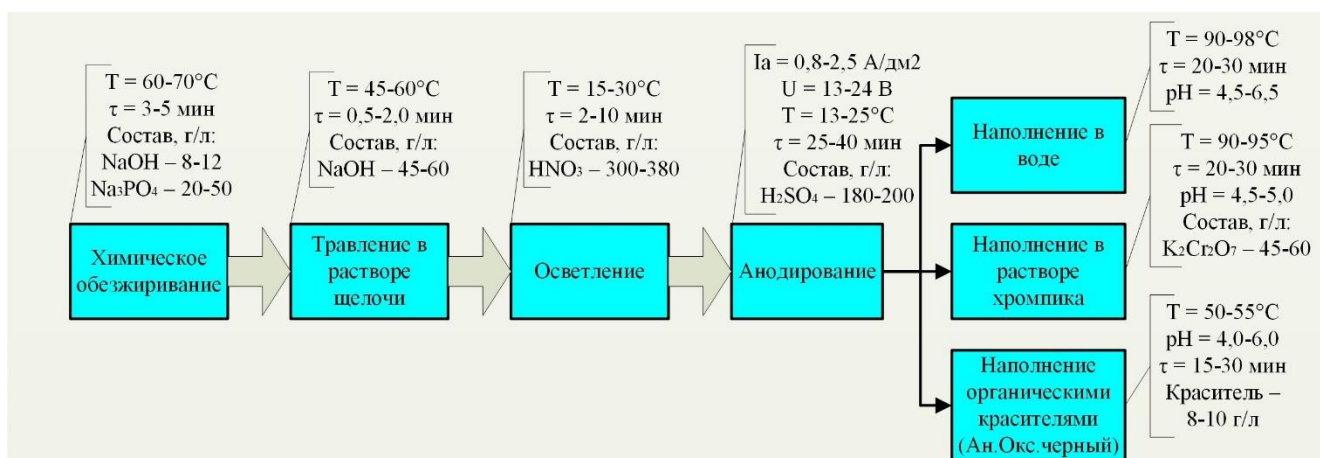


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов ПАО МЗИК

1.4. Анализ отказов и причин появления отказов комплектующих изделий авиационной промышленности

Статистические данные Федерального автономного учреждения «Авиационный регистр Российской Федерации» за период 2007–2024 годов показывают устойчивую отрицательную динамику показателя инцидентности (числа инцидентов на 1000 часов налёта) для самолётов 1-2 класса российского производства. Отказами авиационной техники было обусловлено 67% инцидентов. Тенденция прослеживается как для совокупного числа инцидентов, так и для происшествий, обусловленных отказами авиационной техники [59].

Количественный анализ показал, что:

- доля инцидентов, вызванных отказами авиатехники, составляет 67 %;
- среди инцидентов по причине отказов 44 % обусловлены проявлением конструктивно-производственных недостатков (КПН) авиационной техники.

Основными функциональными системами ВС, в результате КПН которых произошли авиационные происшествия, являются шасси, двигатель, система управления и гидравлическая система.

Анализ инцидентов, вызванных отказами шасси, выявил три ключевые причины:

- сбои в работе концевых выключателей;
- неисправности элементов электрической проводки;
- попадание влаги в незащищённые зоны электрических соединений.

Все вышеперечисленные проблемы относятся к систематическим и наблюдаются на протяжении продолжительного периода.

В сфере авиастроения вопросам отказов двигателей придаётся приоритетное значение. Для всестороннего анализа воздействия отказов авиадвигателей на безопасность полётов необходимо проводить комплексную оценку работоспособности взаимосвязанных систем. К числу критически важных систем относятся:

- силовой агрегат (двигатель);

- система управления двигателем;
- контрольно-измерительные приборы;
- топливная система;
- система подачи масла;
- выхлопная система;
- система запуска.

Анализ инцидентов, вызванных отказами систем управления воздушных судов, показал, что основная их часть обусловлена:

- неисправностями конечных выключателей;
- сбоями в работе электрических цепей и агрегатов (вследствие проникновения влаги или механических обрывов);
- нарушениями регулировки исполнительных механизмов.

При этом отчётливых типичных отказов или паттернов в данной группе обнаружено не было.

На основании анализа эксплуатационной статистики выявлена устойчивая тенденция к повторению отказов гидросистем воздушных судов. В частности, за отчётный период зарегистрировано более 100 случаев отказа гидронасосов. Существенно, что данные отказы наблюдаются как на агрегатах, не выработавших гарантийный ресурс, так и на отремонтированных изделиях в пределах межремонтного периода. Указанные факты подтверждают наличие в эксплуатации опасных отказов повторяющегося характера. Реализуемые промышленностью мероприятия по их предотвращению не достигают поставленной цели в достаточной мере.

По совокупности воздушных судов (самолётов и вертолёт) всех классов преобладающее число инцидентов обусловлено конструктивно-производственными изъянами авиадвигателей. Одновременно следует отметить, что на уровень безопасности полётов значительное влияние оказывают также недостатки контрольно-измерительных приборов, отслеживающих работу двигателей.

Анализ исследований причин появления отказов и повреждений элементов сложных систем, проведенный различными авторами в работах [50-55], позволяет классифицировать повреждения и отказы изделий авиационной промышленности в следующем виде, представленном на Рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Виды повреждений и отказов авиационной техники [56]

Поскольку наиболее массовый характер имели инциденты из-за конструктивно-производственных недостатков авиадвигателей, проведен анализ причин появления отказов и повреждений данной функциональной системы ВС.

Сопоставление данных МАК и NTSB по авиационным происшествиям 2007–2024 гг., связанным с отказами двигателей, выявляет заметные расхождения в оценке ключевых причин. Если МАК относит к человеческому фактору и к техническим отказам – по 40 % случаев, то NTSB фиксирует значительно меньшую долю человеческих ошибок (17 %) и существенно более высокую долю системных отказов (59 %). Это подчёркивает важность учёта региональных особенностей и методологических подходов при анализе безопасности полётов. На Рисунке 1.3 представлена диаграмма прочностных отказов и повреждений [57].



Рисунок 1.3 – Прочностные отказы и повреждения [57]

Одной из ключевых причин прочностных отказов являются усталостные трещины на различных деталях двигателя, которые приводят к механическому разрушению данной детали.

Практически все типы газотурбинных двигателей (ГТД) подвержены таким дефектам, как трещины и обрывы лопаток компрессора и турбин. Преобладающая часть повреждений компрессорных лопаток и значительная доля разрушений турбинных лопаток вызваны усталостными процессами.

Мелкие трещины и частичные разрушения пера лопаток обычно выявляются при плановых осмотрах двигателя. В то же время крупные обрывы лопаток диагностируются непосредственно в процессе эксплуатации – по резкому увеличению уровня вибраций. Подобные отказы могут спровоцировать помпаж

компрессора и масштабные вторичные повреждения, что требует немедленной остановки двигателя.

При обнаружении трещин или обрывов лопаток нередко приходится досрочно снимать двигатель с эксплуатации – особенно если замена повреждённого элемента невозможна в условиях текущей эксплуатации.

Разрушения и трещины дисков компрессоров и турбин – одни из самых критичных отказов в работе двигателей. Главная опасность заключается в том, что при отрыве фрагмента диска повреждения нередко выходят за пределы корпуса двигателя.

Одним из ранних признаков развития трещины служит постепенное повышение уровня вибраций двигателя. Этот симптом можно использовать для диагностики: если вовремя обнаружить проблему и остановить двигатель, есть шанс избежать полного разрушения диска. При выявлении трещины в диске двигатель необходимо снять с эксплуатации.

Особую опасность представляют разрушения турбинных дисков – они существенно габаритнее и тяжелее компрессорных, поэтому их разрушение несёт более серьёзные последствия.

Дефекты труб камер сгорания в виде трещин и прогаров преимущественно выявляются при эндоскопическом осмотре двигателя.

При серьёзных разрушениях отделившиеся фрагменты труб способны повредить лопатки турбины. В зависимости от характера дефекта принимаются разные меры:

- повреждённые трубы заменяют;
- если дефект стабилен и не прогрессирует, допускается дальнейшая эксплуатация при условии регулярного контроля.

Основные причины повреждений – тепловые напряжения, возникающие из-за:

- высоких градиентов температур;
- резких перепадов температуры при запуске и останове двигателя [58].

В ходе эксплуатации авиадвигатели подвергаются комплексному воздействию неблагоприятных факторов: механических нагрузок, вибраций, пылевых частиц, агрессивных газов, высоких температур и меняющихся атмосферных условий. Эти воздействия провоцируют естественный износ узлов и деталей – постепенное изменение их геометрических параметров, формы, качества поверхности и прочностных характеристик. В результате снижается надёжность компонентов, что в перспективе приводит к их выходу из строя [59].

Авиадвигатель представляет собой сложную систему, элементы которой включают большое число как подвижных, так и неподвижных сочленений. В них принимают участие контактирующие между собой отверстия и валы. На элементы сочленений в процессе работы оказывают воздействие силы, которые измеряются сотнями тысяч ньютонов. В результате этих воздействий в конструкции двигателя возникают вибрации и знакопеременные нагрузки.

Под действием механических нагрузок и вибраций происходит разрушение приповерхностного слоя металла. При этом образующиеся продукты износа, образуя металлическую пыль, частично выкрашиваются. Одновременно на рабочих поверхностях формируются тонкие окисные плёнки, образующиеся в результате взаимодействия с кислородом и химическими веществами, находящимися в масле, газах и воде, попадающих в зону контакта нагруженных деталей. Эти плёнки обладают пониженной износостойкостью, что способствует развитию коррозионного износа. Последний протекает параллельно с контактным износом и усиливает его интенсивность.

Попадание в подвижные части механизма твёрдых пылинок или остатков изношенных деталей приводит к появлению царапин и задиров на соприкасающихся поверхностях – абразивный износ. Эти повреждения работают как ловушки: в них застревают новые абразивные частицы, из-за чего износ приобретает лавинообразный характер – каждый цикл усиливает предыдущий.

Абразивный износ внешних поверхностей деталей характеризуется образованием царапин и забоин – они возникают вследствие ударов, переносимых воздушным потоком твёрдых частиц.

Отдельно выделяют эрозионный износ, он поражает поверхности, подвергающиеся воздействию скоростных потоков жидкостей или горячих газов. Отличительной особенностью данного вида износа является наличие многочисленных мелких «лунок» или питтинга на рабочей поверхности.

К типичным примерам поверхностей деталей, подверженных эрозионному износу, можно отнести:

- рабочие поверхности форсунок;
- стенки камер сгорания двигателей;
- лопатки газовых турбин;
- сопла;
- и т.п.

Еще одним достаточно распространенным видом износа в авиационной промышленности является тепловой износ, выражающийся в интенсивном нагреве в зоне взаимодействия и возникающий при высоких удельных давлениях и недостаточной смазки трущихся поверхностей. В результате воздействия повышенных температур происходит снижение микротвердости приповерхностных слоев материалов деталей в месте сопряжения, структура приповерхностных слоев изменяется, что приводит к ускоренному износу деталей. Первым признаком теплового износа служат цвета побежалости на рабочих поверхностях. В зонах экстремально высоких контактных напряжений температура может возрасти настолько, что происходит мгновенное локальное сваривание частиц металла на сопряжённых поверхностях. При последующем перемещении деталей приварившиеся частицы вырываются из менее прочного металла, образуя задиры. На более твёрдой поверхности эти частицы остаются приваренными, создавая грубую шероховатость, которая впоследствии провоцирует интенсивный абразивный износ контактирующих поверхностей.

Деформационный износ – пластическая деформация металла под действием различных нагрузок.

Механизм деформационного износа развивается по цепочке:

1. На металл действуют значительные нагрузки: статические, динамические и/или тепловые.
2. Металл подвергается пластической деформации: происходит смятие, вытяжка, или наклеп.
3. В результате структурных изменений снижается прочность материала.
4. Нарастают необратимые изменения геометрии деталей.

Примеры:

- болты вытягиваются под действием затяжного усилия;
 - пружины теряют упругость при длительной деформации;
 - заклёпки ослабевают из-за вытяжки.
5. При превышении предела пластичности наступает стадия разрушения – деталь разрывается по ослабленному сечению.

Таким образом, деформационный износ представляет собой кумулятивный процесс, где первоначальные изменения геометрии постепенно приводят к катастрофическому разрушению.

Под воздействием внешней среды поверхности деталей авиационной промышленности подвергаются коррозии. Этому способствуют:

- систематическое влияние атмосферных факторов (влажность, градиенты температуры воздуха);
- контакт с горючими газами;
- взаимодействие с топливом, гидравлическими смесями и различными смазочными материалами.

Коррозии подвержены:

- внешние поверхности двигателей;
- внутренние поверхности агрегатов, насосов, баков, трубопроводов гидравлических и топливных систем.

По мере развития толщина слоя коррозии увеличивается, что приводит к изменению геометрических размеров деталей и снижению прочностных характеристик их приповерхностных слоев.

Усталостные явления в металлах – одна из форм естественного износа конструкций ВС и их двигателей. Они возникают под действием знакопеременных напряжений в процессе эксплуатации.

Зонами наиболее активного развития усталостных процессов являются участки концентрации напряжений, а именно:

- зоны вокруг отверстий (фаска);
- области изменений геометрии поверхности (вблизи забоин, задигов);
- участки с коррозионно-поврежденными поверхностями.

Характерным признаком усталостного износа является появление сетки мелких трещин на поверхности детали. По мере роста трещины напряжения концентрируются на краях трещин, которые развиваются во всех направлениях. Это приводит к существенному снижению прочностных характеристик материала детали и в конечном итоге – к её разрушению.

Запуск серийного производства новых типов двигателей обычно совпадает с началом их эксплуатации. При этом технологические процессы на заводах серийного производства отличаются от опытных производств: как правило, используются иные методы заготовительного передела, а также ускоренные режимы и механической, и термической обработки.

На начальном этапе освоения серийного производства такие изменения способны приводить к возникновению производственных дефектов, которые не были обнаружены на опытных образцах. Кроме того, детали с несоответствиями могут появляться вследствие нарушений технологической дисциплины или недостаточного контроля качества на предприятиях-изготовителях серийного производства.

К числу характерных производственных дефектов можно отнести несоответствие структуры металла в результате неправильной технологии штамповки, сварки или термообработки; остаточные напряжения в сварных конструкциях в результате нарушения режима сварки; поверхностные трещины в результате неправильных режимов шлифования; отслоения гальванопокрытий в результате неверной заточки и заправки шлифовальных кругов и т.д. [58].

В работе [59] представлена классификация дефектов ответственных деталей авиационных двигателей. Показано, что на деталях (диски, валы, лопатки компрессоров и турбин) наблюдаются однотипные дефекты. На деталях компрессора и турбины наблюдаются царапины, сколы, задиры, повреждение сопрягающихся поверхностей, а на деталях турбины наблюдаются прогары и нагары. Основные причины дефектов можно представить в виде классификации, разделив их на три категории: механическое, термическое и химическое воздействие.

Механическому воздействию подвержены поверхности деталей, контактирующие с другими деталями и вблизи поверхностей вращающихся деталей, поверхности, образующие проточную часть. Термическому воздействию подвержены детали, испытывающие большие перепады температур и находящиеся в высокотемпературных зонах. Химическому воздействию подвержены детали, поверхности которых взаимодействуют с компонентами коррозионной среды.

1.5. Выводы по ГЛАВЕ 1

Комплектующие изделия авиационной промышленности при эксплуатации работают в различных средах (влажный воздух, водные растворы, смазочные масла, кислоты, щелочи и др.), при различных температурах и давлениях. Вследствие воздействия факторов внешней среды, а также взаимодействия с сопрягаемыми деталями в процессе эксплуатации их поверхностные слои подвергаются наибольшим нагрузкам. Качество покрытий комплектующих финального изделия наряду с прочностными характеристиками основного материала является определяющим критерием их долговечности при различных условиях эксплуатации.

Нанесение защитно-упрочняющих покрытий на поверхность комплектующих финального изделия – наиболее эффективный способ повышения их долговечности и качества. Используя существующие и разрабатывая новые материалы и способы нанесения покрытий, в том числе анодно-окисных покрытий

на алюминии и его сплавах (далее – АОП), можно значительно уменьшить отрицательное влияние таких процессов, как усталостный износ, эрозия, коррозия и др.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

2.1. Требования к качеству анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

Перечень требований к качеству анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах регламентирован тремя документами в авиационной промышленности:

- ГОСТ 9.301-86,
- ГОСТ 9.031-74 и
- ПИ 1.2.616-2003 [60-62].

Правила приемки и методики контроля описаны в ГОСТ 9.302-88 [63].

Согласно ГОСТ 9.301-86, при оценке качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах контролю подлежат такие параметры, как внешний вид, толщина, степень наполнения, защитные свойства. Однако толщина регламентирована только для покрытий, выполненных по шифру Ан.Окс.тв, хотя этот параметр очень важен и для остальных анодно-окисных покрытий.

Касательно функциональных свойств анодно-окисных покрытий, таких как твердость, износостойкость, удельное сопротивление, пробивное напряжение, теплопроводность и других, контроль проводится лишь в соответствии с требованиями конструкторской или нормативно-технической документации.

Внешний вид.

Согласно ГОСТ 9.302-88, контроль внешнего вида заключается в выявлении дефектов поверхности покрытия внешним осмотром. Контроль проводят осмотром деталей невооруженным глазом на расстоянии 25 см от контролируемой поверхности при естественном или искусственном свете освещенностью не менее 300 люкс при применении ламп накаливания и не менее 500 лк — с использованием люминесцентных ламп.

Оценку качества внешнего вида покрытий по шифрам Ан.Окс.красный и Ан.Окс.черный проводят на соответствие образцам-эталонам, форма, размеры и внешний вид которых согласованы с заказчиком.

При оценке внешнего вида покрытий необходимо учитывать состояние поверхности детали перед нанесением покрытий.

Согласно ГОСТ 9.301-86, защитно-декоративные оксидные покрытия на алюминии и его сплавах по шифру Ан.Окс. должны иметь цвет от светло-серого до темно-серого, на деталях из литейных сплавов – от светло-серого до темно-коричневого. Оттенок не нормируется.

Цвет покрытия Ан.Окс.нхр – от светло-зеленого до желто-зеленого, на многокомпонентных и литейных сплавах – от серого до темно-серого. Оттенок не нормируется.

Не являются браковочными следующие признаки:

- темные точки и пятна как результат выявления неоднородности структуры основного металла;
- темные и светлые полосы в направлении прокатки, в местах сварки, притирки, наклепа, в местах отсутствия плакировочного слоя;
- желтые пятна от хромовых солей вокруг отверстий, в местах контакта детали с приспособлением, в местах сопряжения неразъемных сборочных единиц, вокруг пор и мест включений, допускаемых нормативно-технической документацией на литье.

Цвет покрытия Ан.Окс.тв – от светло-серого до черного, допускаются желто-зеленые оттенки в зависимости от марки сплава и толщины формируемого покрытия.

Наличие на поверхности деталей мраморовидности и пятнистости не является браковочным признаком, если функциональные свойства сохраняются и соответствуют требованиям заказчика.

Толщина покрытий.

Согласно ГОСТ 9.301-86, толщина анодно-окисных покрытий должна соответствовать требованиям конструкторской документации. Однако в чертежах,

согласно ГОСТ 9.306-85, конкретная толщина задается для твердых и износостойких покрытий, а для покрытий по шифрам Ан.Окс, Ан.Окс.нхр и окрашенных покрытий толщина не нормирована.

Наиболее распространенными методами определения толщины для анодно-окисных покрытий являются вихретоковый, гравиметрический и металлографический метод.

Вихретоковый метод является неразрушающим и в этом его преимущество перед остальными методами. Для контроля толщины данным методом используют приборы, предназначенные для измерения толщины неэлектропроводных покрытий на токопроводящей подложке, например, вихревой толщиномер ВТ-10НЦ. Относительная погрешность метода составляет $\pm 5\%$.

Гравиметрический и металлографический методы являются разрушающими, поэтому требуют дополнительного изготовления образцов для проведения контрольных операций.

Гравиметрический метод заключается в растворении покрытия до основного металла в растворе и определении разности масс до и после покрытия, которая и характеризует толщину покрытия. Согласно ГОСТ 9.031-74, анодно-окисное покрытие снимают с помощью раствора, содержащего 20 г/л CrO_3 и 35 г/л H_3PO_4 (плотность 1,68 г/см³) при температуре 80-90°C. Среднюю толщину покрытия рассчитывают по формуле (2.1):

$$h_{\text{ср}} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 10^4}{S \cdot \rho}, \quad (2.1)$$

где $h_{\text{ср}}$ – средняя толщина покрытия, мкм;

m_1 – масса покрытой детали, г;

m_2 – масса детали после снятия покрытия, г;

S – площадь поверхности детали, см²;

ρ – плотность анодно-окисного покрытия $\approx 2,6$ г/см³.

Относительная погрешность гравиметрического метода составляет $\pm 10\%$.

Металлографический способ основан на определении толщины покрытия на металлографическом шлифе поперечного разреза детали с применением

микроскопа. При толщине покрытия до 20 мкм увеличение микроскопа должно быть 500-1000; при толщине 20-100 мкм – 400-500; при толщине более 100 мкм – 100-200. Данный метод достаточно трудоемок по причине сложности и долговременности изготовления качественного шлифа.

Относительная погрешность металлографического метода составляет $\pm 0,8$ мкм для толщин покрытия менее 25 мкм и $\pm 10\%$ – более 25 мкм.

Степень наполнения.

Согласно ГОСТ 9.302-88, контроль наполнения анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах проводят методом окрашивания или методом определения разности масс. Данные методы являются разрушающими.

Метод окрашивания может проводиться двумя способами: методом погружения и методом капли.

При контроле методом погружения покрытый образец погружают в раствор 400 г/л HNO_3 , выдерживают 5 минут для снятия покрытия, затем помещают на 5 минут в спиртовой раствор красителя концентрацией 5-20 г/л при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ или на 15 минут в водный раствор красителя той же концентрации при температуре $50 \pm 3^\circ\text{C}$. По окончании времени испытаний образец достают, промывают в дистиллированной воде и сушат.

Если после испытаний покрытие не окрасилось или окрасилось незначительно, то покрытие считается выдержавшим испытания и удовлетворяющим предъявленным требованиям.

Метод определения разности масс основан на определении разности масс образца с покрытием и после травления в испытательном растворе. Образец погружают в раствор 500 г/л HNO_3 , выдерживают 10 минут для снятия покрытия при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$, достают, промывают в дистиллированной воде и сушат. Покрытие считается не выдержавшим испытания, если после выдержки в HNO_3 оно обесцветилось.

При условии, что покрытие не обесцветилось, образец помещают в эксикатор на 20 минут, после чего взвешивают. Затем образец помещают в раствор для испытаний, приготовленный следующим образом: растворяют 10 г Na_2SO_4 в 1

литре дистиллированной воды, затем доводят pH раствора до значений 3,6-3,8 уксусной кислотой и раствором 500 г/л H₂SO₄ до pH=2,5. Образец помещают в данный раствор при температуре 90±2°С на 20 мин, после чего извлекают, промывают, сушат, выдерживают 20 минут в эксикаторе и взвешивают.

Разность масс рассчитывают по формуле (2.2):

$$\Delta m = \frac{(m_1 - m_2)}{S}, \quad (2.2)$$

где m_1 – масса покрытой детали, г;

m_2 – масса детали после снятия покрытия, г;

S – площадь поверхности детали, см².

После испытаний потеря массы образца не должна превышать 20 мг/дм² для изделий, предназначенных для эксплуатации в открытой атмосфере, и 30 мг/дм² для изделий, предназначенных для эксплуатации в закрытом помещении [52].

ГОСТ 9.031-74 также регламентирует оценку качества наполнения оксидного покрытия данными методами. Отличие состоит лишь в том, что для исследования рекомендовано применять растворы других составов.

Защитная способность покрытий.

Согласно ГОСТ 9.302-88, защитные свойства анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах контролируют с применением ускоренных коррозионных испытаний методами погружения или методом капли.

Метод погружения заключается в выдержке покрытых образцов в растворе 250 г/л HCl (плотность 1,19 г/см³) и 30 г/л K₂Cr₂O₇ в течение 1-50 минут. Покрытие считается не выдержавшим испытания, если происходит изменение цвета раствора от оранжевого до зеленого, что свидетельствует о проникновении процесса коррозии до поверхности основного металла.

Отличие метода капли от метода погружения состоит лишь в том, что в первом случае испытывается ограниченная одной каплей раствора поверхность детали, тогда как метод погружения предполагает погружение в испытательный раствор всей детали.

При контроле методом капли на поверхность детали с покрытием наносят 2-4 капли испытательного раствора и проводят наблюдение за изменением цвета

капли. Время проведения испытания в зависимости от марки сплава и шифра покрытия регламентировано ГОСТ 9.302-88 [53].

Функциональные свойства покрытий.

К функциональным свойствам, методы контроля которых регламентированы ГОСТ 9.302-88, для анодно-окисных покрытий, выполненных по шифрам Ан.Окс.тв и Ан.Окс.эиз, относятся микротвердость, износостойкость и пробивное напряжение.

Для контроля микротвердости ГОСТ 9.302-88 устанавливает метод вдавливания алмазных наконечников по ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости проводят с применением микротвердомера ПМТ-2 или ПМТ-3. Алмазный наконечник в виде правильной четырехгранной пирамидки статически вдавливается под нагрузкой 2-200 г. По полученному при вдавливании в покрытие пирамиды отпечатку определяют его площадь и диагональ при 500-кратном увеличении. Расчет микротвердости проводят по формуле (2.3):

$$H = \frac{1.854 \cdot P}{d}, \quad (2.3)$$

где P – приложенная к алмазной пирамиде нормальная нагрузка, г;

d – среднее арифметическое длин диагоналей отпечатка алмазного наконечника, мм.

Износостойкость окисдных покрытий определяется временем истирания покрытия выбранной толщины при заданной нагрузке до достижения основного металла или по снижению массы образца, подвергающегося трению качения или скольжения. Испытания проводят на машинах трения различной конструкции.

Электрическое пробивное напряжение характеризует то минимальное напряжение, которое необходимо для пробоя слоя диэлектрика. Его контроль проводят для покрытий, полученных по шифру Ан.Окс.эиз. Для измерения напряжения используют двухэлектродную схему двух типов – с шарообразными электродами диаметром 3-8 мм и точечного наконечника или с двумя шаровидными электродами диаметром 3-8 мм. Измерение проводят при минимальном давлении измерительного электрода на покрытие не менее 1 Н и скорости роста напряжения 25 В/с. Результатом оценки пробивного напряжения

принимают значение, полученное как среднее арифметическое измерений в трех различных точках поверхности, поскольку оксидное покрытие неоднородно по поверхности детали.

Дополнительные свойства покрытий, существенные в процессе эксплуатации изделий с анодно-окисным покрытием.

Согласно ГОСТ 9.301-86, толщина анодно-окисных покрытий должна соответствовать требованиям конструкторской документации. Однако в чертежах, согласно ГОСТ 9.306-85, конкретная толщина задается для твердых и износостойких покрытий, а для покрытий по шифрам Ан.Окс, Ан.Окс.нхр и окрашенных покрытий толщина не нормирована. Поэтому знание толщины на таких покрытиях и их зависимость от основных технологических параметров процесса анодирования является необходимым условием правильного прогнозирования эксплуатационных характеристик готового изделия, в частности защитных свойств в различных условиях эксплуатации.

Пористость.

Кроме толщины покрытия, в качестве дополнительного испытания, которое дает возможность оценить корректность применяемой технологии анодирования, целесообразно определить их пористость. Для этого может быть использован метод нахождения маслостойкости анодного покрытия. Метод заключается в определении адсорбированного покрытием количества масла при испытаниях. Образец с покрытием, не прошедшим операцию уплотнения (наполнения), взвешивают, погружают в нагретое масло при температуре 130°C и выдерживают до охлаждения масла до 20±5°C. Масло для испытаний подбирают с кинематической вязкостью $(2,5-3,5) \times 10^{-5}$ м²/с. После испытаний образец извлекают, удаляют избыток масла с помощью фильтровальной бумаги и вновь взвешивают [18].

Пористость рассчитывают по формуле (2.4):

$$\varphi = \frac{10^4 \cdot (m_2 - m_1)}{S \cdot \rho \cdot h}, \quad (2.4)$$

где φ – пористость покрытия, %;

m_1 – масса покрытой детали до погружения в масло, г;

m_2 – масса детали после выдержки в масле, г;

S – площадь поверхности образца, см²;

ρ – плотность масла, г/см³;

h – толщина анодно-окисного покрытия, мкм.

Теплопроводность.

Толстослойные окисные покрытия обладают высокими теплоизоляционными свойствами. Томашов Н.Д. [20] на основании приближенных вычислений теплопроводности различных природных и искусственных модификаций окиси алюминия, близких по составу к анодным пленкам, приводит значение теплопроводности анодных пленок 0,001-0,003 кал/(см·сек·°С). Эта величина в 200-500 раз меньше, чем теплопроводность алюминия и его сплавов. Общая теплопередача через анодированную поверхность по сравнению с неанодированной поверхностью, таким образом, будет значительно уменьшена. Степень уменьшения теплоотдачи при наличии окисной пленки будет определяться толщиной слоя окиси и характером теплопередачи. Установлено, что утолщенные анодные слои можно применять для теплоизоляции внутренних поверхностей камеры сгорания тепловых двигателей [22, 23].

Для алюминиевых сплавов коэффициент теплового излучения составляет 4-6 при температурах 150-200°С, в то время как для анодированного алюминия 80.

Таким образом, коэффициент теплового излучения анодированной поверхности более, чем в 10 раз выше, чем неанодированной. Очевидно, что целесообразно анодировать те алюминиевые поверхности, которые по роду работы должны излучать по возможности большее количество тепла (например, внешнюю поверхность ребрения головок и цилиндров воздушного охлаждения тепловых двигателей) [22, 23].

Электрические характеристики.

Анодные пленки, создаваемые на алюминии и его сплавах, обладают относительно высокими диэлектрическими свойствами. Диэлектрическая постоянная Σ для алюминиевых оксидных покрытий, не подвергнутых уплотнению, составляет 7,4-7,6 [23].

Удельное сопротивление анодной окисной пленки толщиной 50 мкм составляет $4 \cdot 10^{15}$ Ом·см при 20°C и порядка $9 \cdot 10^{12}$ Ом·см при 300°C [22].

Электрическое сопротивление анодной пленки зависит от ее толщины и ряда факторов, связанных как с условиями анодирования, так и с условиями эксплуатации пленки. Удельное электрическое сопротивление оксидов обычно измеряют с применением кольцевых электродов и тераомметра [19, 25].

2.2. Свойства покрытий и условий анодирования, оказывающих влияние на параметры качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

Основными факторами, предопределяющими структуру и толщину анодно-окисных покрытий, формируемых в растворе серной кислоты, являются концентрация кислоты, температура раствора, плотность тока и продолжительность анодирования. Данные параметры определяют отношение скоростей образования оксида и его растворения, обеспечивая заданную пористость и толщину покрытия. Обычно пористость анодно-окисных покрытий, полученных в серной кислоте, составляет 5-15% (10^7 пор/см² поверхности при среднем диаметре 0,015 мкм) [19].

Уникальность процесса анодного оксидирования алюминия и его сплавов состоит в том, что скорость формирования анодно-окисной пленки изменяется с течением оксидирования. Скорость образования оксида при постоянной плотности тока остается постоянной, в то время как скорость травления пленки растет за счет выделения Джоулева тепла в барьерном слое. Теплота выделяется в глубине пор, поэтому температура электролита внутри пор и температура самой алюминиевой детали значительно возрастает.

Количество выделившегося тепла увеличивается с ростом плотности тока и времени анодирования. Рост температуры электролита в порах оксида повышает его агрессивность и ведет к уменьшению толщины покрытия за счет ускоренного

растворения покрытия с поверхности и увеличению пористости покрытия за счет стравливания стенок пор.

Перемешивание электролита позволяет компенсировать данный фактор и повысить толщину формируемых оксидных покрытий на алюминии и его сплавах (Рисунок 2.1).

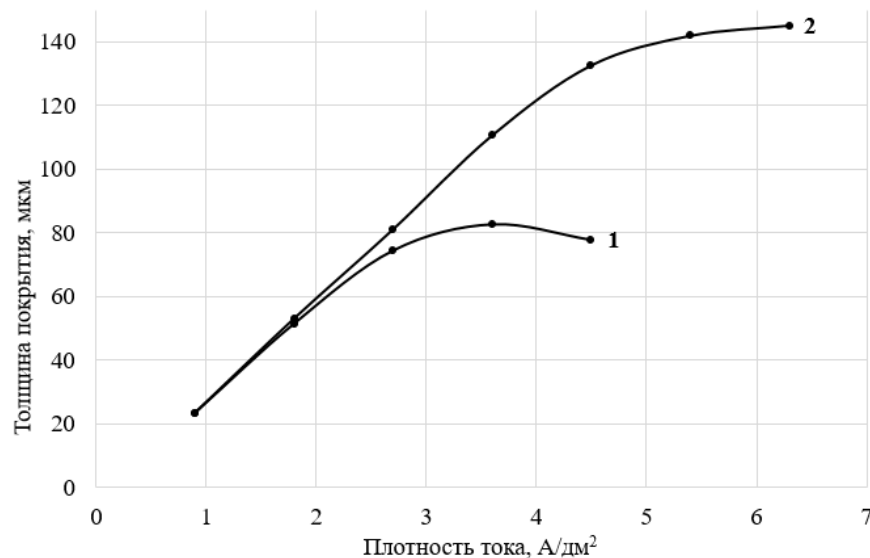


Рисунок 2.1 – Толщина покрытий, полученных анодным оксидированием алюминия в сульфатном электролите при различных плотностях тока: 1 – без перемешивания, 2 – с перемешиванием раствора (концентрация серной кислоты 210 г/л, время анодирования 1,5 часа) [18]

С ростом плотности тока увеличивается скорость нанесения покрытия, но увеличивается и количество выделившегося тепла в порах покрытия. При увеличении плотности тока должно одновременно происходить интенсивное охлаждение электролита и его перемешивание. Иначе травящее действие раствора увеличивается быстрее, чем формирующее действие тока, что приводит к получению рыхлого осадка с большой пористостью [21].

При увеличении температуры раствора электролита с 20°C до 50°C толщина покрытий уменьшается в 10 раз. При уменьшении температуры и концентрации раствора электролита анодно-окисные покрытия приобретают меньшую пористость и повышенную твердость [18].

Ввиду того, что температура электролита и концентрация серной кислоты в нем оказывают подобное влияние на процесс формирования анодно-окисного покрытия, данные технологические параметры необходимо подбирать взаимосвязанно. Использование растворов меньшей концентрации позволяет увеличивать температуру раствора, в то время как увеличение концентрации серной кислоты требует снижения температуры раствора электролита.

Чтобы получать анодно-окисные покрытия больших толщин в электролитах, охлаждаемых до отрицательных температур, необходимо повысить концентрацию серной кислоты до 300-380 г/л. Оптимальное соотношение концентрации серной кислоты и температуры раствора можно выбрать согласно графика, представленного на Рисунке 2.2, построенного на основе данных [18]. Допускается отклонение концентрации от оптимального значения на 15 г/л.

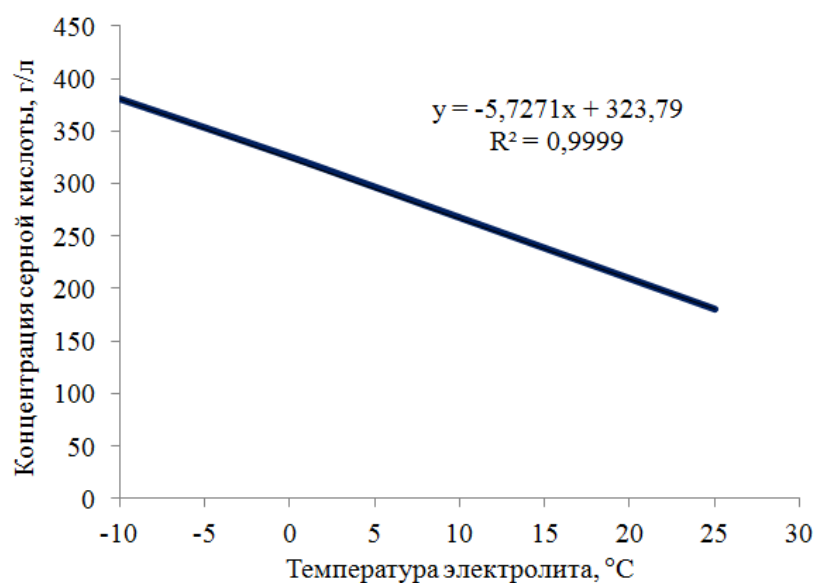


Рисунок 2.2 – Выбор оптимальной концентрации серной кислоты в сульфатном растворе в зависимости от температуры электролита

Значение пробивного напряжения защитных покрытий, полученных в растворах серной кислоты, составляет 120-200 В. Для формирования электроизоляционных покрытий с повышенными значениями этого параметра требуется толщина покрытия не менее 40 мкм.

Защитно-декоративные покрытия толщиной 6-20 мкм, полученные в водных растворах серной кислоты, обладают высокими электрофизическими характеристиками. Микротвердость оксидов, сформированных при плотностях тока 0,5-2,0 А/дм², составляет 300-500Н, в то время как технически чистого алюминия – около 30Н. Микротвердость анодных покрытий, определенная на микротвердомере ПМТ-3, на техническом алюминии может составлять 600Н, а на химически чистом алюминии – 1500Н [19]. При этом микротвердость покрытий распределена неравномерно по толщине: в прилегающих к основному металлу слоях микротвердость в 1,5-2,0 раза выше, чем во внешних слоях, что обусловлено большей пористостью поверхностных слоев [18].

В зависимости от марки сплава и режима анодирования пористость поверхностного слоя оксида изменяется в интервале 15-40%. С ростом температуры пористость возрастает. Плотность анодного покрытия на алюминии и его сплавах в зависимости от технологического режима анодирования лежит в интервале 2900-3800 кг/м³. Оксид алюминия является хорошим диэлектриком, его удельное сопротивление равняется в среднем 4×10^{15} Ом·см [18, 20], пробивное напряжение может составлять до 1000В [31].

Сформированная на поверхности детали анодная пленка благоприятно сказывается на ее коррозионной стойкости в многочисленных средах. Она с успехом защищает алюминий от атмосферной коррозии в нейтральных и слабокислых растворах неорганических солей [20, 22, 23]. Защитные свойства анодно-окисных покрытий в морской среде доказаны долговременной эксплуатацией оксидированных деталей из алюминия и его сплавов [18, 22, 23].

Коррозионная стойкость зависит от состава анодируемого сплава. Наилучшие защитные свойства зафиксированы для покрытий, нанесенных на чистый алюминий. Добавки меди, железа, кремния, магния, марганца благотворно сказываются на механических свойствах сплава, но снижают при этом коррозионную стойкость формируемых анодных покрытий. Кремний и интерметаллид Al_6Mg окисляются медленнее, чем алюминий, и остаются в виде включений в покрытии [23]. В то время как интерметаллиды Al_3Mg_2 , Al_2Cu , CuAl_2 ,

CrAl_7 , Co_2Al_9 , Co_2Al_5 , $\text{Co}_4\text{Al}_{13}$, Al_7CuFe , Al_7CuNi легко разрушаются и увеличивают пористость покрытия [18]. Коррозионная стойкость анодных покрытий увеличивается с ростом толщины барьерного слоя, сопротивление коррозии которого составляет около 35% от общего значения. Однако увеличение толщины пористой части покрытия благоприятно сказывается на его защитных свойствах только при малых толщинах пленки, тогда как дальнейший рост пленки приводит к увеличению диаметра пор и снижению коррозионной стойкости [20].

Чтобы улучшить прочностные и электроизоляционные свойства анодно-окисных покрытий формируют покрытия толщиной 40-90 мкм. Такие функциональные покрытия имеют пробивное напряжение 1000В [18, 31].

Следует отметить, что электрофизические свойства зависят не только от толщины и пористости, но и от структуры покрытия, поэтому результаты анодирования будут определяться режимом анодного оксидирования и составом электролита. Пробивное напряжение на литейных сплавах меньше, чем на деформируемых [18].

Микротвердость функциональных оксидных покрытий также зависит от природы алюминиевых сплавов и составляет для чистого алюминия 4,9-5,1 ГПа, для сплава АВ 4,7-4,9 ГПа, для сплавов типа АК 4,4-4,7 ГПа, а для сплава Д16 3,24-3,53 ГПа. Покрытия лучшего качества формируются на чистом алюминии и его сплавах с магнием, наименьшего качества – на сплавах, содержащих свыше 4,5% меди [19].

2.3. Оценка методов прогнозирования качества покрытий на основе методов статистического анализа

Ряд современных исследований направлен на моделирование свойств анодно-окисных покрытий в зависимости от различных технологических параметров ведения процесса анодного оксидирования [64-82].

Gösele с соавторами показали, что для алюминия отношение общей толщины оксидного покрытия к глубине травления металла, называемого

«объемным расширением», близко к 1,4 для упорядоченных пленок, выращенных в различных электролитах [64].

Vrublevsky I. и др. изучали объемное расширение алюминия при образовании пористого оксида в гальваностатическом режиме [65]. Они показали, что объемное расширение оксида алюминия линейно зависит от напряжения анодирования для пленок, образующихся при комнатной температуре в серной кислоте, и варьируется от 1,35 до 1,63 при напряжении анодирования от 13 до 24 В. По мнению авторов, на объемное расширение оксида алюминия влияет включение сульфат-иона в оксидное покрытие из электролита [66].

Poznyak A.A. с соавторами в работе [67] изучал влияние параметров анодирования, таких как напряжение, ток и время анодирования, температура электролита и состав электролита на объемное расширение анодированных тонких пленок Al, Al-1%Si и Al-1%Cu. Обнаружено, что коэффициент объемного расширения анодного пористого оксида алюминия варьируется от 1,32 до 2,08 в зависимости от напряжения анодирования, плотности анодирующего тока и типа электролита. Установлено, что соотношение между плотностью пор пористого оксида алюминия и напряжением анодирования соответствует соотношению (2.5):

$$N_p = 9,4 \cdot 10^{10} e^{-0.042V}, \quad (2.5)$$

где N_p – плотность пор, см⁻²;

V – напряжение, В.

Кроме того, было определено, что выход по току во время анодирования составлял около 83%.

В работе [68] исследована зависимость коэффициента объемного расширения, выхода по току анодирования при анодировании алюминиевой фольги (99,99%) методом низкотемпературного гальваностатического анодирования в водных растворах серной кислоты. Показано, что скорость гальваностатического анодирования увеличивается пропорционально плотности анодного тока, а снижение концентрации кислоты не оказывает существенного влияния на скорость анодирования. Исследования авторов Çapraz Ö.Ö., Dervishi E.

[69, 70] свидетельствуют, что пористость и толщина покрытия зависят от времени анодирования и типа электролита.

Patermarakis с соавторами [71-73] изучали процесс анодного оксидирования алюминия в серной кислоте при температуре 25°C и напряжении 23,615 В, время оксидирования – до 180 мин. Показано, что масса покрытия и ее толщина увеличиваются со временем анодирования. Получены математические зависимости диаметра и плотности пор, расстояния между порами от напряжения анодирования.

Кроме исследований толщины и морфологии анодно-окисных покрытий на алюминии, встречаются работы, посвященные моделированию таких важных характеристик, как износостойкость и коррозионная стойкость [70, 77], внутренние напряжения покрытия [72], микротвердость [78], равномерность покрытия [79-81].

Несмотря на большой объем данных по моделированию влияния различных факторов на свойства оксидных покрытий, существующие модели сложно применить в производственных условиях. Во-первых, вышеупомянутые модели получены на чистом алюминии, редко используемом при производстве деталей в машиностроении, что ограничивает их применение. Во-вторых, описанные модели получены в лабораторных (близких к идеальным) условиях, которые значительно отличаются от производственных, в частности, чистота используемых реактивов, геометрический фактор, распределение электрических и тепловых полей и т.д.

2.4. Определение дополнительных параметров качества, влияющих на работоспособность комплектующих изделий авиационной промышленности при эксплуатации

На основе анализа отказов комплектующих изделий авиационной промышленности проведен анализ отказов и неисправностей составных частей изделий авиационной промышленности, изготовленных из неупрочняемых алюминиевых сплавов, в результате дефектов защитных покрытий. В Таблице 2

представлены результаты анализа. Зеленым цветом выделены параметры качества, регламентированные технической документацией.

Таблица 2 – Анализ отказов и неисправностей составных частей изделий авиационной промышленности, изготовленных из неупрочняемых алюминиевых сплавов, в результате дефектов защитных покрытий

№ п/п	Наименование неисправности или отказа	Причина неисправности или отказа	Определяющий параметр качества АОП
1	Несоответствие внешнего вида деталей или сборочных единиц	Несоответствие внешнего вида АОП	Внешний вид
2	Отслаивание лакокрасочных материалов	Низкая адгезия лакокрасочных материалов	Адгезионная способность
3	Коррозионные поражения составных частей изделия	Несоответствие качества покрытия	Защитные свойства
4	Вспучивание теплозащитного покрытия	Растрескивание АОП	Теплопроводность Теплостойкость
5	Выход из строя электрооборудования	Короткое замыкание (диэлектрический пробой)	Пробивное напряжение
6	Выход из строя трущихся составных частей изделия	Истирание АОП при работе на трение	Износостойкость
7	Заклинивание движущихся составных частей изделия	Попадание АОП между движущимися частями	

Из Таблицы 2 следует, что требований технической документации недостаточно, чтобы обеспечить качество и надежность составных частей изделий авиационной промышленности в эксплуатации. В документации не учтены параметры, учитывающие условия эксплуатации финальных изделий авиационной промышленности: теплопроводность, пробивное напряжение и износостойкость.

2.5. Выводы по ГЛАВЕ 2

На основании анализа неисправностей и отказов комплектующих изделий определены не учитываемые ранее параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность комплектующих финальных изделий в процессе эксплуатации, транспортировки и хранения. Установлено, что стандарты качества не регламентируют ряд требований, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные характеристики комплектующих финальных изделий. Существующие модели прогнозирования качества учитывают отдельные параметры, определенные стандартами качества, но не рассматривают их взаимное влияние и не учитывают ряд параметров, не регламентированных этими стандартами.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что создание модели прогнозирования и контроля параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которая комплексно учитывает, как регламентированные стандартами основные показатели качества, так и дополнительные показатели в зависимости от условий их эксплуатации, позволит сократить внутренние потери на несоответствующую продукцию, а также повысить качество производимой продукции.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

3.1. Архитектура математической модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

Модельно-ориентированный системный инжиниринг MBSE (Model-based Systems Engineering) является одной из современных методологий системной инженерии, которая позволяет описывать математическую модель, комплексно учитывающую основные показатели качества, регламентированных стандартами качества в конкретных условиях [83-86].

Для моделирования сложных систем последовательно могут использоваться несколько нотаций моделирования, рассматриваемых как страты моделирования. Взаимосвязь моделей различных нотаций осуществляется посредством применения единой политики стратификации и представления моделей. Наиболее удобным является применение опорной стратификации моделей по «принципу матрешки» – от более общих представлений к более детальным [87].

Традиционно системное моделирование начинается с построения онтологической модели – задания терминов и понятий предметной области и целевой системы [87-89]. На данном этапе проводится выделение предметной области и способ ее представления, описание моделируемой системы, дифференциация разрабатываемого продукта и системы деятельности по его созданию.

Следующим шагом является построение архитектурных моделей, которые задают структурные описания. Архитектурная модель отображает структурное устройство системы, выделяя и описывая сущности и компоненты системы и их связанности.

Методом декомпозиции получены иерархические модели таксономий функций продукта FBS (Functions Breakdown Structure), требований к продукту RBS (Requirements Breakdown Structure), компонент продукта PBS (Product Breakdown Structure) и работ по созданию продукта WBS (Work Breakdown Structure). На Рисунке 3.1 показана иерархическая модель таксономии (архитектурная модель) компонент математической модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

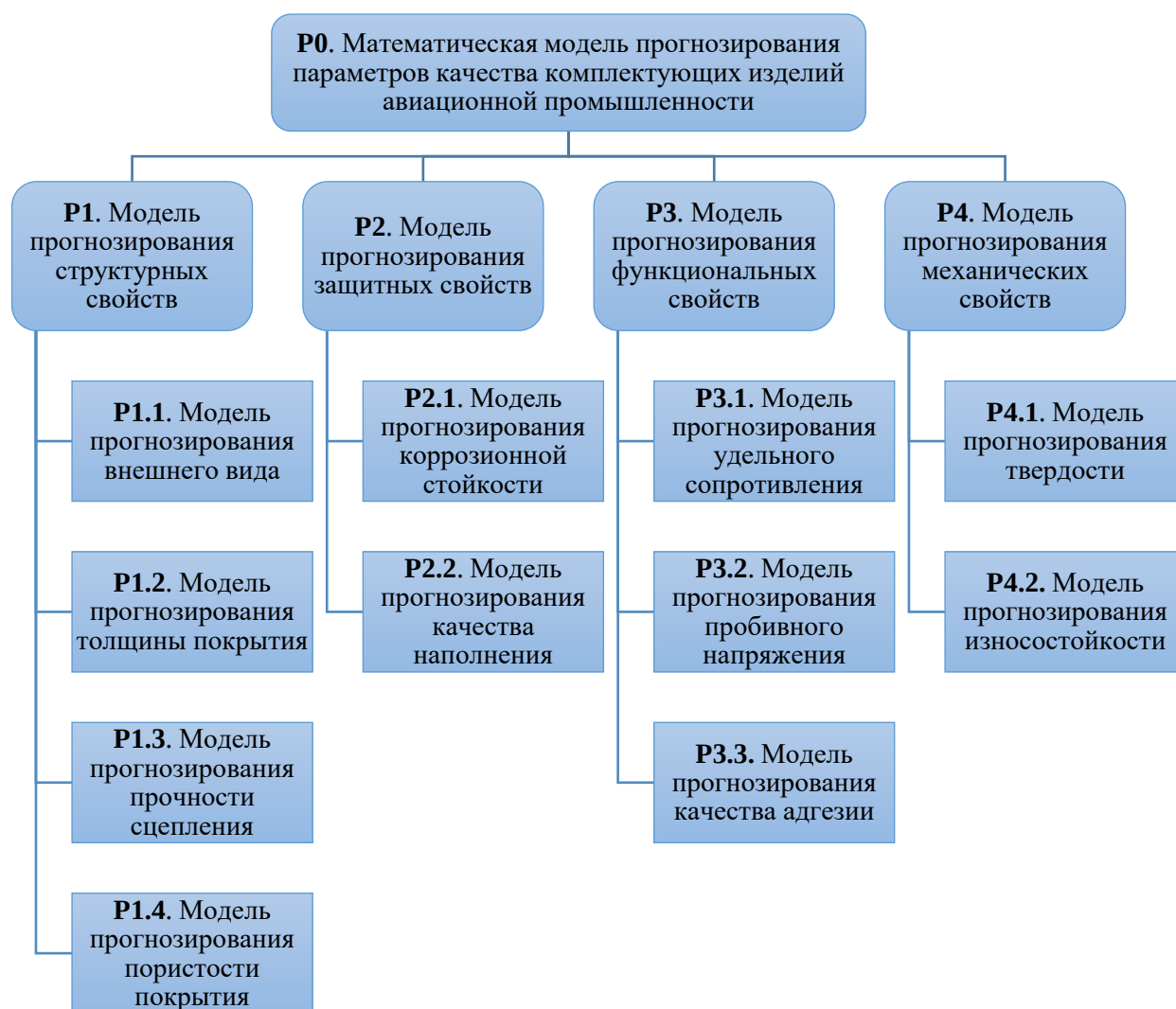


Рисунок 3.1 – Модель PBS. Иерархическая таксономия компонент математической модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

На каждом этапе моделирования важно индексировать все компоненты, что делает описания «машиночитаемыми» и адресными, и это позволит избежать ошибок на более поздних стадиях моделирования, в частности, на стадии цифровизации математических моделей.

Смоделировав состав и содержание сущностей продукта, дополним архитектурную модель представлением связанностей введенных сущностей, т.е. увяжем между собой компоненты, функции и требования. В методологии MBSE для этого применяются модели связанностей сущностей DSM (Design Structure Models).

Для представления связанностей в настоящей работе построены следующие модели:

- Таблица отношений (DSM) требований и функций RBS-FBS;
- Таблица отношений (DSM) функций и компонент FBS-PBS;
- Таблица отношений (DSM) компонент между собой PBS-PBS.

В Таблице 3 показана модель DSM связанностей компонент математической модели прогнозирования между собой.

Из Таблицы 3 видно, что основными компонентами модели, имеющими наибольшее количество связанностей с другими компонентами, являются компоненты P1.2 и P1.4 (модели прогнозирования толщины и пористости), поэтому моделирование целесообразно начинать именно с этих составляющих.

Поскольку компонента P1.3 не связана с другими компонентами, то ее следует исключить из данной модели. Действительно, прочность сцепления покрытия и основного металла будет зависеть от предварительной обработки деталей (обезжиривание, травление, осветление, промывка), поэтому данную модель целесообразно исключить.

Дальнейшее расширение архитектурной модели проводится путем привязки к компонентам иерархической таксономии метрик или атрибутов. В Таблице 4 представлены иерархии компонент с атрибутами (P,a)BS в форме таблицы с индексруемыми записями элементов сущностей P и их атрибутов a.

Таким образом, произведена параметризация ключевых сущностей рассматриваемого продукта, т.е. присвоены количественные и качественные характеристики.

Таблица 3 – Модель DSM (PBS,PBS) связанностей компонент математической модели прогнозирования качества комплектующих изделий авиационной промышленности

Компоненты продукта Р	Компоненты продукта Р										
	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P2.1	P2.2	P3.1	P3.2	P3.3	P4.1	P4.2
P1.1 Модель прогнозирования внешнего вида				■		■					
P1.2 Модель прогнозирования толщины покрытия	■			■	■		■	■	■	■	■
P1.3 Модель прогнозирования прочности сцепления											
P1.4 Модель прогнозирования пористости покрытия	■	■			■	■	■	■	■	■	■
P2.1 Модель прогнозирования коррозионной стойкости		■		■		■					
P2.2 Модель прогнозирования качества наполнения	■	■		■	■						
P3.1 Модель прогнозирования удельного сопротивления		■									
P3.2 Модель прогнозирования пробивного напряжения		■									
P3.3 Модель прогнозирования качества адгезии				■		■					
P4.1 Модель прогнозирования твердости		■		■							
P4.2 Модель прогнозирования износостойкости		■		■							
■ взаимосвязь компонентов друг с другом											

Таблица 4 – Параметризация компонент математической модели прогнозирования качества комплектующих изделий

№ и атрибуты требований	
Иерархически упорядоченные индексы и имена компонент модели продукта	Метрики и численные атрибуты
P1.1	a1. Прогнозируемый цвет покрытия в зависимости от технологических параметров анодирования, состава электролита a2. Прогнозирование наличия или отсутствия браковочных признаков (вздутий, отслоений и т.д.) в зависимости от чистоты металла, поверхности и толщины АОП
P1.2	a1. Прогнозируемая толщина АОП в зависимости от марки материала, технологических параметров анодирования, состава электролита a2. Прогнозируемое распределение толщины покрытия по поверхности детали в зависимости от температуры электролита и скорости перемешивания
P1.3	a1. Прогнозируемая прочность сцепления в зависимости от предварительной подготовки перед покрытием (обезжиривание, травление, осветление)
P1.4	a1. Прогнозируемое число пор на единицу поверхности детали в зависимости от марки материала, толщины АОП, технологических параметров анодирования, состава электролита a2. Прогнозируемая плотность АОП в зависимости от толщины АОП, технологических параметров анодирования, состава электролита
P2.1	a1. Прогнозируемое время выдержки испытательного раствора на поверхности детали до полного растворения АОП (зависит от толщины АОП)
P2.2	a1. Прогнозируемая масса АОП после операции наполнения в зависимости от толщины и пористости покрытия a2. Прогнозируемая прочность сцепления обеспечивает факт, что покрытие не окрашивается после испытаний
P3.1	a1. Прогнозируемое численное значение удельного сопротивления АОП находится в пределах $10^{10} - 10^{16}$ Ом×мм, в зависимости от толщины, пористости и структуры АОП
P3.2	a1. Прогнозируемое численное значение пробивного напряжения (не менее 250В при толщине 5-8 мкм) в зависимости от марки материала (количество легирующих элементов), чистоты поверхности (шероховатость и пористость поверхности подложки)
P3.3	a1. Величина адгезии по шкале не превышает 1 в зависимости от температуры электролита, времени анодирования
P4.1	a1. Прогнозируемое значение микротвердости, зависящее от марки материала, пористости и толщины АОП
P4.2	a1. Прогнозируемое значение удельного сопротивления к истиранию, напрямую зависящее от микротвердости и толщины АОП, технологических параметров анодирования, температуры электролита и скорости перемешивания

В дальнейшем дополнение архитектурных моделей существенными для рассмотрения качественными и количественными параметрами приводит к формированию параметризованных архитектурных моделей.

На Рисунке 3.2 представлена диаграмма связей факторов, влияющих на процесс анодного оксидирования алюминия и его сплавов, со свойствами получаемых покрытий и их параметрами качества.

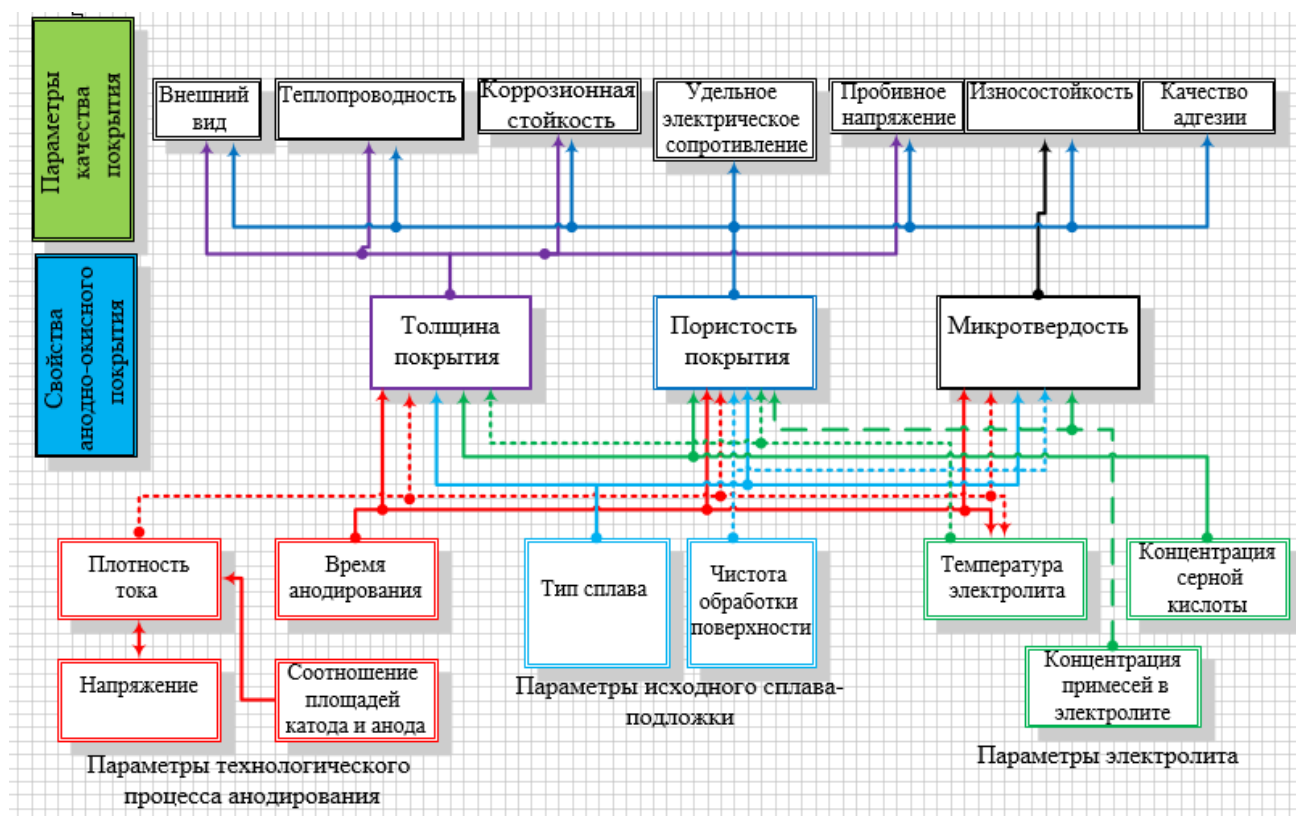


Рисунок 3.2 – Диаграмма связей определяющих факторов анодного оксидирования алюминия и его сплавов, свойств получаемых покрытий и их параметров качества, оказывающих влияние на работоспособность комплектующих финального изделия в процессе эксплуатации [90]

Анализ диаграммы связей, представленной на Рисунке 3.2, позволил установить, что ключевыми свойствами, влияющими на все параметры качества, и определенных в технической документации, и не учитываемых в ней, являются толщина, пористость и микротвердость, причем последняя влияет только на износостойкость.

3.2. Определение исходных данных для моделирования свойств и параметров качества

Исследование выполнялось для производственного процесса оксидирования (анодирования) деформируемых алюминиевых сплавов АМгЗ, АМг6 и АМц в сернокислом электролите. Изучалось влияние таких факторов, как плотность тока i_a , время анодирования τ , температура T и концентрация серной кислоты в электролите C_k , а также шероховатость поверхности Ra деталей на толщину анодно-окисного покрытия. На практике в большинстве случаев изменение исследуемого параметра зависит комплексно от нескольких факторов.

В Таблице 5 представлен журнал планирования эксперимента процесса анодирования, где пределы значений контролируемых параметров определены на основе процесса анодирования.

Таблица 5 – Экспериментальные данные процесса анодирования

Контролируемые параметры	i_a , А/м ²	τ , ч	T , К	C_k , г/л	Ra
Верхний предел	200	0,67	284	200	3,20
Нижний предел	50	0,42	294	180	0,16
Рабочее значение	100	0,5	291	195	1,00

Натурные эксперименты проводились на полуавтоматической линии анодирования гальванического участка ПАО МЗИК. Контрольные образцы размером 100×50 мм и толщиной 2 мм из исследуемых марок сплавов в количестве 3 единиц монтировались совместно с деталями на разные штанги в различные места ванны анодирования. Перед процессом анодирования проводился анализ электролита на содержание серной кислоты [91] и замер шероховатости поверхности образцов при помощи профилометра. В процессе анодирования проводился автоматический контроль температуры, силы тока и времени

анодирования при постоянном напряжении (потенциостатический режим анодирования).

Для исследования свойств и параметров качества анодно-окисных покрытий применялись методы контроля, описанные ниже.

Толщина покрытия на образцах определялась гравиметрическим методом. После анодирования контрольные образцы высушивались при температуре 60-70°C в течение 30 минут и после остывания взвешивались на аналитических весах с точностью до четвертого десятичного знака. Затем с образцов снималось покрытие в условиях, представленных в Таблице 6.

Таблица 6 – Технологические режимы и состав раствора для снятия анодно-окисного покрытия

Состав раствора, г/л	Фосфорная кислота H_3PO_4	32-37
	Хромовый ангидрид CrO_3	20-25
Температура, К	363-373	
Время, мин	≥ 10	

Отсутствие покрытия на образцах определялось методом капли [63]. В нескольких местах на образец наносились капли испытательного раствора (раствор №34, [63]). Признаком отсутствия покрытия является мгновенное изменение цвета капли от оранжевого до зеленого цвета.

После снятия покрытия образцы промывались водой, высушивались и вновь взвешивались. По разности массы образцов после анодирования и после снятия покрытия рассчитывалась масса анодного покрытия. Толщина покрытия определялась по формуле (3.1) [62]:

$$\delta = \frac{0,1 \cdot P_{cp} \cdot 1,4}{3,42} = 0,04 \cdot P_{cp}, \quad (3.1)$$

где δ – толщина покрытия мкм;

P_{cp} – средняя масса покрытия на 1 дм² поверхности, мг;

1,4 – поправочный коэффициент к плотности покрытия;

0,1 – коэффициент;

3,42 – плотность покрытия, г/см³.

Для исследования пористости покрытия применялся метод маслосъемности, основанный на определении количества масла, адсорбированного покрытием. Предварительно взвешенные образцы с неуплотненным покрытием погружались в нагретое до 130±5°С масло с кинематической вязкостью (2,5-3,5)×10⁻⁵ м²/с. Выдержка осуществлялась до того времени, пока температура масла не снизится до 20±5°С. После выдержки образцы с покрытием извлекались, с них удалялся избыток масла фильтровальной бумагой и снова взвешивались.

Пористость покрытия оценивалась по формуле (3.2):

$$\varphi = \frac{10^4 \cdot (m_2 - m_1)}{S \cdot \rho \cdot \delta}, \quad (3.2)$$

где φ – пористость покрытия, %;

m_1 – масса образца с покрытием до обработки в масле, г;

m_2 – масса образца с покрытием после выдержки в масле, г;

S – площадь образца, см²;

ρ – плотность масла, г/см³;

δ – толщина покрытия, мкм.

Измерение микротвердости проводилось с помощью микротвердомера ПМТ-3. Алмазный наконечник прибора представляет собой правильную четырехугольную пирамидку с углом между противоположными гранями 136°±20′. Микротвердость покрытия определяется площадью отпечатка, полученного при вдавливании пирамидки в покрытие. Диагональ отпечатка измеряли при 500-кратном увеличении. Микротвердость рассчитывали по формуле:

$$HV = 1,854 \cdot \frac{P}{d}, \quad (3.3)$$

где P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, г;

d – среднее арифметическое длин диагоналей отпечатка, мм.

Методы испытаний на коррозионную стойкость, износостойкость, качество адгезии, теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и пробивное напряжение описаны в параграфе 2.1.

На основе параметров процесса анодного оксидирования и свойств анодно-окисных покрытий были построены математические модели свойств анодно-окисных покрытий.

Построение математических моделей свойств анодно-окисных покрытий проводилось согласно алгоритму, описанному ниже.

Задача построения качественного уравнения регрессии, соответствующего эмпирическим данным и целям исследования, является достаточно сложным и многоступенчатым процессом. Он включает в себя три этапа:

- 1) выбор формулы уравнения регрессии;
- 2) определение параметров выбранного уравнения;
- 3) анализ качества уравнения и проверка адекватности уравнения эмпирическим данным, совершенствование уравнения [92,93].

Получены результаты измерений силы тока, температуры, времени анодирования, концентрации серной кислоты в электролите, и дополнительно – шероховатости поверхности, которые выступали в качестве факторов (независимых переменных). В качестве функции отклика (зависимой переменной) – толщина, пористость или микротвердость анодно-окисного покрытия. На основе полученных экспериментальных данных строили модель множественной линейной регрессии.

При моделировании свойств анодно-окисных покрытий в качестве основополагающей модели выбрана модель множественной линейной регрессии в виде:

$$[\delta, \gamma, HV] = b_0 + b_1\tau + b_2i_a + b_3T + b_4C_k + \varepsilon, \quad (3.4)$$

где δ – толщина АОП, мкм;

γ – пористость АОП, %;

HV – микротвердость АОП, ГПа;

b_i – коэффициент регрессионного уравнения;

τ – время анодирования, мин;

i_a – анодная плотность тока, А/дм²;

T – температура раствора анодирования, °С;

C_k – концентрация серной кислоты в ванне анодирования, г/л;

ε – остатки.

Моделирование проводилось в двух пакетах MS Excel и MATLAB.

Для оценки параметров множественной регрессии наиболее простым является метод наименьших квадратов.

Коэффициент детерминации R^2 (R -квадрат) показывает долю объясненной вариации (разброса) функции отклика относительно своего среднего. Он используется для предварительной оценки качества модели и как основа для расчета других показателей (например, F -теста для проверки качества уравнения регрессии).

Параметр P -значение используется для оценки статистической значимости коэффициентов регрессии. Если P -значение меньше заданного уровня значимости α , то коэффициент является значимым на этом уровне значимости. В противном случае коэффициент незначим на данном уровне значимости α [94].

Чтобы проверить значимость коэффициентов регрессии с применением t -статистик необходимо расчетные значения статистик сравнить с критическим значением статистики Стьюдента ($t_{\text{крит}}$) для заданного уровня значимости α и степенями свободы равными $n-k$, где n – количество наблюдений, по которым оценены параметры регрессии, k – количество коэффициентов, оцененных в уравнении регрессии [95].

Для проверки гипотезы о значимости уравнения в целом применяется статистика Фишера F . Для принятия решения о значимости уравнения регрессии в целом необходимо сравнить расчетное значение F -статистики (статистики Фишера) с ее критическим значением ($F_{\text{крит}}$). При этом если расчетное значение $F > F_{\text{крит}}$, то нулевая гипотеза о незначимости уравнения регрессии в целом отклоняется, и делается вывод, что уравнение регрессии в целом значимо.

Вывод о значимости и незначимости уравнения регрессии принимается на заданном уровне значимости α (в нашем случае 5 %), именно для этого уровня значимости указывается $F_{\text{крит}}$.

Для оценки качества построенной модели рассчитывалась средняя ошибка аппроксимации по остаткам. Таблица остатков была получена в результатах регрессионного анализа.

Расчет средней ошибки аппроксимации регрессионной модели производится по формуле (3.5):

$$\Delta = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i) / y_i}{n}, \quad (3.5)$$

где Δ – средняя ошибка аппроксимации;

y_i – фактическое значение функции отклика;

$\hat{y}_i$ – предсказанное значение функции отклика;

n – число наблюдений.

Применение метода наименьших квадратов подразумевает соблюдение следующих предпосылок:

1. Математическое ожидание случайного остатка равно нулю.
2. Дисперсия случайных остатков одинакова для различных i .
3. Случайные остатки не зависят друг от друга.
4. Случайные остатки не зависят от значений факторов, входящих в модель регрессии.
5. Остатки распределены по нормальному закону распределения.

Первые четыре условия известны как условия Гаусса-Маркова [96].

Проверка постоянства математического ожидания остатков проводилась с помощью дисперсионного анализа. Оценкой математического ожидания случайной переменной является среднее остатков. Гипотеза о значимости математического ожидания случайной переменной проверяется с помощью t -статистики. По распределению Стьюдента по заданному уровню значимости и числу степеней свободы находится критическая точка $t_{\text{крит}}$.

Если $t_{\text{набл}} > t_{\text{крит}}$, то математическое ожидание значимо.

Если $t_{\text{набл}} < t_{\text{крит}}$, то математическое ожидание незначимо.

Если данное условие нарушено, то оценки коэффициентов регрессии могут быть смещенными, поэтому для устранения этих проблем в модель регрессии следует включать свободный член.

Для проверки постоянства дисперсии остатков применялся критерий Бартлетта [97]. Оценку дисперсии для каждой точки факторного пространства (для каждого из k опытов) вычисляют по формуле:

$$S_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad (3.6)$$

где $\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}, i = 1, \dots, k$.

Количество степеней свободы у S_i^2 равно $f_i = (n_i - 1), i = 1, \dots, k$.

Когда n_i не равны между собой гипотезу $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$ равенства дисперсий проверяют с помощью M -критерия Бартлетта.

Статистика M -критерия Бартлетта имеет вид:

$$M = L \cdot \ln \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^k f_i S_i^2 \right) - \sum_{i=1}^k f_i \ln(S_i^2), L = \sum_{i=1}^k f_i. \quad (3.7)$$

Если при заданном k для всех C_1 выполняется неравенство $M < m_b$, то гипотезу H_0 о равенстве дисперсий принимают; если при заданном N для всех C_1 выполняется неравенство $m_a \leq M$, гипотеза H_0 отвергается.

Если гипотеза H_0 верна и все $n_i > 3$, то:

$$B = M \left[1 + \frac{C_1}{3(k-1)} \right]^{-1} \sim \chi_{k-1}^2, \quad (3.8)$$

где $C_1 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} - \frac{1}{L}$.

Здесь $B_{\text{крит}} = \chi_{\alpha, k-1}^2$ - верхний квантиль распределения Стьюдента. Если $B_{\text{расч}} < B_{\text{крит}}$, то гипотеза H_0 об однородности дисперсий принимается, иначе - отвергается.

Проверка некоррелированности остатков проводилась с помощью критерия Льюнга-Бокса [96]. Применение данного критерия предполагает использование Q -статистики, значение которой определяется по формуле:

$$Q = n(n+2) \sum_{\tau=1}^p \frac{r^2(\tau)}{n-\tau}, \quad (3.9)$$

где $r(\tau)$ - выборочные значения автокорреляционной функции;

τ – величина лага;

n – число наблюдений.

Q -статистика имеет χ^2 -распределение с τ степенями свободы.

Если Q -статистика меньше табличного χ^2 , то гипотеза об отсутствии автокорреляции принимается [96].

При проверке согласия ошибок с нормальным распределением применялись критерий χ^2 или критерий Колмогорова [97].

Критерий Колмогорова (критерий согласия) предназначен для сопоставления двух распределений. Критерий позволяет найти точку, в которой сумма накопленных расхождений между двумя распределениями является наибольшей, и оценить достоверность этого расхождения.

Нулевая гипотеза H_0 : различия между двумя распределениями недостоверны (по точке максимального накопленного расхождения между ними). Альтернативная гипотеза H_1 : различия между двумя распределениями достоверны. Ограничениями для данного критерия являются:

1. Критерий требует, чтобы выборка была достаточно большой. При сопоставлении двух эмпирических распределений необходимо, чтобы $n \geq 50$.
2. Разряды должны быть упорядочены по нарастанию или убыванию какого-либо признака.

В противном случае вместо критерия Колмогорова необходимо применять метод χ^2 .

Моделирование свойств анодно-окисных покрытий на деформируемых сплавах алюминия проводился в MS Excel и MATLAB. Преимущества последнего – в возможности проверки математических моделей на адекватность с помощью встроенных инструментов.

Алгоритм моделирования в среде MATLAB можно представить на Рисунке 3.3.

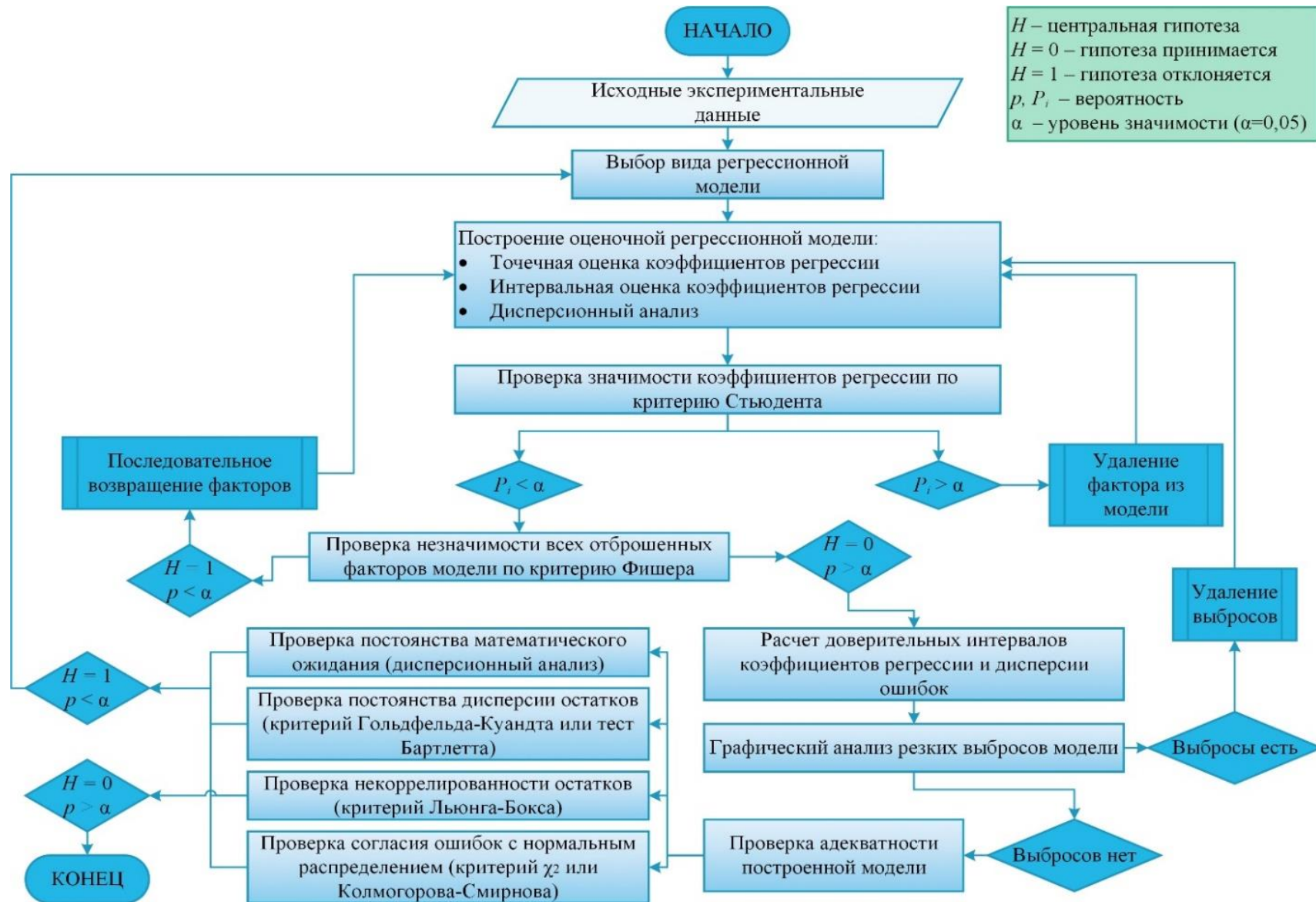


Рисунок 3.3 – Алгоритм математического моделирования свойств анодно-окисных покрытий в среде MATLAB

3.3. Математические модели свойств анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах

Математическая модель толщины анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах

Для оценки регрессионного уравнения в пакете MS Excel последовательность действий задается следующая: «Данные» – «Анализ данных» – «Регрессия». Результирующие характеристики регрессионной модели представлены на Рисунке 3.4.

ВЫВОД ИТОГОВ						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,992301518					
R-квадрат	0,984662302					
Нормированный R-квадрат	0,983459346					
Стандартная ошибка	3,028092316					
Наблюдения	56					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	4	30021,71779	7505,429447	818,5351322	1,42453E-45	
Остаток	51	467,6364969	9,169343076			
Итого	55	30489,35429				
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
У-пересечение	-25,81910169	2,995673952	-8,618795672	1,58781E-11	-31,83316797	-19,80503541
время, мин	0,243937307	0,032222105	7,570495585	6,85437E-10	0,179248732	0,308625881
I, А/дм2	36,3336344	1,157114534	31,40020571	4,98339E-35	34,01063009	38,65663871
T, °C	-0,906607708	0,116114819	-7,807855307	2,90466E-10	-1,13971793	-0,673497486
H2SO4, г/л	0,031444071	0,007659165	4,105417531	0,000145943	0,016067655	0,046820486

Рисунок 3.4 – Характеристики регрессионной зависимости толщины анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах

Таким образом, полученное уравнение регрессии для определения толщины анодно-окисного покрытия имеет следующий вид:

$$\delta = -25,819 + 0,244\tau + 36,334i_a - 0,907T + 0,031C_k, \quad (3.10)$$

где δ – толщина покрытия, мкм;

i_a – анодная плотность тока, А/дм²;

T – температура электролита, °C;

τ – время анодирования, мин;

C_k – концентрация серной кислоты, г/л.

На Рисунке 3.4 показано, что P -значение коэффициентов при всех независимых переменных значимы при заданном уровне значимости, т.к. P -значение для этих коэффициентов меньше $\alpha = 5\% = 0,05$.

В регрессионной модели (1) приведена оценка четырех коэффициентов – коэффициенты при переменных i_a , T , τ , C_k , т.е. $k = 4$. Количество наблюдений, по которым оценены параметры регрессии, равно 56 (т.е. $n = 56$). Уровень значимости α принимаем равным 5%.

Критическое значение t -статистики в пакете Excel рассчитывается с помощью функции СТЬЮДРАСПОБР. В нашем случае $t_{\text{крит}}$ для $\alpha = 0,05$ и степеней свободы $n-k=56-4$ задаем выражением $=\text{СТЮДРАСПОБР}(0,05;56-4) = 2,007$.

Как показано на Рисунке 3.4, t -статистики по модулю всех независимых переменных больше $t_{\text{крит}} = 2,007$ (t -статистика коэффициента при $i_a = 31,400 > t_{\text{крит}} = 2,007$; t -статистика коэффициента при $\tau = 7,570 > t_{\text{крит}} = 2,007$; t -статистика коэффициента при $T = |-7,808| > t_{\text{крит}} = 2,007$; t -статистика коэффициента при $C_k = 4,105 > t_{\text{крит}} = 2,007$; t -статистика свободного коэффициента $= |-8,619| > t_{\text{крит}} = 2,007$), поэтому для этих коэффициентов отклоняем нулевые гипотезы о незначимости коэффициентов регрессии (1), и заключаем, что эти коэффициенты регрессии (1) являются значимыми на 5%-ом уровне значимости.

Для проверки гипотезы о значимости уравнения в целом в таблице «Дисперсионный анализ» (Рисунок 3.4) представлена статистика Фишера F . В столбце df указаны степени свободы статистики: значение $k-1$ выведено в строке «Регрессия», $n-k$ в строке «Остаток». В нашем случае расчетное значение статистики Фишера равно $F(k-1, n-k) = F(4,51) = 818,5$. Для принятия решения о значимости уравнения регрессии в целом необходимо сравнить расчетное значение F -статистики с ее критическим значением ($F_{\text{крит}}$). При этом, если расчетное значение $F > F_{\text{крит}}$, то нулевая гипотеза о незначимости уравнения регрессии в целом отклоняется, и делается вывод, что уравнение регрессии в целом значимо. Вывод о значимости и незначимости уравнения регрессии принимается на заданном уровне значимости α (в нашем случае 5 %), именно для этого уровня значимости указывается $F_{\text{крит}}$. В Excel критическое значение статистики Фишера

рассчитывается с помощью функции ФРАСПОБР. Расчетная F -статистика находится из уравнения:

$$F = \frac{RSS/(k-1)}{ESS/(n-k)} = F_{\text{расч}}, \quad (3.11)$$

где F – статистика Фишера;

$(k-1)$ – степени свободы числителя;

$(n-k)$ – степени свободы знаменателя;

ESS – сумма квадратов остатков, т.е. не объясненная регрессией вариация отклика относительно его среднего значения (на Рисунке 3.4 значение ESS указано в колонке SS , строке «Остаток»);

RSS – объясненная регрессией вариация функции отклика относительно его среднего значения (на Рисунке 3.4 значение RSS указано в колонке SS , строке «Регрессия»);

$F_{\text{расч}}$ – расчетная статистика Фишера.

Таким образом, расчетная статистика Фишера равная $F(k-1, n-k) = F(4,51) = 818,5 > F_{\text{крит}} = 2,553$, поэтому нулевая гипотеза о незначимости в целом уравнения регрессии отклоняется, и делаем вывод о статистической значимости уравнения регрессии в целом на 5%-ом уровне значимости.

Коэффициент при переменной i_a равный 36,334 свидетельствует о том, что при росте плотности тока анодирования на 1 А/дм² толщина анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах в среднем увеличиться на 36,334 мкм, при неизменных температуре, времени анодного оксидирования и концентрации электролита. Данный результат подтверждают литературные данные [24, 25, 31], что при увеличении плотности тока возрастает и скорость нанесения покрытия (скорость формирования оксида).

Коэффициент при переменной T равный -0,907 свидетельствует о том, что при увеличении температуры электролита на 1 К толщина анодно-окисного покрытия в среднем снизиться на 0,907 мкм, при постоянстве плотности тока, времени анодного оксидирования и концентрации электролита. Данный результат хорошо согласуется с литературными данными: увеличение температуры электролита от 20 до 50°C толщина покрытий снижается более чем в 10 раз [18].

Коэффициент при переменной τ равный 0,244 свидетельствует о том, что при увеличении времени анодирования на 1 мин толщина покрытия в среднем увеличиться на 0,244 мкм, при неизменных температуре электролита, плотности тока и концентрации электролита. Данный тезис вполне логичен: чем больше продолжительность анодного оксидирования, тем больше толщина формирующегося анодно-окисного покрытия.

Коэффициент при переменной C_k равный 0,031 свидетельствует о том, что при увеличении концентрации на 1 г/л толщина покрытия в среднем увеличиться на 0,031 мкм, при неизменных прочих параметров оксидирования. Данный тезис также вполне логичен, поскольку увеличение концентрации электролита приводит к увеличению его электропроводности и снижению омического сопротивления, что в конечном итоге приводит к увеличению скорости процесса роста оксидной пленки [98].

Оценка адекватности построенной модели проводилась по остаткам в среде MATLAB согласно параграфа 3.2 данной работы.

В Таблице 7 представлены результаты проверки адекватности построенной модели толщины анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах.

Таблица 7 – Результаты проверки адекватности модели толщины анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах по различным критериям

Гипотеза	Инструмент проверки	h	p
Проверка постоянства математического ожидания остатков	Дисперсионный анализ	0	0,08÷0,66
Проверка постоянства дисперсии остатков	Тест Бартлетта	0	0,07÷0,72
Проверка некоррелированности остатков	Критерий Льюнга-Бокса	0	0,06÷0,17
Проверка согласия остатков с нормальным распределением	Критерий χ -квадрат	0	0,21

На Рисунке 3.5 представлена графическая интерпретация построенной модели и фактически полученных значений толщины анодно-окисного покрытия. Видно, что фактические значения хорошо согласуются с модельными данными. Погрешность прогнозных значений толщины не превышает 1 мкм.

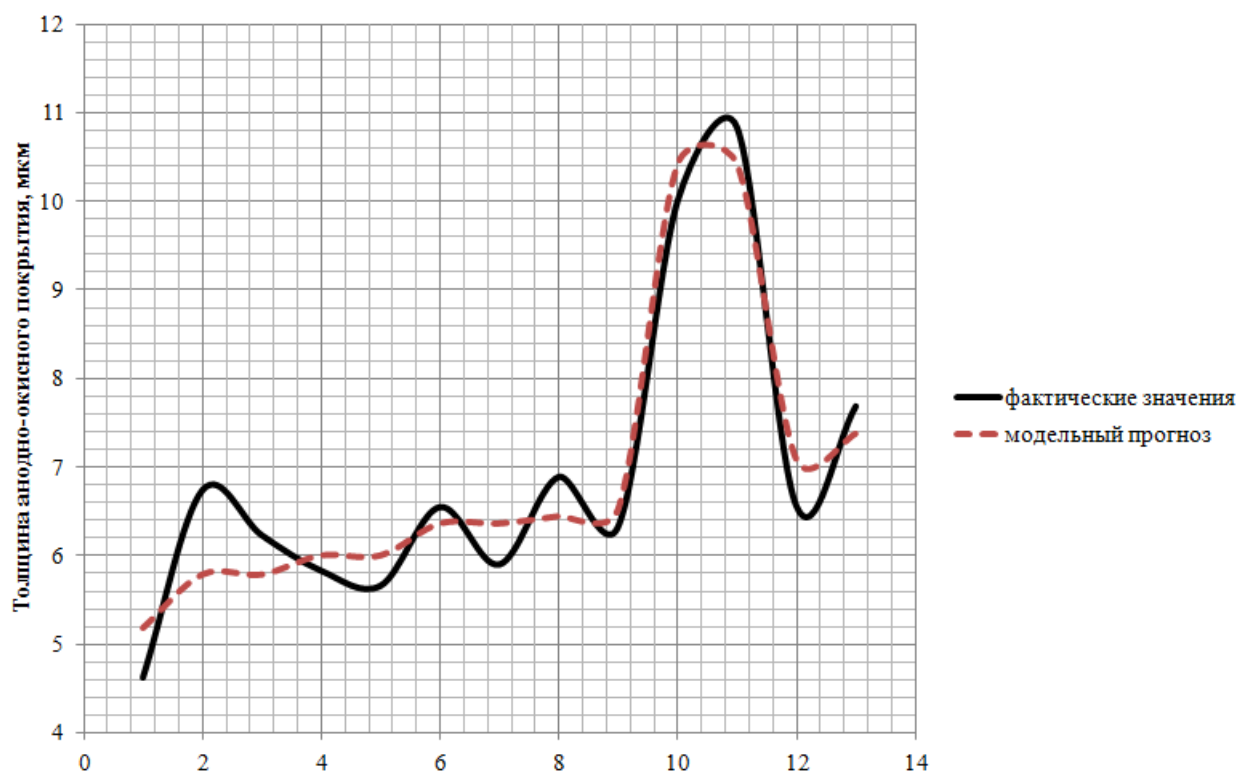


Рисунок 3.5 – Сравнение фактической толщины анодно-окисного покрытия с модельными значениями [99]

В работе [100] с использованием многофакторного эксперимента получены математические зависимости скорости роста и плотности анодно-окисного покрытия на алюминии от температуры электролита (в интервале 5-20°C), плотности анодного тока (в интервале 1-3 А/дм²) и концентрации серной кислоты (в интервале 140-160 г/л). Время анодирования составляло 90 минут для всех экспериментов.

В работе [101] представлены результаты исследований влияния температуры электролита (в интервале 21-35°C), плотности анодного тока (в интервале 1-2 А/дм²), концентрации серной кислоты (15-20 мас.%) и времени анодирования (в интервале 30-60 мин) на толщину и морфологию алюминиевых

сплавов Al7075, Al2024 и Al6061. Как отмечают авторы [101], полученные данные согласуются с результатами работы [100]. Однако расчет толщины покрытия для сплава Al6061 (наиболее близкому по свойствам к сплаву АМгб) показал, что рассчитанная по модели толщина при плотности тока 1 А/дм², температуре электролита 21°С, времени анодирования 30 мин и концентрации серной кислоты 15 мас. % составила 9,07 мкм. Фактическое измеренное значение составило 5,85 мкм, что на 35% ниже значения модельного прогноза.

Для сравнения на основании представленной в настоящей работе модели рассчитана толщина анодно-окисного покрытия для сплава Al6061 при значениях параметров работы [101]. Толщина покрытия для сплава Al6061 составила 6,8 мкм. Погрешность модельного расчета в сравнении с фактическим значением составила около 1 мкм.

Математическая модель пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах

Характеристики регрессионной модели для пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах представлены на Рисунке 3.6.

Регрессионная статистика						
Множественный R	0,957622944					
R-квадрат	0,917041703					
Нормированный R-квадрат	0,91053517					
Стандартная ошибка	1,738017286					
Наблюдения	56					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	4	1702,972427	425,7431068	140,9416794	6,57719E-27	
Остаток	51	154,0559084	3,020704086			
Итого	55	1857,028336				
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
У-пересечение	-10,18658306	1,255280868	-8,114983126	9,60833E-11	-12,70666451	-7,666501618
Ск, г/л	0,018816898	0,00571691	3,29144564	0,001813429	0,007339723	0,030294073
T, °C	0,555176079	0,044799964	12,39233311	5,27456E-17	0,4652364	0,645115758
I anode, А/дм2	1,423858425	0,177707334	8,012378498	1,38954E-10	1,067096072	1,780620778
τ, мин	0,10762329	0,010028077	10,73219594	1,09736E-14	0,087491085	0,127755495

Рисунок 3.6 – Характеристики регрессионной зависимости пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах

Полученное регрессионное уравнение для пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах имеет вид :

$$\gamma = -10,187 + 0,108\tau + 1,424i_a - 0,555T + 0,019C_k, \quad (3.12)$$

где γ – пористость покрытия, %;

i_a – анодная плотность тока, А/дм²;

T – температура электролита, °С;

τ – время анодирования, мин;

C_k – концентрация серной кислоты, г/л.

В полученной модели (Рисунок 3.6) коэффициент детерминации $R^2 = 0,917$. Это означает, что 91,7% вариации γ – пористости анодно-окисного покрытия объясняется четырьмя факторами модели (температура электролита, плотность тока, время анодирования и концентрация электролита).

P -значение всех коэффициентов при независимых переменных значимы при заданном уровне значимости, т.к. они меньше $\alpha = 0,05$.

Как представлено на Рисунке 3.6, t -статистики по модулю всех независимых переменных больше $t_{\text{крит}} = 2,007$, поэтому для всех коэффициентов отклоняем нулевые гипотезы о незначимости коэффициентов регрессии (2), и заключаем, что эти коэффициенты регрессии являются значимыми на 5%-ом уровне значимости.

Статистика Фишера равная $F(k-1, n-k) = F(4,51) = 140,9 > F_{\text{крит}} = 2,553$, что говорит о статистической значимости уравнения регрессии в целом на 5%-ом уровне значимости.

В данной модели для пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах все коэффициенты регрессии статистически значимы на 5%-ом уровне значимости. Коэффициенты имеют ожидаемые, логически оправданные знаки. Интерпретация коэффициентов логична, имеет смысл.

В Таблице 8 содержатся результаты проверки адекватности построенной модели пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах.

Таблица 8 – Результаты проверки адекватности модели пористости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах по различным критериям [102]

Гипотеза	Инструмент проверки	h	p
Проверка постоянства математического ожидания остатков	Дисперсионный анализ	0	0,10÷0,77
Проверка постоянства дисперсии остатков	Тест Бартлетта	0	0,15÷0,94
Проверка некоррелированности остатков	Критерий Льюнга-Бокса	0	0,13÷0,24
Проверка согласия остатков с нормальным распределением	Тест Колмогорова	0	0,052

Математическая модель микротвердости анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМгб

Характеристики регрессионной модели для микротвердости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах представлены на Рисунке 3.7.

Регрессионная статистика						
Множественный R	0,990870072					
R-квадрат	0,981823499					
Нормированный R-квадрат	0,980493511					
Стандартная ошибка	65,88498334					
Наблюдения	45					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	3	9613463,186	3204487,729	738,2198723	1,07724E-35	
Остаток	41	177974,0722	4340,83103			
Итого	44	9791437,258				
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
Y-пересечение	-1256,688467	61,33558151	-20,48873485	3,73633E-23	-1380,558186	-1132,818747
T, К	33,4782	1,388977406	24,10276787	7,89178E-26	30,67310322	36,28329678
I anode, А/дм2	-33,3198	12,02889719	-2,769979614	0,008384504	-57,61265071	-9,02694929
Ск, %	12,1264	0,30072243	40,32422858	1,28887E-34	11,51907873	12,73372127

Рисунок 3.7 – Характеристики регрессионной зависимости микротвердости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах

Полученное регрессионное уравнение для микротвердости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах имеет вид:

$$HV = -1256,69 - 33,32i_a + 33,48T + 12,13C_k, \quad (3.13)$$

где HV – микротвердость, ГПа;

i_a – анодная плотность тока, А/дм²;

T – температура электролита, °С;

C_k – концентрация серной кислоты, г/л.

На Рисунке 3.7 показано, что в полученной модели коэффициент детерминации $R^2 = 0,982$. Это означает, что 98,2% вариации HV – микротвердости анодно-окисного покрытия объясняется тремя факторами модели (температура электролита, плотность тока и концентрация электролита).

Как представлено на Рисунке 3.7, t -статистики по модулю всех независимых переменных больше $t_{\text{крит}} = 2,007$, поэтому для всех коэффициентов отклоняем нулевые гипотезы о незначимости коэффициентов регрессии (3), и заключаем, что эти коэффициенты регрессии являются значимыми на 5%-ом уровне значимости.

Статистика Фишера равная $F(k-1, n-k) = F(4,51) = 738,2 > F_{\text{крит}} = 2,553$, что говорит о статистической значимости уравнения регрессии в целом на 5%-ом уровне значимости.

В представленной модели для микротвердости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах все коэффициенты регрессии статистически значимы на 5%-ом уровне значимости. Коэффициенты имеют ожидаемые, логически оправданные знаки. Интерпретация коэффициентов логична, имеет смысл.

В Таблице 9 представлены результаты проверки адекватности построенной модели микротвердости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах.

Таблица 9 – Результаты проверки адекватности модели микротвердости анодно-окисного покрытия на деформируемых алюминиевых сплавах по различным критериям

Гипотеза	Инструмент проверки	h	p
Проверка постоянства математического ожидания остатков	Дисперсионный анализ	0	0,95÷0,99
Проверка постоянства дисперсии остатков	Тест Бартлетта	0	0,10÷0,26
Проверка некоррелированности остатков	Критерий Льюнга-Бокса	0	0,05÷0,06
Проверка согласия остатков с нормальным распределением	Тест Колмогорова	1	5×10^{-7}

Как видно из Таблицы 9, проверка остатков с нормальным распределением согласно тесту Колмогорова показывает, что остатки распределены не по нормальному закону распределения. Это может объясняться малым количеством значений в выборке ($n=44$). Была построена гистограмма, на которой показано, что распределение близко к нормальному (Рисунок 3.8).

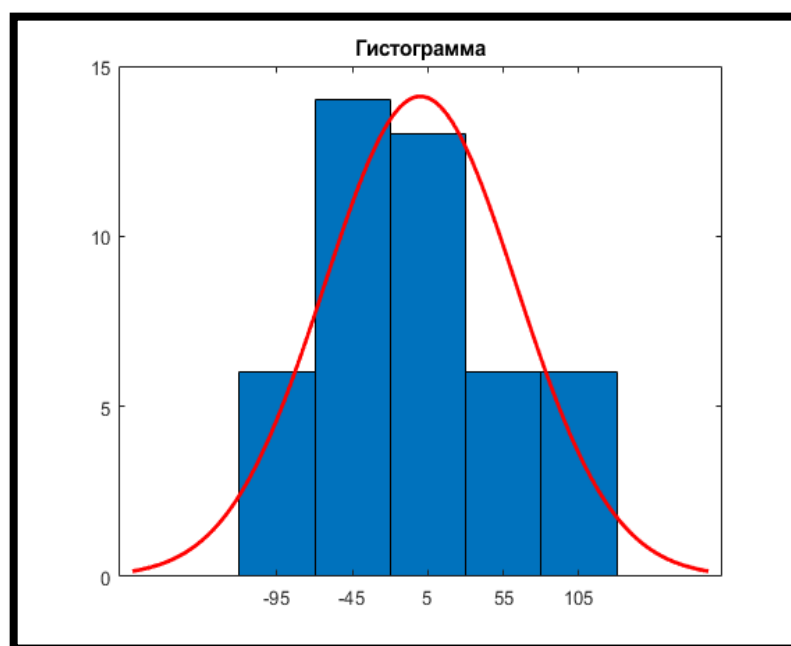


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения значений микротвердости

3.4. Математическая модель прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

На основе проведенного анализа неисправностей и отказов комплектующих финальных изделий (параграф 2.4) определены дополнительные параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность изделия в процессе эксплуатации, не учитываемые в технической документации (Рисунок 3.9), а именно – теплопроводность, пробивное напряжение и износостойкость.

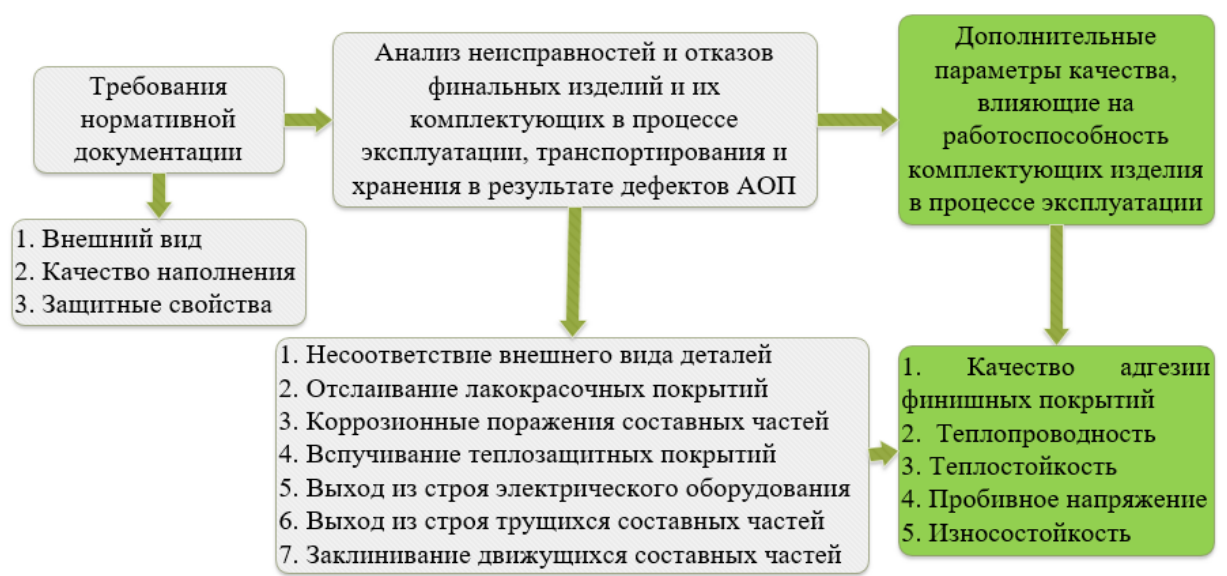


Рисунок 3.9 – Дополнительные параметры качества анодно-окисных покрытий, оказывающих влияние на работоспособность изделия в процессе эксплуатации

Показано, что внешний вид (цвет) покрытия зависит от степени наполнения анодно-окисного покрытия, которая определяется толщиной и пористостью анодной пленки.

Выявлено, что режимы анодного оксидирования оказывают незначительное влияние на адгезию лакокрасочных покрытий (далее – ЛКП), в отличие от степени наполнения. Экспериментальные данные, полученные при наполнении покрытия в дистиллированной и водопроводной воде, показывают, что адгезия ЛКП к окисной пленке, наполненной в дистиллированной воде, оценивается 4-5 баллами, а

наполненной в водопроводной воде не превышает 1-2 баллов. Низкая адгезия ЛКП к покрытиям, наполненным в водопроводной воде, связана с наличием в ней растворенных солей. Добавка $K_2Cr_2O_7$ в водопроводную воду для наполнения анодных пленок улучшает адгезию ЛКП в том случае, когда его концентрация выше 1 г/л. Установлено, что степень адгезии ЛКП, как и защитные свойства покрытий, не зависят от толщины и пористости АОП и остается величиной постоянной, удовлетворяющей требованиям нормативной документации, вне зависимости от концентрации $K_2Cr_2O_7$ в ванне наполнения. Степень наполнения оказывает влияние только на цвет покрытия.

При моделировании дополнительных параметров качества покрытий, полученных методом анодного оксидирования в сульфатном растворе на неупрочняемых деформируемых сплавах алюминия, в качестве основополагающей модели выбрана модель множественной линейной регрессии в виде:

$$[\lambda, U_{пр}, W_a] = b_0 + b_1\delta + b_2\gamma + b_3HV + \varepsilon, \quad (3.14)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К);

$U_{пр}$ – пробивное напряжение, В;

W_a – абразивный износ, мг/мкм;

δ – толщина АОП, мкм;

γ – пористость АОП, %;

HV – микротвердость АОП, ГПа;

b_i – коэффициенты регрессионного уравнения;

ε – остатки.

Таким образом, модель прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которая учитывает дополнительные параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность финального изделия и его комплектующих в процессе эксплуатации, – теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \lambda = 62,92 - 0,22\delta \\ U_{\text{пр}} = -0,37\delta^2 + 39,98\delta - 18,86, \\ W_a = 2,41\delta - 0,042HV \end{cases} \quad (3.15)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение, В;

W_a – абразивный износ, мг;

δ – толщина покрытия, мкм;

HV – микротвердость покрытия по Виккерсу, ГПа.

Из системы уравнений (19) следует, что коэффициент теплопроводности зависит только от толщины и не зависит от пористости. Это объясняется тем, что поры пропитаны бихроматом калия, поэтому гидратированы и содержат воздух (коэффициенты $\lambda=0,6$ и $0,022$ Вт/(м·К) для воды и воздуха, соответственно) [103].

Дополнительно была исследована теплостойкость анодно-окисных покрытий на неупрочняемых деформируемых алюминиевых сплавах. Результаты представлены в Таблице 10.

Таблица 10 – Теплостойкость анодированных образцов, полученных в растворе серной кислоты

δ , мкм	Качество покрытия* при температуре, °С				
	90	130	150	200	350
6	A	B	C	C	C
10	A	B	C	C	C
25	A	B	C	C	C
40	A	B	C	C	C
* A – явное повреждение отсутствует; B – незначительное повреждение; C – растрескивание.					

Как показано в Таблице 10, при температуре свыше 150°C анодно-окисные покрытия растрескиваются, т.к. коэффициент температурного расширения оксида алюминия составляет только 20% от коэффициента теплового расширения алюминия. Растрескивание нежелательно только для декоративных поверхностей комплектующих изделий или на поверхностях, рассчитанных на максимальную коррозионную стойкость. Данные результаты хорошо согласуются с литературными данными [25].

На Рисунке 3.10 представлена зависимость пробивного напряжения алюминиевых сплавов (АМг3, АМг6, АМц, Д16) от толщины анодно-окисного покрытия.

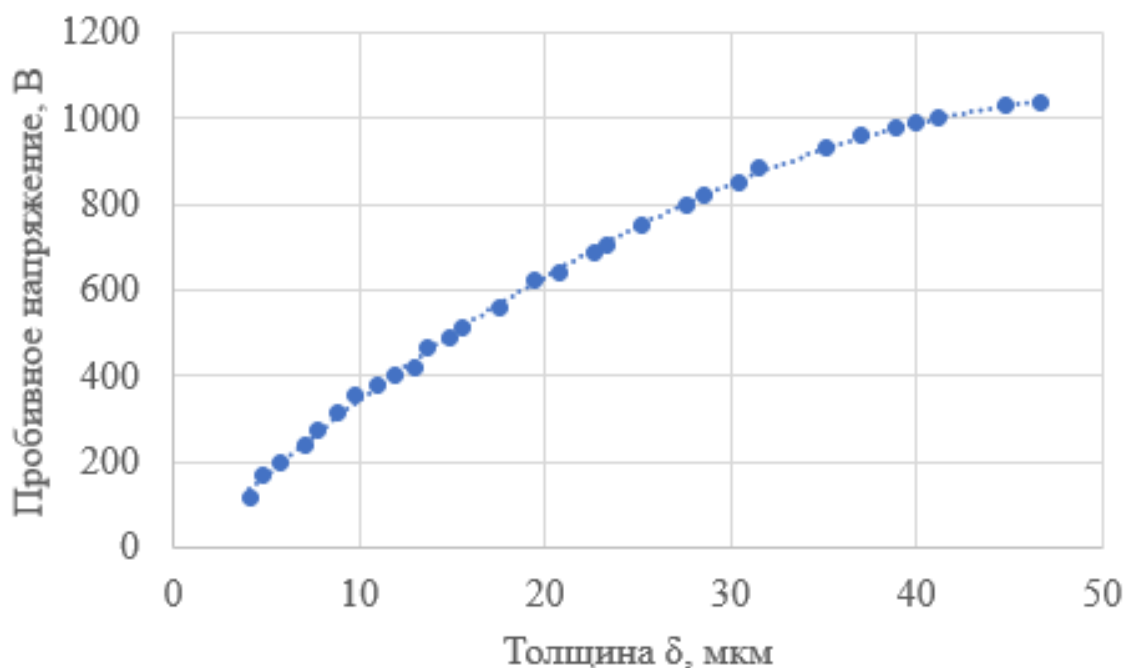


Рисунок 3.10 – Зависимость пробивного напряжения от толщины анодно-окисного покрытия

Уравнение (3.15) получено из значений пробивных напряжений анодных пленок, полученных при различных режимах анодного оксидирования на сплавах АМг3, АМг6, АМц, Д16. Как видно из Рисунка 3.10, пробивное напряжение покрытий, полученных в растворе серной кислоты и пропитанных раствором хромпика, не зависит от режима анодного оксидирования, а также от марок

(состава) анодируемых сплавов, а зависит лишь от толщины покрытия. С увеличением толщины покрытия прирост пробивного напряжения, отнесенный к единице толщины анодной пленки, несколько уменьшается.

На основе проведенных исследований, анодно-окисные покрытия можно классифицировать в зависимости от функциональных свойств и условий эксплуатации комплектующих финальных изделий.

По функциональным свойствам анодно-окисные покрытия можно разбить на виды:

- Защитные ($\delta = 9-40$ мкм) – требования предъявляются только по стойкости к коррозии.
- Защитно-декоративные ($\delta = 9-40$ мкм) – требования предъявляются не только по стойкости к коррозии, но и к внешнему виду.
- Тонкослойные ($\delta = 9-15$ мкм и менее) – применяется как промежуточный подслой под окраску для адгезии ЛКП, или для придания декоративного вида после покрытия в виде глянцевой поверхности.
- Твердые ($\delta = 50-60$ мкм) – первоначально необходима микротвердость поверхности повышенных значений (могут быть электроизоляционными).
- Электроизоляционные ($\delta = 40-120$ мкм) – предъявляются требования к пробивному напряжению в зависимости от условий эксплуатации.

Исходя из экспериментальных и фактических данных минимальная толщина защитных и защитно-декоративных оксидных покрытий, обеспечивающих защиту изделий, выбирается согласно условиям эксплуатации [18]:

- В закрытых помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями – 9 мкм.
- На открытом воздухе в сельской, лесной, горной местности вдали от промышленных объектов – 15 мкм.
- На открытом воздухе в городской и приморской атмосфере – 21 мкм.
- На открытом воздухе в промышленной атмосфере северного побережья (хлориды не менее $10 \text{ мг}/(\text{м}^2 \times \text{сутки})$) с продолжительным увлажнением – 24 мкм.

- При нанесении лаков и красок допускается уменьшение толщины покрытия до 9 мкм при эксплуатации на открытом воздухе и до 15 мкм в морской атмосфере.

Выше перечисленные параметры обуславливают минимальную толщину 15 мкм в качестве нижнего граничного условия для толщины. Верхний предел толщины ($\delta \leq 75$ мкм) обусловлен тем, что свыше данного значения возможно образование трещин на покрытиях повышенной толщины и повышением уровня несоответствий деталей, имеющих острые края, что резко уменьшает защитные свойства от коррозии и электроизоляционную способность, а также износостойкость.

При снижении пористости ниже 5% покрытие плохо наполняется хроматами, что приводит к несоответствию внешнего вида, завышенная же пористость свыше 25% снижает микротвердость поверхностного слоя, что влечет за собой снижение износостойкости.

Определены граничные условия для каждого свойств и параметров качества АОП, позволяющих обеспечить работоспособность составных частей изделий машиностроения в процессе эксплуатации, транспортирования и хранения (Таблица 11).

Таблица 11 – Граничные условия свойств и параметров качества АОП

№ п/п	Наименование свойства или параметра качества АОП, ед. изм.	Граничные условия
1	Толщина, мкм	$15 \leq \delta \leq 75$
2	Пористость, %	$5 \leq \gamma \leq 25$
3	Микротвердость, ГПа	$HV \geq 3$
4	Абразивный износ, мг	$W_a \leq 200$
5	Пробивное напряжение, В	$U_{пр} \geq 300$
6	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м×К)	$\lambda \geq 40$

3.5. Выводы по ГЛАВЕ 3

1. Методами модельно-ориентированного системного инжиниринга получена диаграмма связей факторов, влияющих на процесс анодного оксидирования алюминия и его сплавов, со свойствами получаемых покрытий и их параметрами качества. Анализ диаграммы позволил установить, что ключевыми свойствами, влияющими на параметры качества анодно-окисных покрытий, являются толщина, пористость и микротвердость, причем последняя влияет только на износостойкость.

2. Получены уравнения множественной линейной регрессии для ключевых свойств анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах и проведена проверка адекватности полученных регрессионных уравнений.

3. Разработана модель прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которая учитывает дополнительные параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность финального изделия и его комплектующих в процессе эксплуатации.

ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РЕАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

4.1. Методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий

Разработана методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий, которая включает модель прогнозирования и контроля параметров качества. Предлагаемая методика, графически представленная на Рисунке 4.1, определяет порядок действий производственного персонала, обслуживающего производственную линию анодирования, при изменении требований к параметрам качества комплектующих изделий.

Рассмотрим методику прогнозирования параметров качества комплектующих изделий более детально.

1. Монтаж на подвеску.

Предварительно гальваник осуществляет монтаж комплектующих изделий на подвесочные приспособления. Подвесочные приспособления предназначены для завешивания деталей в объем ванны и для подвода тока к деталям. Выбор приспособлений для монтажа деталей осуществляется гальваником с учетом ряда особенностей процесса. Подвесочные приспособления должны:

- Давать возможность быстрого монтажа деталей;
- Обеспечивать надежность крепежа деталей для сохранения на подвеске при переносе и обеспечения надёжного электрического контакта с при газовыделении, барботаже электролита, случайных толчках и т.п.;



Рисунок 4.1 – Схематическое изображение методики прогнозирования параметров качества комплектующих изделий

- Обеспечивать равномерность распределения тока по поверхности деталей, что способствует нанесению покрытия, которое более равномерно по толщине и свойствам;
- Сводить к минимуму экранирование деталей друг другом;
- Давать возможность максимальной загрузки ванны;
- Позволять наносить покрытие на детали по всему производственному циклу с минимальным количеством перемонтажа на смежные приспособления.

При выборе оптимального расположения деталей на подвесочном приспособлении гальваник должен следовать следующим соображениям.

1) Детали необходимо располагать на подвеске таким образом, чтобы обеспечить наиболее равномерное распределение тока по их поверхности. Все острые кромки и резкие выступы необходимо направлять вверх или в сторону промежутка между двумя анодами, размещенными напротив подвески. Эти места, склонные к пригару вследствие того, что локальная плотность тока здесь будет максимальной, могут быть защищены соседней деталью или близко размещенным неизолированным участком подвески, которые будут оттягивать на себя часть тока, движущегося к защищаемым местам детали. В особых случаях, когда данные мероприятия оказываются недостаточными или неприменимыми, следует применять дополнительные аноды, экраны или биполярные электроды.

2) Детали не должны экранировать друг друга на подвеске. При монтаже деталей на подвеске в двух плоскостях детали одной плоскости должны располагаться напротив зазора между деталями в другой плоскости, т.е. в «шахматном» порядке. Зазор между плоскостями необходимо делать максимальным.

3) Расстояния между плоскими деталями должны быть порядка 15-30 мм. Детали цилиндрической формы должны находиться друг от друга на расстоянии 1-2 радиусов деталей.

4) Детали должны быть крепко зафиксированы на подвеске.

5) В стремлении обеспечения максимального заполнения подвески деталями нельзя допускать её перегрузки как по механической прочности, так и по величине токовой нагрузки на токоподводящие элементы подвески.

6) Для снижения уноса раствора электролита из ванны детали необходимо размещать на подвеске так, чтобы вытекание раствора в нижней части деталей происходило преимущественно с угла или ребра. Это увеличивает скорость вытекания раствора на 10-20% и уменьшает остаточное (нестекаемое) количество раствора на деталях.

7) Детали с углублениями или полостями, в которых может скапливаться выделяющийся газ и образовываться воздушный пузырь, завешивают таким образом, чтобы пузырь мог свободно выходить. Если такое положение придать детали невозможно, то в процессе покрытия деталь нужно периодически переворачивать.

8) Если подвеска загружена неполностью или производится покрытие единичной детали, необходимо учитывать расположение деталей не только относительно анодов, но и относительно дна и стенок ванны. При монтаже ближе к зеркалу электролита локальная плотность тока на нижней части детали будет максимальной, что может приводить к нарастанию большей толщины покрытия и как результат к пригару в этом месте. При монтаже ближе к дну ванны тоже самое будет происходить на верхней части детали. На детали, сдвинутой по длине ванны к одной торцевой стенке, такое же ухудшение качества покрытия будет происходить на конце детали, обращённом к более дальней торцевой стенке.

После монтажа деталей на подвесочные приспособления их монтируют на анодную штангу оператора гальванической линии. Для обеспечения надежного контакта анодная штанга должна быть зачищена металлическими щетками. Вследствие агрессивности электролита анодирования плохой контакт между подвесочными приспособлениями и деталями может привести к растравливанию деталей и появлению неисправимого брака.

2. Замер температуры электролита.

Замер температуры электролита осуществляется гальваником непосредственно перед нанесением покрытия с помощью спиртового термометра (интервал измерения температур 0-100°C) или автоматического датчика температуры (при наличии). Применение ртутного термометра запрещено.

Перед замером температуры необходимо убедиться, что осуществляется перемешивание электролита (открыт вентиль подачи сжатого воздуха на ванне и присутствуют газовые пузыри на зеркале электролита).

3. Замер концентрации электролита.

Определение концентрации электролита осуществляется гальваником или лаборантом производственного участка. Анализ электролита на содержание серной кислоты производится 1 раз в начале каждой смены, на содержание примесей алюминия (не более 25 г/л), железа (не более 2 г/л), хлоридов (не более 1 г/л), меди (не более 0,02 г/л) – один раз в месяц.

Анализ на содержание примесей железа, хлоридов и меди проводится по необходимости, поскольку наличие данных примесей сразу отражается на качестве анодно-окисных покрытий и это видно невооруженным глазом после процесса анодирования в виде дефектов на покрытии. А именно: при содержании ионов Fe^{3+} в электролите свыше 2 г/л происходит растравливание покрытия; при наличии ионов Cl^- на покрытии наблюдается питтинг и темные пятна; в то время как присутствие меди в электролите приводит к появлению темных полос и пятен на покрытии.

Ежедневный анализ электролита на содержание серной кислоты производит гальваник в начале смены путем измерения плотности и температуры электролита. Контроль температуры электролитов проводился с помощью термометра ЛТ-300-Т (ООО «Термэкс», РФ). Плотность электролитов измеряется с применением ареометров АОН-1 (ПАО «Химлаборприбор», РФ).

Расчет концентрации серной кислоты производится по формуле:

$$C_k = \frac{\rho - 1,0164 + 0,00059 \cdot T}{0,000591}, \quad (4.1)$$

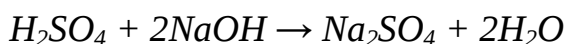
где C_k – концентрация серной кислоты в растворе анодирования, г/л;

ρ – измеренная плотность раствора, г/см³;

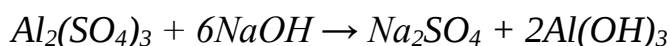
T – измеренная температура раствора, °C.

Полный химический анализ раствора анодирования проводится лаборантом производственного участка 1 раз в месяц по следующей методике.

Определение общего содержания сульфатов проводят титрованием пробы электролита едким натром в присутствии фенолфталеина.

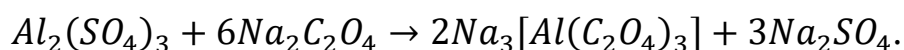
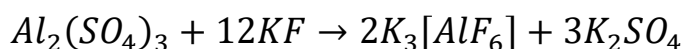


При этом образующийся в процессе работы электролита сульфат алюминия также взаимодействует со щелочью:



Для анализа в коническую колбу на 250 мл отбирают 10 мл электролита, разбавленного в 10 раз (1 мл исходного электролита), добавляют 50 мл дистиллированной воды, 2-3 капли фенолфталеина и титруют 0,5 н. раствором едкого натра до появления не исчезающей бледно-розовой окраски раствора.

Для определения содержания свободной серной кислоты ионы алюминия связывают предварительно в комплекс фторидом калия или оксалатом натрия:



10 мл электролита, разбавленного в 10 раз, отбирают в мерную колбу на 250 мл, добавляют 30 мл дистиллированной воды, 20 мл 50% раствора фторида калия, 2-3 капли фенолфталеина и титруют 0,5 н. раствором едкого натра до появления не исчезающей бледно-розовой окраски раствора.

Содержание свободной серной кислоты и алюминия рассчитывают по следующим формулам:

$$H_2SO_4(\Gamma/\text{л}) = \frac{C \cdot V_2 \cdot 49,035}{V_{\text{пр}}}, \quad (4.2)$$

$$Al^{3+}(\Gamma/\text{л}) = \frac{C \cdot (V_1 - V_2) \cdot 89,933}{V_{\text{пр}}}, \quad (4.3)$$

где V_1 – объем раствора едкого натра, израсходованного на титрование в отсутствие комплексообразующих добавок, мл;

V_2 – объем раствора едкого натра, израсходованного на титрование в присутствии комплексообразующих добавок, мл;

C – нормальная концентрация раствора едкого натра (ориентировочно 0,5н.);

$V_{\text{пр}}$ – объем пробы электролита для анализа (1 мл).

Определение железа Fe^{3+} проводят перманганатометрическим методом. Метод основан на восстановлении Fe^{3+} до Fe^{2+} цинком и последующим титрованием его перманганатом калия KMnO_4 до появления бледно-розовой окраски.

К 10 мл электролита в конической колбе на 250 мл добавляют 100 мл воды, 3-5 гранул цинка и подогревают до кипения 15 мин. Быстро отфильтровывают раствор через фильтр «красная лента» с несколькими гранулами цинка, промывают фильтр двумя небольшими порциями воды и титруют 0,1 н. раствором перманганата калия до появления бледно-розовой окраски.

Содержание железа рассчитывают по формуле:

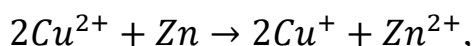
$$\text{Fe}^{3+} (\text{г/л}) = \frac{C_{\text{н}} \cdot V \cdot 55,85}{V_{\text{пр}}}, \quad (4.4)$$

где V – объем раствора перманганата калия, израсходованного на титрование, мл;

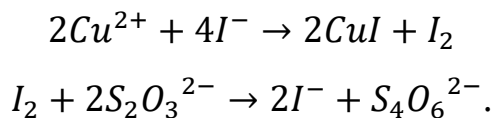
$C_{\text{н}}$ – нормальная концентрация раствора перманганата калия (ориентировочно 0,1н.);

$V_{\text{пр}}$ – объем пробы электролита для анализа (10 мл).

Определение содержания меди в электролите сульфатного окислирования проводить йодометрическим методом. Медь контактно выделяют цинком



затем растворяют в кислоте и восстанавливают медь (II) иодидом калия до меди (I), а выделившийся йод титруют тиосульфатом натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ в присутствии крахмала.



10 мл электролита переносят в коническую колбу емкостью 250 мл, добавляют 5 мл концентрированной серной кислоты, несколько гранул цинка и кипятят 10 мин. Бурый хлопьевидный осадок меди отфильтровывают через фильтр «красная лента» (на фильтр кладут гранулу цинка во избежание окисления меди), промывают холодной водой и растворяют в азотной кислоте (1:1). Добавляют 10

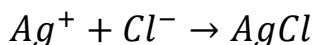
мл концентрированной серной кислоты и выпаривают до появления белых паров, охлаждают, обмывают стенки колбы небольшим количеством воды и снова выпаривают для полного удаления азотной кислоты. Раствор разбавляют водой до 150 мл, насыпают кристаллического 2 г иодида калия, выдерживают в темном месте 5 мин, добавляют раствор крахмала и титруют выделившийся йод 0,1 н. раствором тиосульфата натрия до исчезновения синей окраски крахмала. Содержание меди рассчитывают по формуле:

$$Cu^{2+} (\Gamma/\text{л}) = \frac{C_n \cdot V \cdot 63,55}{V_{\text{пр}}}, \quad (4.5)$$

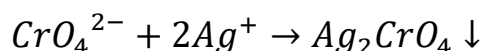
где V – объем раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование, мл;
 C_n – нормальная концентрация раствора тиосульфата натрия (ориентировочно 0,1 н.);

$V_{\text{пр}}$ – объем пробы электролита для анализа (10 мл).

Определение содержания хлоридов выполняют аргентометрическим методом. Метод основан на осаждении труднорастворимых солей серебра с хлорид- и хромат- ионами. Осаждение проводят нитратом серебра в присутствии хромат-ионов:



После связывания всего хлора хромат калия K_2CrO_4 с избытком нитрата серебра образует красно-бурый осадок хромата серебра:



Для анализа отбирают 25 мл электролита без разведения в мерную колбу на 250 мл, добавляют 50 мл воды, 0,5 мл 5% раствора хромата калия и титруют 0,05 н. раствором нитрата серебра до появления бурой окраски осадка. Содержание хлорид-ионов рассчитывают по формуле:

$$Cl^- (\Gamma/\text{л}) = \frac{C_n \cdot V \cdot 35,45}{V_{\text{пр}}}, \quad (4.6)$$

где V – объем раствора нитрата серебра, израсходованного на титрование, мл;
 C_n – нормальная концентрация раствора нитрата серебра (ориентировочно 0,05 н.);

$V_{\text{пр}}$ – объем пробы электролита для анализа (25 мл).

4. Расчет площади деталей.

Расчет площади деталей производится гальваником на основе исходных данных из технологической документации (спецификация на гальваническое покрытие), в которой указан номенклатурный номер, материал детали, геометрические размеры, площадь покрываемой поверхности одной детали.

5. Модель прогнозирования параметров качества.

Моделирование технологических параметров процесса анодирования производит технолог или мастер (старший мастер) производственного участка. Алгоритм моделирования представлен на Рисунке 4.2.

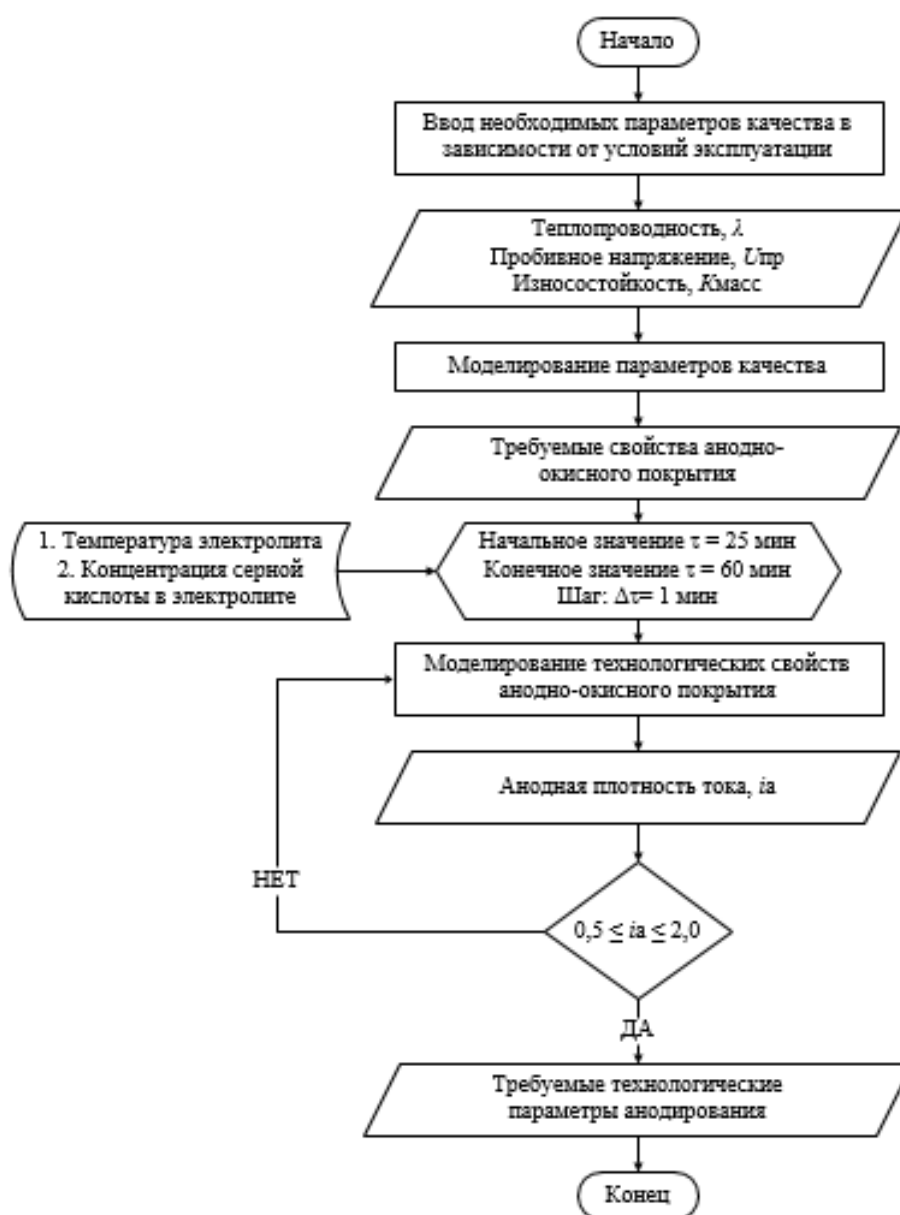


Рисунок 4.2 – Алгоритм работы модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

Полученные технологические параметры процесса анодирования (сила тока, время анодирования) мастер (старший мастер) производственного участка включает в сменное задание гальванику.

6. Проведение процесса анодирования, включая подготовительные и финальные операции уплотнения.

Технологический процесс анодирования алюминия и его сплавов состоит из подготовительных операций, собственно оксидирования и финишной (заключительной) обработки полученной оксидной пленки. После каждой операции предусматривается межоперационная промывка для удаления остатков солей.

На Рисунке 4.3 представлена принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования неупрочняемых деформируемых сплавов алюминия, в которой указаны только технологические ванны с требуемыми технологическими параметрами ведения каждого процесса за исключением межоперационных промывок.

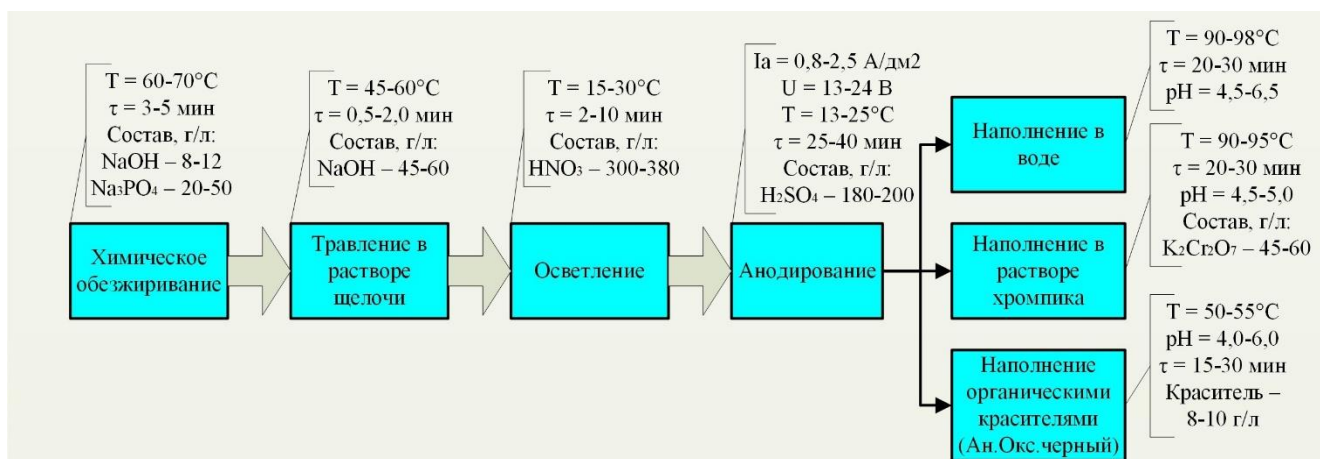


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема технологического процесса анодного оксидирования неупрочняемых деформируемых сплавов алюминия

В ванне анодирования гальваник производит нанесение анодно-окисного покрытия на детали по технологическим параметрам согласно сменного задания (рассчитанные по модели прогнозирования и контроля качества).

7. Контрольные операции.

На первой подвеске в смене (первый технологический цикл) контролю подвергаются все параметры качества, регламентированные технической документацией (внешний вид, степень наполнения, защитные свойства), а также дополнительные параметры качества (теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость) для верификации модели прогнозирования и контроля параметров качества.

На последующих технологических циклах контролю подвергается только внешний вид.

Таким образом, методика применения модели прогнозирования и контроля параметров качества комплектующих изделий позволяет:

1. Оценить применимость производственного процесса, удовлетворяющего требованиям заказчика.
2. Определить необходимые действия производственного персонала для управления производственным процессом, удовлетворяющего требованиям заказчика.
3. Прогнозировать параметры качества в зависимости от выбранных условий производственного процесса.
4. Реорганизовать процесс контроля качества путем снижения числа контрольных операций.

4.2. Алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

Разработан алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, который позволяет повысить качество комплектующих изделий авиационной промышленности (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

Выбор требований в зависимости от условий эксплуатации комплектующих изделия осуществляется конструктором или заказчиком. На основании классификации анодно-окисных покрытий по полученным требованиям технолог или мастером (старшим мастером) производственного участка оценивается применимость методики прогнозирования и контроля параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

При положительных результатах прогнозирования технолог или мастер выдают сменное задание гальванику и выполняется работа по методике прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, описанной в параграфе 4.1.

При отрицательных результатах производится корректировка требований на основании экспертного мнения заказчика. Если корректировка требований невозможна, то комплектующие передаются на изготовление сторонним организациям, производственные возможности которых позволят обеспечить необходимые параметры качества в зависимости от требуемых условий эксплуатации. Поиск и выбор подходящей сторонней организации осуществляется специалистами Отдела Главного Химика.

После нанесения анодно-окисного покрытия на комплектующие изделий авиационной промышленности по методике прогнозирования проводится контроль по дополнительным параметрам качества (при условии, что обработана первая подвеска в смену) или контроль внешнего вида (если подвеска не первая).

При положительных результатах контроля комплектующие отправляются на следующий передел согласно технологическому маршруту изготовления.

При отрицательных результатах контроля технолог или мастер (старший мастер) принимает решение о причинах появления несоответствий и мерах по их устранению.

С целью анализа и систематизации несоответствий анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, полученных из сернокислого электролита на гальваническом участке ПАО МЗИК, применялись инструменты статистического анализа.

Далее приводится анализ результатов контроля качества анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, нанесенных методом анодного оксидирования в сернокислом электролите на участке гальванопокрытий ПАО МЗИК в период с сентября 2021 по август 2023 года включительно.

Для сбора и систематизации данных по контролю качества анодно-окисных покрытий на алюминиевых сплавах использовались контрольные листки. Для выявления основной проблемы и причин несоответствий был проведен анализ с использованием диаграммы Парето. Для определения наиболее значимых дефектов был применен групповой метод анализа причин, также известный как метод «мозгового штурма», и была построена причинно-следственная диаграмма Исикавы. Основные принципы и методики построения диаграмм Парето и Исикавы подробно описаны в [17].

Для построения диаграммы Парето обнаруженные дефекты были рассортированы по 11 группам. Результаты данных контроля, послужившие исходными данными для построения диаграммы Парето, представлены в Таблице 12.

Таблица 12 – Начальная информация для создания диаграммы Парето

Код дефекта	Вид дефекта	Число дефектов
1	Сползание или рыхлость покрытия	27
2	Отсутствие пленки Отсутствие покрытия на отдельных участках детали Тонкое покрытие (недостаточная толщина) в виде радужных пятен Низкая коррозионная стойкость покрытия (не выдерживает капельную пробу)	61
3	Питтинг, темные пятна и растравливание покрытия	45
4	Растравливание покрытия	34
5	Темные полосы и пятна на покрытии	22
6	Темный налет в виде точек и пятен	14

Таблица 12 (окончание)

7	Прижог, прогар (цвета побежалости, пятна)	7
8	Серый порошкообразный налет на деталях	3
9	Темные полосы на профилях, выявляющиеся после анодирования	8
10	Темное покрытие	9
11	Хрупкость покрытия	17

Диаграмма Парето на Рисунке 4.5 отображает обнаруженные дефекты анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах на гальваническом участке ПАО МЗИК за период с сентября 2021 по август 2023 года.

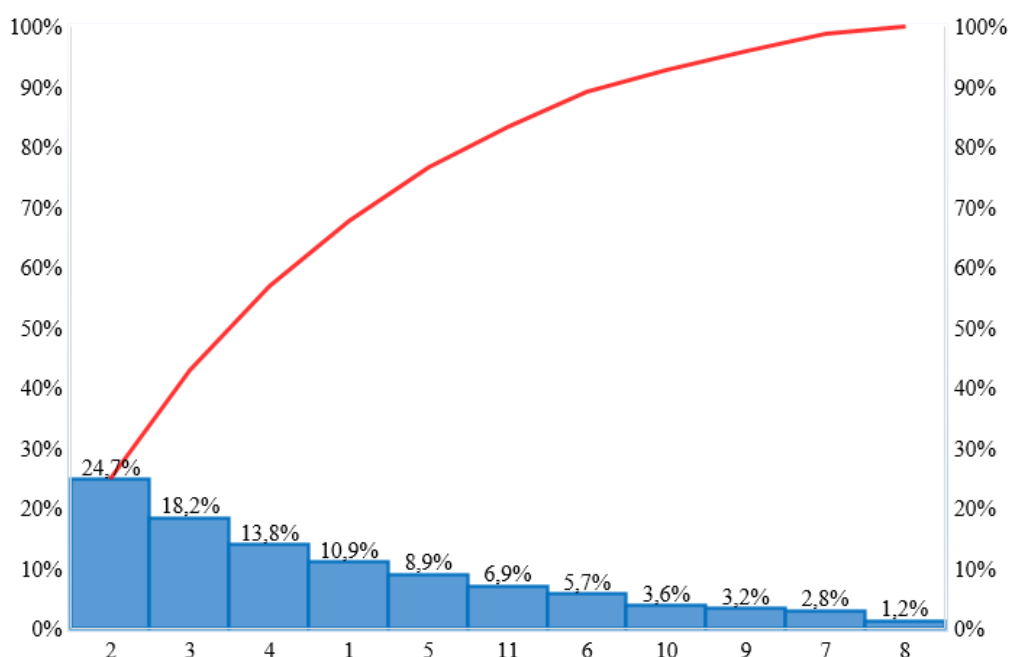


Рисунок 4.5 – Диаграмма Парето по дефектам оксидных покрытий на гальваническом производстве ПАО МЗИК

Согласно данным на диаграмме (Рисунок 4.5), наиболее значимым дефектом является дефект №2. Поэтому первоочередной задачей является устранение причин его возникновения. Для анализа факторов, влияющих на появление дефекта №2, была использована диаграмма Исикавы с применением метода «мозгового штурма» (Рисунок 4.6).

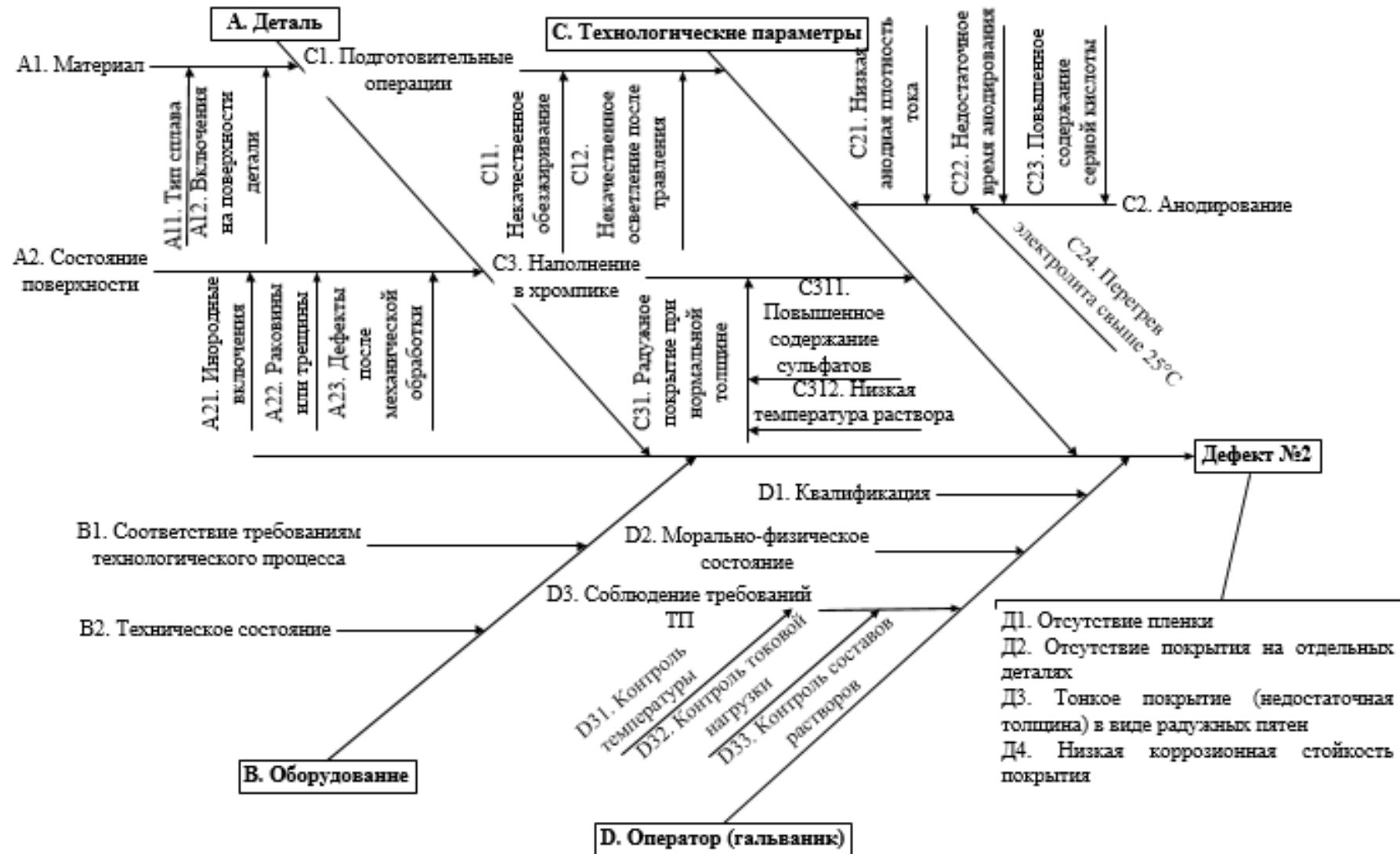


Рисунок 4.6 – Причинно-следственная диаграмма по обнаруженному дефекту №2 в стандартной форме

Следует отметить, что марка используемого материала и способ изготовления заготовки (причина A1), состав электролита и параметры процесса анодирования (причина C), а также работа гальваника, осуществляющего технологические операции на линии (причина D), могут быть основными причинами дефекта №2, согласно диаграмме Исикавы.

Исследование показало, что эти четыре причины составляют 92% всех дефектов. Для более точного анализа необходимо выяснить, какие типы дефектов связаны с каждой из этих причин и существует ли между ними взаимосвязь.

На Рисунке 4.7 приведена усовершенствованная причинно-следственная диаграмма, основанная на данных из Таблицы 4.1. В этой улучшенной версии диаграммы внесены следующие изменения [17]:

1. В верхней части диаграммы представлены только те причины, которые полностью соответствуют традиционной диаграмме. Они обозначены опорными точками: A, B, C, D.

2. Нижняя часть диаграммы наглядно демонстрирует последствия, связанные с причинами, отмеченными на соответствующих ветвях. Эти последствия выражены в процентах дефектов, которые были выявлены при использовании экспертного метода.

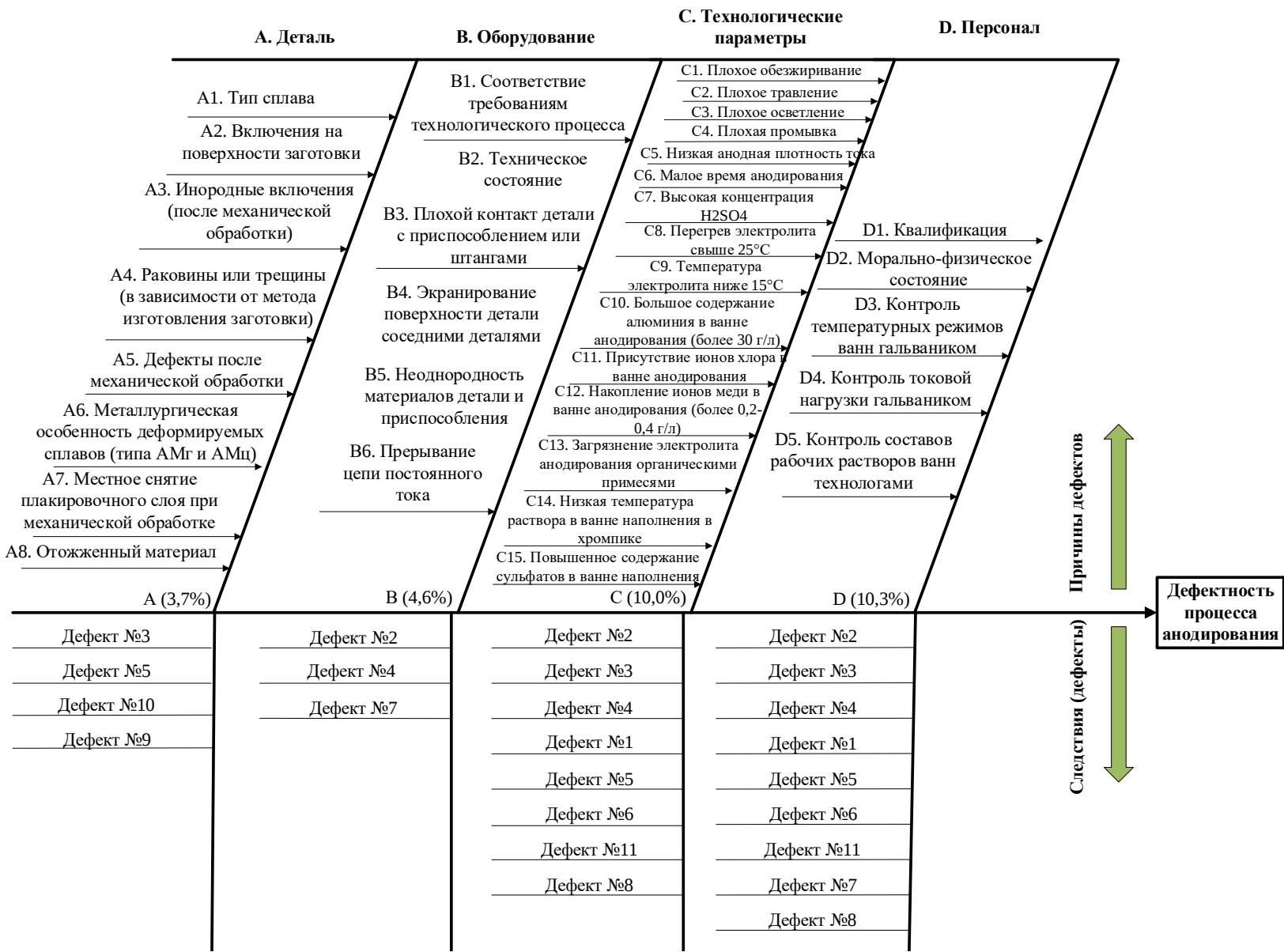


Рисунок 4.7 – Предлагаемая форма диаграммы Исикавы, построенная «по ходу» технологического процесса

Из Рисунка 4.7 видно, что основными причинами дефектов являются методы и материал изготовления детали (причины А), оборудование для анодирования (причины В), технологические параметры линии анодирования (причины С) и собственно персонал, выполняющий работы на участке (причины D).

Действительно коррозионная стойкость покрытий зависит от типа сплава подложки и состояния поверхности перед покрытием (причины А). Поверхность деталей может также содержать загрязнения, которые негативно сказываются на качестве покрытия (масла, смазки и др.). Кроме того, в приповерхностном слое алюминиевых сплавов содержатся легирующие добавки, которые также могут привести к ухудшению свойств получаемых покрытий.

Наивысшая коррозионная стойкость наблюдается у покрытий, полученных на чистом алюминии [18]. Введение в состав алюминия таких примесей, как медь, кремний, железо, марганец, магний улучшают механические свойства сплава, но снижают защитную способность получаемых анодно-окисных покрытий. Это обусловлено образованием интерметаллидов на поверхности, их разрушением и как следствие увеличением пористости получаемого покрытия. Чем меньше примесей в сплаве, тем однороднее получается покрытие, тем больше его толщина и меньше пористость покрытия.

К оборудованию (причины В) относятся не только выпрямители, ванны, бортовые отсосы и т.д., но и подвесочные приспособления и штанги. Правильный выбор технологической оснастки и последующий грамотный монтаж деталей на нее во многом определяют равномерность распределения электрических и тепловых полей внутри ванны анодирования, что сказывается на появлении дефектов №2, 4, 7. Поэтому в данном случае причины В напрямую коррелируют с причинами D, поскольку именно технолог и гальваник отвечают за вышеупомянутые действия.

Эффективность оксидирования алюминия и его сплавов в значительной степени зависит от правильного выполнения предварительных операций подготовки. В процессе оксидирования сплавов алюминия на ПАО МЗИК проводятся химическое обезжиривание, травление и осветление поверхности деталей (Рисунок 4.3).

Химическое обезжиривание основано на нейтрализации жирных кислот и удалении растительных и животных жиров и масел. Применение добавки Na_3PO_4 улучшает качество воды и упрощает процесс смывки воды с поверхности изделий во время промывки. Эффективность эмульгирующего действия обезжиривающего раствора зависит от правильной концентрации щелочи (NaOH) и фосфата натрия (Na_3PO_4). Если концентрация щелочи слишком высока, это может снизить энергию на межфазной границе двух нерастворимых жидкостей. Также, изменение содержания Na_3PO_4 может повлиять на результаты очистки поверхности. Для наиболее эффективного удаления минеральных масел и смазок рекомендуется проводить процесс при повышенных температурах, так как они слабо удаляются при нормальной температуре. Однако, следует проявлять осторожность при повышении температуры, так как это может вызвать ускоренное травление и негативно повлиять на геометрию и состояние поверхности деталей. При продолжительном нахождении деталей в ванне для обезжиривания возможно растравливание поверхности и образование осадка фосфатов. Это может происходить также при превышении нормальной температуры раствора, высокой концентрации Na_3PO_4 или избыточном содержании щелочей, что приводит к образованию белого порошка на деталях (причина C1).

Травление в растворе щелочи проводится с целью удаления с поверхности деталей окалины, ржавчины или окисных слоев, образующихся при механической, термической, химической обработке или под воздействием окружающей среды. Несоблюдение технологических режимов операции травления, в частности, передержка детали или перегрев раствора, а также

завышенная концентрация NaOH приводят к растравливанию поверхности детали (причина C2).

Осветление в азотной кислоте необходимо для удаления темного налета легирующих примесей, образующегося после травления, а также оставшихся пятен, ухудшающих внешний вид деталей. При низкой концентрации HNO_3 в растворе или недостаточной продолжительности процесса на поверхности остается темный налет оксида меди или следы пригоревшей смазки. Наличие контактно высадившейся меди на поверхности алюминия после осветления свидетельствует о высокой концентрации ионов меди в растворе. Все дефекты поверхности, видимые на поверхности после осветления, будут неблагоприятно влиять на внешний вид анодно-окисного покрытия.

Немаловажным аспектом являются и промывочные операции после каждой из подготовительных операций (причина C4). Основная цель промывки – не только удаление соединений и остатков предыдущих операций с поверхности изделий, но и снижение их попадания в сточные воды при экономичном использовании воды.

Некачественная промывка приводит к появлению дефектов №3, 4 и 5.

В Таблице 13 систематизирована и показана взаимосвязь причин и дефектов, а также представлены корректирующие мероприятия для их устранения применительно к ванне анодного оксидирования.

Таблица 13 – Перечень дефектов анодно-окисных покрытий на алюминиевых деформируемых сплавах, возможные причины их возникновения и корректирующие мероприятия по их устранению [104]

Вид дефекта	Код причины	Возможная причина возникновения	Корректирующие мероприятия
Сползание или рыхлость покрытия	C8	Перегрев электролита свыше 25°C	Охладить электролит перемешиванием
	C6	Завышенное время анодирования	Снизить продолжительность оксидирования
	C10	Большое содержание Al^{3+} в растворе (более 30 г/л)	Откорректировать электролит, слив половину
1. Отсутствие пленки 2. Отсутствие покрытия на отдельных участках детали 3. Тонкое покрытие (недостаточная толщина) в виде радужных пятен 4. Низкая коррозионная стойкость покрытия (не выдерживает капельную пробу)	B3	Плохой контакт детали с приспособлением	Улучшить контакт
	B4	Экранирование поверхности детали	Изменить способ монтажа
	C5	Низкая анодная плотность тока	Повысить плотность тока до 1-2 А/дм ²
	C6	Недостаточное время анодирования	Увеличить продолжительность анодирования
	C7	Повышенное содержание H_2SO_4 в электролите	Откорректировать электролит (разбавить водой)
	C8	Перегрев электролита свыше 25°C	Охладить электролит перемешиванием
Питтинг, темные пятна и растравливание покрытия	C11	Присутствие ионов Cl^- в электролите	Сменить электролит
	C8	Температура раствора свыше 30°C	Охладить электролит перемешиванием
	C4	Плохая промывка деталей после подготовки	Улучшить качество промывки
	A1	Большое содержание меди в составе сплава	Применять другой электролит

Таблица 13 (продолжение)

Вид дефекта	Код причины	Возможная причина возникновения	Корректирующие мероприятия
Растравливание покрытия	C4	Плохая промывка от H_2SO_4 после анодирования	Улучшить качество промывки
	C4	Плохая промывка от HNO_3 после осветления	Улучшить качество промывки
	B6	Прерывание цепи постоянного тока	Не допускать прерывания тока при анодировании
	C8	Перегрев электролита свыше $25^\circ C$	Охладить электролит перемешиванием
	C6	Завышенное время анодирования	Снизить продолжительность оксидирования
	C7	Повышенное содержание H_2SO_4 в электролите	Откорректировать электролит (разбавить водой)
Темные полосы и пятна на покрытии	B5	Неоднородность материалов деталей и подвески	Замена материала подвески
	C12	Накопление Cu^{2+} в электролите в количестве более 0,2-0,4 г/л	Проработка электролита со стальными катодами при плотности тока 1-2 А/дм ² или замена электролита
	A5	Местный прижог при механической обработке	Не является браковочным признаком по ГОСТ 9.301
	C4	Плохая промывка деталей после подготовки	Улучшить качество промывки
	A1	Большое содержание меди в составе сплава	Применять другой электролит

Таблица 13 (окончание)

Темный налет в виде точек и пятен	C13	Загрязнение электролита органическими примесями	Фильтрация электролита; обработка в HNO_3
Прижог, прогар (цвета побежалости, пятна)	B3	Плохой контакт детали с приспособлением	Улучшить контакт
Серый порошкообразный налет на деталях	C1-C3	Некачественная подготовка деталей перед покрытием	Улучшить качество подготовительных операций
Темные полосы на профилях, выявляющиеся после анодирования	A6	Металлургическая особенность деформируемых сплавов (типа АМг и АМц)	Длительная выдержка в азотной кислоте (до 60 мин) перед повторным анодированием
	A7	Местное снятие плакировочного слоя при механической обработке	
Темное покрытие	A8	Отожженный материал	Провести закалку и повторно анодировать детали
Хрупкость покрытия	C9	Температура электролита ниже 15°C	Нагреть электролит (отключить перемешивание)

После анодного оксидирования для повышения коррозионной стойкости покрытий чаще всего применяют наполнение пор дихроматами. В данной операции решающими факторами, влияющими на степень наполнения, являются толщина и пористость анодно-окисного покрытия. Недостаточная толщина покрытия приводит к бледной окраске и неудовлетворительной коррозионной стойкости покрытия (недостаточное время выдержки при капельной пробе). Кроме того, низкая температура раствора и излишек сульфатов в ванне наполнения также приводят к подобным дефектам покрытия. Повышенное содержание сульфатов может вызвать растравливание покрытия. Немаловажное значение в ванне наполнения играет рН раствора: при $\text{pH} > 5,5$ образуется мажущееся покрытие, при $\text{pH} < 4,5$ образуется «липкое» покрытие. К липкости покрытия также приводят низкая температура раствора, недостаточное время наполнения и покрытие большой толщины при малой пористости. Корректировку рН раствора следует проводить для его понижения до значений 4,5-5,0 хромовым ангидридом, для повышения рН – добавлением кальцинированной соды.

Взаимосвязь причин С и D (Рисунок 4.7) очевидна, ведь все операции на линии анодирования выполняются оператором линии (гальваником), а контроль составов электролитов закреплен за технологами гальванического участка. Поэтому разработка модели прогнозирования качества покрытий при различных условиях производства на основе статистических методов является эффективным подходом для уменьшения влияния человеческого фактора при установлении технологических режимов [104].

Таким образом, применение алгоритма прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности на линии анодирования гальванического участка ПАО МЗИК позволило:

1. Снизить число контрольных операций.
2. Сократить периодичность применения разрушающих методов контроля и сопряженных с ними дополнительных затрат.
3. Снизить длительность производственного процесса нанесения анодно-окисных покрытий, а именно снизить время контрольных операций с 20 до 3 мин.

4. Снизить количество продукции с дефектами в 2,5 раза за счет сведения к минимуму человеческого фактора.
5. Уменьшить затраты на устранение дефектов в 6 раз.

4.3. Реорганизация процесса контроля качества на производственном участке

Согласно требованиям технической документации, обязательному контролю подвергаются внешний вид (цвет и структура покрытия), степень наполнения и защитные свойства. Функциональные свойства проверяются только при наличии требований в конструкторской документации. Данная система предупредительного контроля, включающая входной контроль, комплекс методов неразрушающего контроля и другие методы, является достаточно трудоемкой, позволяет контролировать параметры качества, определенные в технической документации, и не учитывает параметры, оказывающие влияние на работоспособность комплектующих финального изделия в процессе эксплуатации.

На основании разработанной методики прогнозирования параметров качества предложена схема реорганизации процесса контроля качества комплектующих изделий, позволяющая снизить время и число контрольных операций (Рисунок 4.8).

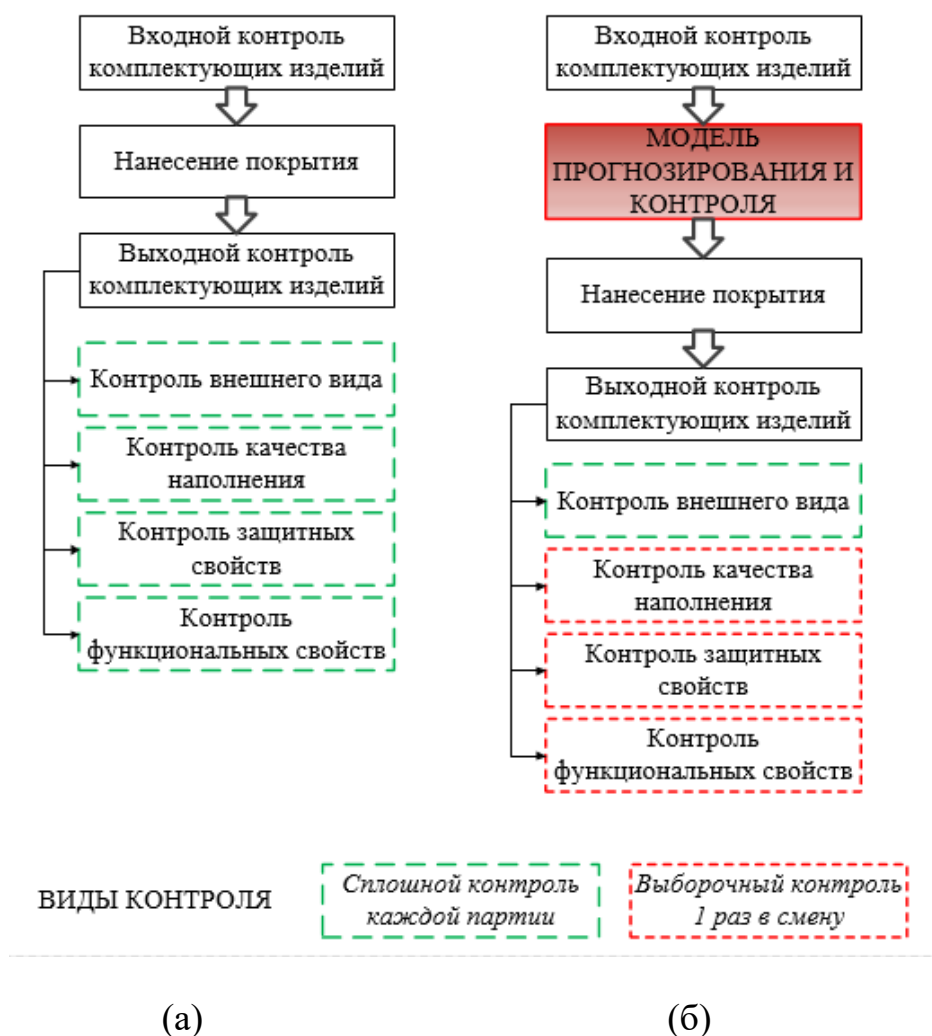


Рисунок 4.8 – Схема реорганизации процесса контроля качества комплектующих изделий на линии анодирования алюминия и его сплавов: (а) – существующая схема; (б) – предложенная схема

Принципиально предложенная схема отличается от существующей тем, что позволяет снизить число контрольных операций. А именно: контроль качества наполнения, защитных и функциональных свойств производится 1 раз в начале смены, в то время как при существующей схеме производится сплошной контроль всех свойств каждой партии деталей. Таким образом, реорганизация позволяет снизить число и время контрольных операций, и связанные с ними затраты.

За смену гальваник обрабатывает 5 подвесок. На каждую подвеску монтируется по 1-3 партии деталей. Учитывая, что контроль каждой партии проводится по 4 параметрам, то за 8 часовую смену контролер проводит 20-60 проверок параметров качества покрытия. Средняя продолжительность одной

контрольной операции (контроль по 4 параметрам) 20 мин. Таким образом, время контрольных операций за 8-часовую смену в среднем составляет 100-300 мин.

По предложенной методике контроль в начале смены осуществляется по всем параметрам, т.е. время контрольных операций на первой подвеске составляет 20-60 мин, на остальных 4 подвесках контролируется только внешний вид (время выполнения операции – 3 мин). Таким образом, за 8-ми часовую рабочую смену число контрольных операций снижается с 20-60 до 9-19, а время контрольных операций снижается от 100-300 мин до 32-72 мин.

4.4. Предложения и рекомендации по использованию модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности

В качестве рекомендаций по дальнейшему использованию и совершенствованию полученной модели прогнозирования качества комплектующих изделий авиационной промышленности можно предложить следующее. Во-первых, полученная модель может быть адаптирована для других областей промышленности, где применяются неупрочняемые деформируемые сплавы алюминия. Во-вторых, полученная модель может быть расширена путем добавления данных для других алюминиевых сплавов. В-третьих, полученная модель может являться составным элементом имитационной модели производственной линии анодирования алюминиевых сплавов, и может использоваться при проектировании новых производственных процессов в авиационной промышленности.

Для создания имитационной модели производственной линии необходимо создание дополнительно модели предварительной подготовки поверхности, которая будет описывать состояние поверхности комплектующих изделий после механической обработки, операций обезжиривания, травления, осветления алюминиевых сплавов. Структурная схема имитационной модели гальванической линии анодного оксидирования представлена на Рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Структурная схема имитационной модели гальванической линии анодного оксидирования

Имитационная модель – это цифровая модель объекта, способная воспроизводить геометрию, физико-химические свойства, поведение и правила, позволяющие оптимизировать поведение системы. В данном элементе сгенерированы такие технологии, как CAD-модели (3D твердотельное моделирование), моделирование физико-химических процессов, моделирование поведения объекта, моделирование, основанное на правилах, анализ согласованности моделей, а также интеграция моделей.

4.5. Выводы по ГЛАВЕ 4

1. Разработана методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий, которая включает модель прогнозирования параметров качества. Данная методика определяет порядок действий производственного персонала, обслуживающего производственную линию анодирования, при изменении требований к параметрам качества комплектующих изделий.

2. Разработан алгоритм прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности на линии анодирования гальванического участка ПАО МЗИК, применение которого позволило снизить

длительность производственного процесса за счет снижения числа и продолжительности контрольных операций, и повысить качество комплектующих изделий за счет сведения к минимуму человеческого фактора.

3. На основе разработанной методики прогнозирования параметров качества комплектующих изделий проведена реорганизация процесса контроля качества комплектующих изделий на линии анодирования алюминия и его сплавов.

4. Выданы предложения и рекомендации по использованию модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения качества изделий авиационной промышленности путем применения алгоритма и методики прогнозирования, разработанных на основе моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности. В ходе диссертационного исследования получены результаты, которые позволили повысить качество комплектующих изделий, обеспечив требуемые характеристики работоспособности комплектующих в процессе эксплуатации, и создали предпосылки для совершенствования производственных процессов.

По работе сделаны следующие выводы:

1. Проанализированы существующие модели организации процессов контроля качества покрытий в авиационной промышленности и сделан вывод, что в настоящее время процесс контроля качества комплектующих финальных изделий осуществляется на финальном этапе изготовления и приводит к излишним затратам при устранении несоответствий. Анализ существующих методов оценки качества комплектующих изделий авиационной промышленности показал, что вопросы комплексной оценки параметров качества, учитывающих различные условия эксплуатации изделий авиационной промышленности отражены не в полной мере.

2. Проведен анализ неисправностей и отказов комплектующих финальных изделий, по результатам которого определены дополнительные показатели качества покрытий, оказывающих влияние на работоспособность изделия в процессе эксплуатации, и не регламентированные стандартами качества.

3. Созданы модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, отличающиеся от существующих тем, что учитывают дополнительные параметры качества, оказывающие влияние на работоспособность финального изделия и его

комплектующих в процессе эксплуатации, такие как теплопроводность, пробивное напряжение, износостойкость.

4. Разработана методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности, которая включает параметры, учитывающие условия эксплуатации, и позволяет реорганизовать процесс контроля качества при производстве комплектующих финальных изделий. Применение методики позволило снизить число дефектов комплектующих финальных изделий в процессе эксплуатации с 247 до 97 изделий/год, при этом затраты на устранение дефектов уменьшились в 2,5 раза.

5. Разработан алгоритм прогнозирования параметров качества, который позволяет повысить качество комплектующих изделий авиационной промышленности. Предложенный алгоритм позволил сократить число контрольных операций и сократить время контрольных операций с 20 мин до 3 мин.

6. Проведена апробация разработанных решений на ПАО МЗИК, в ходе которой реорганизован процесс контроля качества изделий на линии анодирования алюминия и его сплавов гальванического участка.

7. Разработаны предложения и рекомендации по дальнейшему применению моделей прогнозирования параметров качества комплектующих изделий в авиационной промышленности. В частности, полученные модели могут являться составными элементами имитационной модели производственной линии анодирования алюминиевых сплавов, и могут использоваться при проектировании новых производственных процессов в авиационной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ЕН 9100-2011. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования. М., 2012. 24 с.
2. ГОСТ Р 58876-2020. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования. М., 2020. 38 с.
3. Рахманов М.Л., Бульба Е.П. Анализ дополнительных требований ГОСТ Р 58876-2020 «Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования» // Избранные научные труды двадцать первой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». М.: Пробел-2000. 2022. С. 185-188.
4. Горячева М.Ю., Малахова Ю.Г. Опыт внедрения системы менеджмента качества на предприятиях авиационно-космического комплекса // Решетневские чтения. 2015. С. 336-337.
5. Рыжков В.В., Бояринцева М.А. Практика применения бережливого производства на предприятиях авиастроения // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. №4(70). 2023. С. 5-10.
6. Гаранин И.В., Садковская Н.Е. Методы повышения качества производства методологиями Lean Six Sigma и PRINCE2 // Вестник «НПО «ТЕХНОМАШ». №3. 2022. С. 8-12.
7. Gummadi, A. Quality Management in the Aerospace Industry. URL: <https://www.tutorialspoint.com/quality-management-in-the-aerospace-industry>. Режим доступа: свободный (дата обращения: 15.05.2023).
8. ГОСТ Р 58044-2017. Авиационная техника. Верификация закупленной продукции. М., 2018. 14 с.
9. Дорохов С.Б. Управление поставщиками материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий со стороны финальных предприятий-изготовителей

авиационной отрасли и их развитием // Менеджмент. Вооружение. Качество. №2(60). 2019. С.2-3.

10. Урманов Р.Б. Контроль качества покупных готовых изделий и материалов в авиастроении // Авиасоюз. №4(37). 2011. С. 18-21.

11. Горбунов О.В. Управление качеством поставок для производства авиационного двигателя: опыт «ОДК–Сатурн». URL: https://up-pro.ru/library/quality_management/smk/postavki-kachestvo/ (дата обращения: 13.12.2025).

12. Дорохин Ю.Н., Круглов И.А., Круглова Ю.В. Обеспечение качества изделий ракетно-космической техники. Проблемные вопросы организации входного контроля и предложения по их решению // Вестник «НПО «ТЕХНОМАШ». № 4. 2021. С. 24-27.

13. Лобанов А.В., Круглова Ю.В., Рябчиков П.В. Проблемные вопросы входного и операционного контроля при единичном производстве // Вестник «НПО «ТЕХНОМАШ». № 1. 2023. С. 69-72.

14. Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли. Проблемы и перспективы внедрения: Материалы XIII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. 193 с.

15. Славин А.В. Современные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля в авиационной отрасли / А.В. Славин, М.А. Далин, А.С. Бойчук, В.Ю. Чертищев. // Труды ВИАМ. № 12 (106). 2021. С. 96-106.

16. Ножницкий Ю.А., Федина Ю.А., Шадрин Д.В. Методические особенности вибрационных испытаний вращающихся лопаток на динамических разгонных стендах // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. №3(27). 2011. С. 16-22

17. Современные статистические методы управления качеством [Электронный ресурс]: сборник научных трудов / [под ред. С.В. Юдина]. – Электрон. текст. дан. (4,4 Мб). – Киров: Изд-во МЦИТО, 2020.

18. Скопинцев В.Д. Оксидирование алюминия и его сплавов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 120 с.
19. Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.
20. Томашов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1968. 156 с.
21. Голубев А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. М.: изд-во АН СССР, 1961. 200 с.
22. Шрейдер А.В. Оксидирование алюминия и его сплавов. М.: Metallurgizdat, 1960. 220 с.
23. Верник С., Пиннер Р. Химическая и электрохимическая обработка алюминия и его сплавов. М.: Судпромгиз, 1960. 218 с.
24. Емелин М.И., Герасименко А.А. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации. М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
25. Хенли В.Ф. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов // Пер. Л.И. Павлова под ред. Д.т.н. В.С. Синявского. М.: Metallurgiya, 1986. 152 с.
26. Лукомский Ю.Я., Горшков В.К. Гальванические и лакокрасочные покрытия на алюминии и его сплавах. Л.; Химия, 1985. 184 с.
27. Грилихес С.Я. Оксидные и фосфатные покрытия металлов / под ред. П.М. Вячеславова. Л.: Машиностроение, 1985. 96 с.
28. Эйчис А.П., Темкина Б.Я. Технология поверхностной обработки алюминия и его сплавов. М.-К.: ГосНТИМашЛит, 1969. 255 с.
29. Новиков А.Н., Бакаева Н.В. Восстановление и упрочнение деталей машин, изготовленных из алюминиевых сплавов электрохимическими способами. Орел, 2004. 170 с.
30. S. Kawai. Anodizing and coloring of aluminum alloys. Finishing Pubns, 2002. 159 p.
31. A.W. Brace. The technology of anodizing aluminium, 3rd ed. Modena, Italy, Interall Srl., 2000. 348 p.

32. S. Wernick, R. Rinner, P.G. Sheasby. The surface treatment and finishing of aluminium and its alloys. ASM International, 1987. 1273 p.
33. R.G. King. Surface treatment and finishing of aluminium. Elsevier, 2014. 150 p.
34. J.M. Runge. The metallurgy of anodizing aluminum. Connecting science and practice, 1st ed. Springer, 2018. 495 p.
35. R.H. Probert. Aluminum. How to. The chromating-anodizing-hardcoating handbook.
36. D. Laplantz. Artists anodizing aluminum: the sulfuric acid process. La Plantz Studio, 1988.
37. Чудинов А.К., Кривоносова Е.А., Пономарев И.С. Отличительные особенности способов анодирования от микродугового оксидирования // В сб.: Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-практической конференции, 2015. С. 330-335.
38. Чупахина Е.А. Оксидные покрытия на алюминии и его сплавах с высокими диэлектрическими и электроизоляционными свойствами: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петрозаводск. 2005. 137 с.
39. Аверьянов Е.Е. Вопросы теории образования и формирования анодных оксидов: дис. ... д. хим. наук. Казань. 2004. 274 с.
40. Филяк М.М. Анодирование алюминия в щелочных электролитах: кинетика образования, морфология и свойства пленок: дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск. 2014. 122 с.
41. Гравин А.А. Модернизация технологии нанесения электрохимических оксидных покрытий на алюминиевые поверхности для интенсификации теплоотдачи: дис. ... канд. техн. наук. Тамбов. 2015. 129 с.
42. Горбатков М.В. Информационно-измерительная система контроля толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического оксидирования: дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 2019. 158 с.
43. Демидов М.А., Кузьмина М.Ю. Исследование электрохимического метода получения оксидной пленки на поверхности алюминия в сернокислом электролите // Молодежный вестник ИрГТУ. 2019. том 9. №3. С. 89-92.

44. Современные тенденции анодного оксидирования алюминиево-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) / В.А. Дуюнова [и др.] // Труды ВИАМ. 2019. №8(80). С. 79-89.
45. Скопинцев В.Д., Марголин Л.Н., Фарафонов В.В. Развитие технологии анодного оксидирования алюминия и его сплавов // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №2. С. 9-22.
46. Формирование нанопористых анодных пленок на чистом алюминии в серной кислоте / А.И. Щербаков [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47. №2. С. 176-180.
47. Arurault L. Pilling-bedworth ratio of thick anodic aluminium porous films prepared at high voltage in H_2SO_4 based electrolyte // Transactions of the Institute of metal finishing. 2008. Vol. 86. №1. P. 51-54.
48. Приходько С.А., Кравцов Е.Е., Рябухин Ю.И. Изучение влияния добавок винной и щавелевой кислот на качество анодных покрытий на алюминии в хлоридсодержащих средах // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2007. №3 (38). С. 155-159.
49. Красиков А.В., Нараев В.Н., Красиков В.Л. Исследование процесса анодирования силумина в растворах щавелевой и серной кислот // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2012. №13(39). С. 33-37.
50. Александров В.Г. Техническая эксплуатация авиационной техники. М.: Военное издательство, 1967. 416 с.
51. Анцелиович Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета. М.: Машиностроение, 1985. 296 с.
52. Герцбах И.Б. Модели отказов. М.: Советское радио, 1966. 168 с.
53. Ицкович А.А. Надежность летательных аппаратов и двигателей. М.: МГТУ ГА, 1990. 104 с.
54. Когге Ю.К. Основы надежности авиационной техники. М.: Машиностроение, 1993. 175 с.

55. Сырицын Т. А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1990. 248 с.
56. Чекрыжев Н.В. Анализ отказов и повреждений авиационной техники, влияющих на безопасность полетов // Альманах современной науки и образования. 2013. №10(77). С. 177-180.
57. Дмитриев С.А., Симонова Е.С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007-2020 гг. // Надежность и качество сложных систем. 2023. №1. С. 81-90. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2023-1-10>
58. Сарычев С.В. Методологические основы оценки технических рисков системы управления безопасностью полетов при проектировании, производстве и серийной эксплуатации ГТД: дис. ... д. хим. наук. Москва. 2017. 485 с.
59. Бессуднов И.А. Совершенствование технологии ремонта дисков газотурбинных авиационных двигателей с использованием ресурсосберегающих технологий: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск. 2014. 208 с.
60. ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические. Общие требования. М., 2010. 45 с.
61. ГОСТ 9.031-74. Покрытия анодно-окисные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля. М., 1989. 12 с.
62. ПИ 1.2.616-2003. Сернокислотное анодное окисление алюминиевых сплавов: производственная инструкция: дата введения 01.10.79 / разработана ФГУП ВИАМ. 50 с.
63. ГОСТ 9.302-88 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические. Методы контроля. М., 2001. 38 с.
64. Hexagonal pore arrays with a 50–420 nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina / U. Gösele [et al.] // Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84. P. 6023-6026.
65. The study of the volume expansion of aluminum during porous oxide formation at galvanostatic regime / I. Vrublevsky [et al.] // Applied Surface Science. 2004. Vol. 222. №1–4. P. 215-225.

66. Effect of the current density on the volume expansion of the deposited thin films of aluminum during porous oxide formation / I. Vrublevsky [et al.] // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 220. №1–4. P. 51-59.
67. Effect of the anodization parameters on the volume expansion of anodized aluminum films / A.M. Abd-Elnaiem [et al.] // *International journal of electrochemical science*. 2013. Vol. 8. №8. P. 10515-10525.
68. Porous alumina films fabricated by reduced temperature sulfuric acid anodizing: morphology, composition and volumetric growth / A.A. Poznyak [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14. №4. P. 1-16.
69. Factors controlling stress generation during the initial growth of porous anodic aluminum oxide / Ö.Ö. Çapraz [et al.] // *Electrochimica acta*. 2015. Vol. 159. P. 16-22.
70. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions / E. Dervishi [et al.] // *Surface and coatings technology*. 2022. Vol. 444. Article 128652.
71. Paternarakis G. The multimodal dependence of anodic alumina film porous nanostructure on anodizing potential // *Current topics in electrochemistry*. 2020. Vol. 22. P. 1-17.
72. Paternarakis G., Triantis T.M. Transformation of porous nanostructure and self-ordering of anodic alumina films during potentiostatic anodising of aluminium // *Current topics in electrochemistry*. 2019. Vol. 21. P. 21-39.
73. Paternarakis G., Plytas J. A novel theory interpreting the extremes of current during potentiostatic anodizing of Al and the mechanisms of normal and abnormal growth of porous anodic alumina films // *Journal of electroanalytical chemistry*. 2016. Vol. 769. P. 97-117.
74. Effect of anodizing conditions on the cell morphology of anodic films on AA2024-T3 alloy / J.M. Torrescano-Alvarez [et al.] // *Surface and interface analysis*. 2019. Vol. 51. №12. P. 1135-1143.
75. Influence of fluorozirconic acid on sulfuric acid anodizing of aluminum / R. Elaish [et al.] // *Journal of the electrochemical society*. 2017. 164(13). P. 831-839.

76. Utilizing cell culture assisted anodization to fabricate aluminium oxide with a gradient microstep and nanopore structure / Zh. Zhang [et al.] // ACS Omega. 2022. №7. P. 35668-35676.
77. Строение и свойства анодной оксидной пленки на алюминии и сплаве Д16 / В.Н. Кусков [и др.] // Фундаментальные исследования. 2012. №11-3. С. 625-629.
78. Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Артемьев В.П. Технология, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах // Цветные металлы. 2009. №10. С. 57-61.
79. Соловьев Д.С. Нечеткая продукционная модель знаний для корректировки результатов математического моделирования и оптимизации гальванического процесса при его практической реализации // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 115-123.
80. Лютов А.Г., Ишкулова А.Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций электродов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. №4 (70). С. 45-48.
81. Литовка Ю.В., Денисов С.Ю. Расчет распределения гальванического покрытия по поверхности крупногабаритных деталей // Журнал прикладной химии. 2010. Т. 83. №5. С. 789-793.
82. Соловьев Д.С., Соловьева И.А., Литовка Ю.В. Применение решения обратной задачи математического моделирования гальванического процесса для оптимизации неравномерности толщины покрытия // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. №1 (49). С. 131-143.
83. Кондратьев В.В. Управление архитектурой предприятия (Конструктор регулярного менеджмента). Изд. 2-е дораб. и дополн. М.: Инфра-М, 2019. 358 с.
84. Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.
85. Kasser, J.E. (2019). Systems Engineering: A Systemic and Systematic Methodology for Solving Complex Problems (1st ed.). 472 p. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429425936>

86. Интервью с А.И. Боровковым [Электронный ресурс] / Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ, 2021. – Режим доступа: <https://fea.ru/news/7687>. (дата обращения: 03.07.2023)
87. Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2021. 102 с.
88. Ефремов А.Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. Том 1. №10 (103). 2022. С. 6-13.
89. Ефремов А.Н. Создание архитектуры математической модели прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах // III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», 6-8 апреля 2022: Сборник докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. 380 с.
90. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования пористости анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Русский инженер. 2024. №3 (84). С. 38-43.
91. ОСТ 92-1479-78. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы анализа электролитов и растворов. 429 с.
92. Любимцев О.В., Любимцева О.Л. Линейные регрессионные модели в эконометрике. Методическое пособие. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2016. 45 с.
93. Эконометрика: учеб. / под ред. И.И. Елисеевой. М.: Проспект, 2009. 288 с.
94. Кеткина О.С. Возможности MS EXCEL для регрессионного анализа. Электронный текстовый ресурс. Екатеринбург, 2020. 43 с.
95. Любимова О.Н., Сиськов В.В. Построение и проверка регрессионных моделей при обработке результатов факторных экспериментов. Владивосток: ДВФУ, 2017. 36 с.
96. Эконометрия / В.И. Суслов [и др.]. Новосибирск: СО РАН, 2005. 744 с.

97. Орлов А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, Омега-квадрат и ошибки при их применении // Научный журнал КубГАУ. №97(03). 2014. С. 1-29.
98. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // Сборник тезисов докладов VII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва, 2022. С. 28.
99. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // «Вестник ВКО Алмаз-Антей». №2. 2023. С. 66-80.
100. Thick and dense anodic oxide layers formed on aluminum in sulphuric acid bath. / W. Bensalah [et al.] // Journal of materials science and technology. 2010. 26(2). P. 113-118.
101. Abd El-Hameed A.M., Abdel-Aziz Y.A., El-Tokhy F.S. Anodic coating characteristics of different aluminum alloys for spacecraft materials applications. Materials Sciences and Applications, 2017. P. 197-208.
102. Ефремов А.Н. Математическая модель прогнозирования пористости анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Русский инженер. 2024. №3 (84). С. 38-43.
103. Ефремов А.Н. Моделирование технологических свойств анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг 6 // Сборник тезисов докладов VIII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». Москва, 2023. С. 12.
104. Ефремов А.Н. Применение статистических методов для анализа дефектов анодно-окисных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 88-97.

ПРИЛОЖЕНИЕ

П.1. Акт о внедрении в ПАО «МЗИК»



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора —
технический директор

Чевардин И.В.

202 6 г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ефремова Андрея Николаевича,
представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

г. Екатеринбург

Комиссия в составе:

Председатель:

Заместитель ГД - технический директор

Чевардин И.В.

Члены комиссии:

Главный металлург

Баев М.Ю.

Начальник цеха гальванопокрытий и спецвидов литья

Кузнецов В.С.

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Ефремова Андрея Николаевича «Модели прогнозирования параметров качества комплектующих изделий авиационной промышленности», а именно:

разработанная методика прогнозирования параметров качества комплектующих изделий, которая позволяет повысить качество изделий авиационной промышленности,

разработанный алгоритм прогнозирования параметров качества, позволяющий повысить эффективность процесса контроля качества за счет сокращения времени и числа контрольных операций в процессе производства комплектующих изделий,

внедрены в ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» при организации производственного процесса нанесения анодно-окисных покрытий на алюминий и его сплавы.

Применение предложенных методики и алгоритма прогнозирования качества комплектующих изделий позволило обеспечить требуемые характеристики работоспособности комплектующих в процессе эксплуатации и повысить качество изделий авиационной промышленности.

Главный металлург

Баев М.Ю.

Начальник цеха гальванопокрытий
и спецвидов литья

Кузнецов В.С.