На правах рукописи



ГОРБАТКОВ Михаил Викторович

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ В ХОДЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Специальность:

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в промышленности и медицине)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре теоретических основ электротехники

Научный руководитель	доктор технических наук, доцент **Парфенов Евгений Владимирович**
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор **Батищев Виталий Иванович** ФБГОУ ВО «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Информационных технологий» доктор физико-математических наук, доцент **Болотнов Анатолий Миронович** ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», и.о. заведующего кафедрой «Информационных технологий и компьютерной математики»
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита диссертации состоится «27» июня 2019 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте *www.ugatu.su*

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент А. Ю. Демин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы процессы плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) привлекают значительное внимание со стороны машиностроительной промышленности благодаря возможности существенного улучшения свойств поверхности при заметной экологической безопасности метода. Вследствие значительно бóльших применяемых напряжений, чем при традиционной электрохимической обработке, плазменно-электролитические процессы отличаются появлением микроразрядов и кипения электролита вблизи поверхностного слоя детали, что приводит к интенсивному росту оксидных покрытий с высокими защитными характеристиками на легких металлах и сплавах. Плазменно-электролитические процессы достаточно сложны для теоретического описания и характеризуется существенно нелинейными вольтамперными характеристиками, которые могут содержать участки с отрицательным наклоном.

Метод ПЭО является высокоэнергетическим процессом, и достижение оптимальных свойств поверхности с минимальными затратами времени и энергии является важнейшей задачей как с экономической, так и с экологической точек зрения. Решения подобных задач в условиях современного производства можно достичь с использованием современных информационно-измерительных систем (ИИС), которые включают в себя элементы активной диагностики и формируют новые контуры обратной связи в управляющих системах. Более того, широкая номенклатура деталей и гибкость производства ставит требование адаптивности технологии, что означает необходимость быстрой и удобной подстройки параметров ПЭО в соответствии с объемом партии и геометрическими размерами деталей. Результатом решения является возможность управлять как наблюдаемыми, так и ненаблюдаемыми переменными в реальном масштабе времени в соответствии с заданной траекторией изменения целевых свойств поверхности, которые, как правило, не поддаются прямому измерению в ходе обработки. Подобные интеллектуальные элементы систем измерения, например, активная диагностика состояния плазмы и параметров процесса, уже начали применяться в родственных вакуумно-плазменных технологиях. Однако по отношению к ПЭО, вопросы измерения и контроля на основе электрических, оптических и других характеристик недостаточно изучены, несмотря на заметный прогресс в последние 15 лет.

Степень разработанности темы. Для решения поставленных задач проведен анализ работ отечественных и зарубежных ученых, внесших значительный вклад в изучение объекта и предмета исследования. Работы М. Алиофхазраели, Л. Аруральта, П.Н. Белкина, С.В. Гнеденкова, К. Данлеви, Ф. Джаспард-Мекюсон, А.Л. Ерохина, У. Клайна, Б.Л. Крита, В.Б. Людина, Э.Ю. Матыкиной, А. Маттьюза, Р.Р. Невьянцевой, А. Номине, А.Г. Ракоча, А.Б. Рогова, С.В. Савушкиной, С.Л. Синебрюхова, Л.А. Снежко, И.В. Суминова, В.К. Шаталова, А.В. Эпельфельда и др. посвящены изучению

физико-химических свойств покрытий и механизма процесса ПЭО. Изучением вопросов измерения и моделирования для ПЭО и родственных технических систем занимались Н.А. Амирханова, В.И. Батищев, А.М. Болотнов, В.Н. Бориков, И. Голосной, С.В. Жернаков, В.П. Житников, А.И. Заико, А.Н. Зайцев, Т.Р. Идрисов, М. Куриони, В.А. Мамаева, М. Мохедано, В.Р. Мукаева, С. Мун, Е.В. Парфенов, П. Скелдон, О.П. Терлеева, Д. Томпсон, З.М. Хасанов, Ж. Хенрион, С. Шреста и др. Выявлено, что в области измерения и контроля ненаблюдаемых характеристик процесса ПЭО написано лишь ограниченное количество статей и диссертационных работ, как отечественных, так и зарубежных авторов, что говорит об актуальности данного направления исследований.

Цель работы. Расширение функционала ИИС процесса плазменно-электролитического оксидирования, обеспечивающее повышение точности формирования покрытия на основе косвенного измерения его толщины в ходе обработки по электрическим и оптическим характеристикам процесса.

Задачи исследования:

1. Обосновать новые подходы к контролю толщины покрытия в ходе ПЭО на основе анализа существующих решений в области измерения характеристик плазменно-электролитических процессов.

2. Разработать способы косвенного измерения толщины покрытия в ходе ПЭО на основе экспериментального исследования его электрических и оптических характеристик и оценить точность измерений.

3. Разработать методику моделирования распределения плотности тока по поверхности детали в ходе ПЭО на основе решения полевой задачи для оценки точности измерения толщины покрытия на деталях сложной формы.

4. Разработать ИИС, реализующую предложенные способы косвенного измерения толщины покрытия в ходе процесса ПЭО на основе анализа электрических и оптических характеристик, и оценить эффективность опытного образца ИИС.

Методология и методы исследования. Для достижения цели работы применялись методы планирования эксперимента, системного анализа, теоретических основ электротехники, теории электромагнитного поля, корреляционного и статистического анализа, аппроксимации кривых, электронной микроскопии, металлографического анализа, вихретокового измерения толщины покрытия. Обработка экспериментальных данных и математическое моделирование проводились на основе оригинальных программ для персональных ЭВМ, составленных с использованием академических версий программ *MATLAB, LabVIEW*. Применялись сертифицированные и поверенные измерительные установки и приборы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новые подходы к контролю толщины покрытия в ходе ПЭО на основе анализа существующих решений в области измерения характеристик плазменно-электролитических процессов (*соответствует п.1 паспорта специальности*).

2. Способы косвенного измерения толщины покрытия в ходе ПЭО на основе экспериментально подтвержденных взаимосвязей с электрическими и оптическими характеристиками процесса (*соответствует п.1 и 3 паспорта специальности*).

3. Методика моделирования распределения толщины покрытия по поверхности детали на основе решения краевой задачи распределения плотности тока в электролизере и ПЭО покрытии (*соответствует п.3 паспорта специальности*).

4. Структура и алгоритм работы ИИС, реализующей разработанные способы измерения толщины покрытия в ходе процесса ПЭО на основе анализа электрических и оптических характеристик процесса (*соответствует п.6 паспорта специальности*).

Научная новизна работы:

1. Новизна подходов к контролю толщины покрытия в ходе ПЭО заключается в определении механизмов физико-химических явлений, формализованных в виде феноменологической модели, *отличающихся* установлением взаимосвязей толщины покрытия с изменением формы импульсов напряжения на электролизере и со снижением интенсивности линии оптического излучения материала подложки на фоне роста линии компонента электролита.

2. Новизна способов косвенного измерения толщины покрытия в ходе ПЭО заключается в использовании экспериментально подтвержденных взаимосвязей толщины покрытия с электрическими и оптическими характеристиками процесса, *отличающиеся* применением среднего значения импульсного напряжения на электролизере и отношения интенсивности линии излучения компонента электролита к линии материала подложки, взятого в логарифмическом масштабе (патенты № 2668344 и № 2672036).

3. Новизна методики моделирования распределения плотности тока по поверхности детали в ходе ПЭО заключается разработке подхода к решению краевой задачи распределения плотности тока в электролизере и покрытии, *отличающегося* учетом нелинейности вольтамперной характеристики для оценки точности измерения толщины покрытия на деталях сложной формы (программа для ЭВМ № 2018660868).

4. Новизна разработанной структуры ИИС и ключевых элементов ее аппаратного и программного обеспечения заключается в реализации предложенных способов измерения толщины покрытия, *отличающихся* возможностью организации нового контура обратной связи, обеспечивающего косвенное определение ненаблюдаемой переменной – толщины покрытия с погрешностью в пределах коридора ± 5 мкм и завершение процесса при достижении требуемого ее значения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в установленных механизмах связи электрических и оптических характеристик с толщиной покрытия, которые дополняют теорию плазменно-электролитических процессов, позволяют разрабатывать новые

способы измерения толщины покрытия в ходе обработки. Практическая значимость заключается в возможности косвенного измерения толщины покрытия без прерывания процесса с погрешностью, укладывающейся в коридор ± 5 мкм, практически требуемый на текущем этапе развития техники, что приводит к повышению качества оксидирования алюминиевых сплавов за счет снижения числа бракованных деталей, имеющих избыточную или недостаточную толщину покрытия с 5-6% до 2-3% (патент РФ №2611632). Значимость работы подтверждена актом об использовании результатов работы на АО «Кумертауское авиационное производственное предприятие».

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность полученных закономерностей и достоверность результатов основана на использовании общепринятых методов и методик планирования и проведения теоретических и экспериментальных исследований, применением сертифицированных современных измерительных приборов и средств вычислительной техники, согласовании новых результатов с известными теоретическими положениями, корректной статистической обработкой данных эксперимента.

Результаты работы докладывались на 11 международных и 9 всероссийских конференциях в период с 2012 по 2019 гг., проводимых в городах Москва, Уфа, Кострома, Тулуза (Франция), Сан-Диего (США), Скарборо (Великобритания), Санья (Китай), Гармиш-Партенкирхен (Германия). Результаты работы обсуждались на международной конференции «Плазменная обработка поверхности» PSE (Гармиш-Партенкирхен, Германия, 2014, 2016 г.); 12-й международной конференции «Всероссийское совещание по проблемам управления» ВСПУ (Москва, 2014 г.); 10-й международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO (Москва, 2015 г.); международной конференции «Anodize it» (Тулуза, Франция, 2017 г.) и др.

Работа выполнена в рамках следующих научных программ, где соискатель являлся одним из исполнителей: грант РНФ №17-79-10144, грант РФФИ № 16-53-48008, грант Президента РФ № МД-2870.2014.8, договоры о НИР № АП-ТО-15-12-ХГ-529/48, № АП-ТО-14-13-ХГ-1039/48 с АО «Кумертауское авиационное производственное предприятие», грант Республики Башкортостан для молодых ученых и молодежных научных коллективов (2014). Соискатель был неоднократно удостоен Стипендий Президента РФ для аспирантов в 2014-2017 годах, а также Стипендии Президента РФ для обучения за рубежом в 2015-2016 г.

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментов, обработке и анализе полученных данных, участии в обсуждении результатов, разработке способов измерения, создании ключевых элементов ИИС и внедрении их на производстве, написании части исходных текстов программ и участии в подготовке научных публикаций. Анализ существующих решений в области измерения характеристик плазменно-электролитических процессов согласно задаче 1 проведен в работах [1, 4, 6, 7-9]. Разработка способов

косвенного измерения толщины покрытия в ходе ПЭО на основе экспериментального исследования его характеристик согласно задаче 2 рассмотрена в работах [2, 5, 7, 8, 12]. Разработка методики моделирования распределения плотности тока по поверхности детали в ходе ПЭО согласно задаче 3 приведена в работах [6, 10]. Разработка ИИС, реализующей предложенные способы косвенного измерения толщины покрытия согласно задаче 4 рассмотрена в работах [1, 3, 4, 9, 11, 13, 14].

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в 43 печатных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 2 статьях в рецензируемых журналах, издаваемых за рубежом и индексируемых в системе Scopus; получено 3 патента РФ на изобретение способов и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из пяти глав, заключения и приложений. Включает 158 страниц текста, содержит 70 иллюстраций, 22 таблицы и библиографический список из 134 наименований. В приложениях приведены таблицы измерений и акт использования результатов работы.

Благодарности. Соискатель выражает благодарность профессору Парфенову Евгению Владимировичу (научный руководитель кандидатской диссертации) и доктору Ерохину Алексею Леонидовичу (Университет Манчестера, Великобритания) за формирование научного мировоззрения и всестороннюю помощь в написании диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены результаты апробации и реализации, приведена структура и объем работы.

В первой главе проведен анализ современного состояния информационно-измерительных систем для контроля плазменно-электролитических процессов. Определено место ПЭО среди других электрохимических и плазменных методов обработки поверхности и выявлены основные особенности плазменно-электролитических процессов. Установлено, что для современных промышленных изделий требуются покрытия, наносимые с высокой точностью, что требует измерений толщины покрытия непосредственно в процессе формирования. Это может быть реализовано в новом контуре обратной связи, обеспечивающем косвенное измерение ненаблюдаемой величины – толщины покрытия. Изучены основные методы контроля плазменно-электролитических процессов, основанные на измерении параметров электрического тока, гидродинамических параметров электролита, газовыделения, микроразрядов (интенсивность и спектр излучения), электролиза раствора. Выявлены методы активной идентификации процесса на основе импедансной спектроскопии и

методы косвенной идентификации на основе спектрального анализа электрических, оптических и акустических параметров.

В результате анализа выявлены особенности механизма процесса ПЭО как объекта измерения и контроля и систематизированы в виде феноменологической модели (рисунок 1), что позволило определить пути совершенствования существующих решений и предложить структуру ИИС (рисунок 2), что подробно рассмотрено в последующих главах.



Рисунок 1 – Феноменологическая модель процесса ПЭО

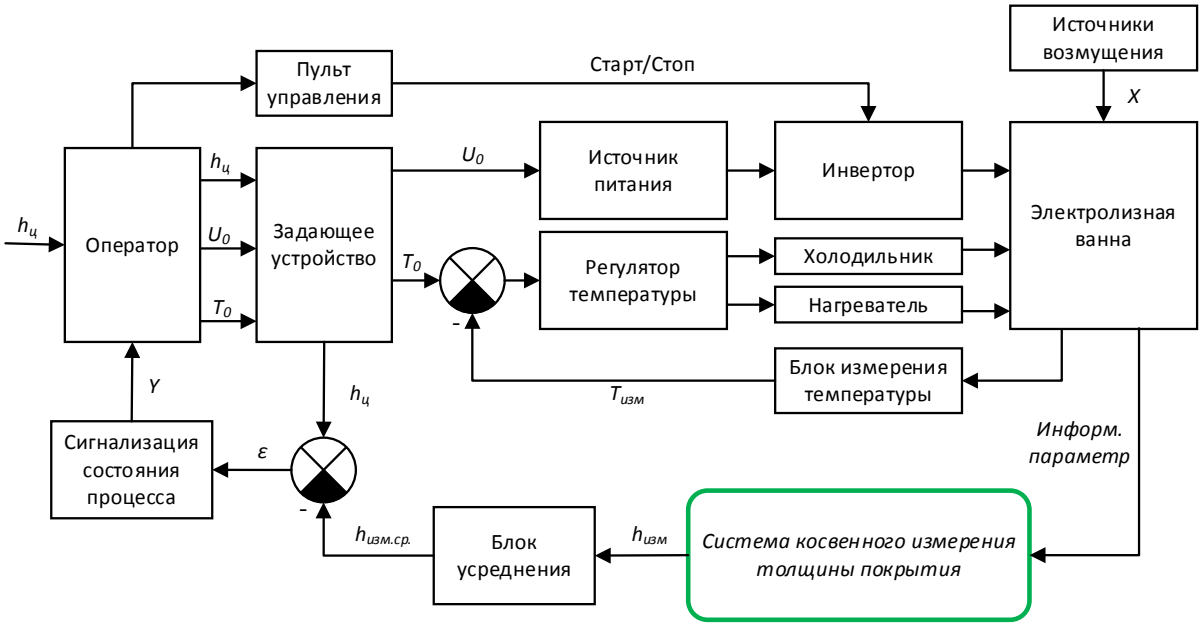


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления ИИС ПЭО

Установлена необходимость проведения математического моделирования распределения плотности тока в электролизере вследствие неравномерности формирования ПЭО покрытий на деталях сложного профиля. По итогам анализа определены области, требующие проведения научных исследований, сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования процесса ПЭО как объекта измерения и контроля. Для экспериментов использовались образцы из алюминия. В качестве электролита применялся общепринятый щелочной силикатно-фосфатный электролит. Пример внешнего вида и поперечного шлифа получаемого покрытия приведен на рисунке 3. Обработка проводилась на установке ПЭО со стабилизацией температуры электролита с погрешностью ±1 °С, выходным импульсным напряжением до +600 В, мощностью 30 кВт, обеспечивающей запись сигналов тока и напряжения с частотой дискретизации до 1 МГц на канал. Также использовался режим с разверткой напряжения 0-600-0 В для определения вольтамперной характеристики процесса. Для анализа оптических спектров микроразрядов применялся спектрометр Avantes в диапазоне длин волн от 300 до 1000 нм.

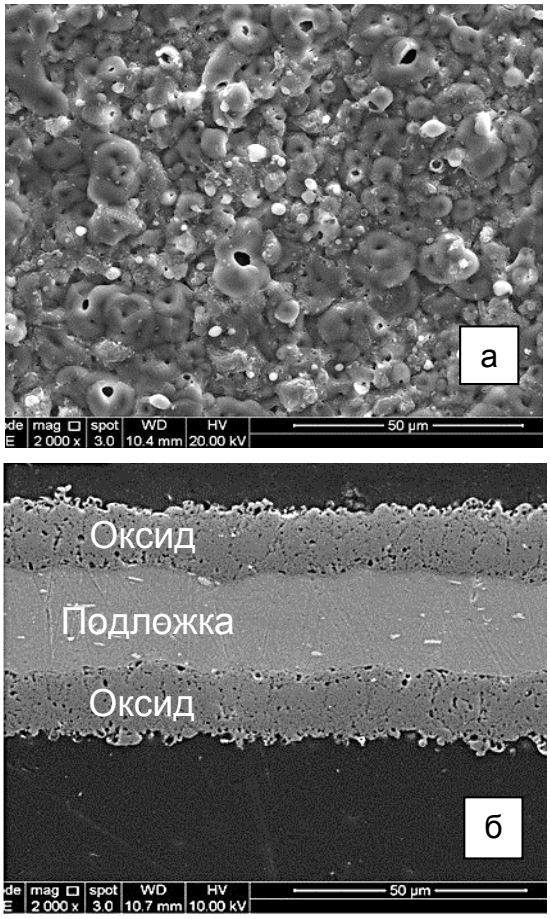


Рисунок 3 – Внешний вид (а) и поперечный шлиф (б) ПЭО покрытия на алюминиевой фольге

В третьей главе представлена разработка методики моделирования распределения плотности тока в электролите и покрытии. Методом конечных разностей решалась краевая задача распределения потенциала и плотности тока с учетом нелинейности, вносимой микроразрядами в покрытии, с использованием экспериментальной вольтамперной характеристики системы. Для этого при моделировании приповерхностного слоя вводилась анодная область сетки со свойствами, отличающимися от свойств электролита.

В первом приближении система описывалась эквивалентной схемой, включающей линейное сопротивление электролита R_1, и нелинейное сопротивление оксидного слоя (анодной области) R_2, соединенных последовательно. К цепи прикладывалось напряжение питания U, а результирующий ток I производил падения напряжения U_1 и U_2 на этих двух сопротивлениях соответственно.

Решалась двумерная задача в области плоскопараллельного поля с граничными условиями Дирихле. Прямоугольный анод был помещен в центр, а катод формировал периметр системы. Для данной задачи уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \qquad (1)$$

решалось методом многосеточных моделей, с определением потенциала $\varphi_{i,j}$ для каждого узла. Полученная матрица потенциалов использовалась для вычисления тока в системе I_{calc1} путем взятия интеграла по периметру анода. Интеграл плотности тока по поверхности анода S_a позволил определить величину тока через электролит:

$$I_{calc1} = \oint_{S_a} \vec{\delta}\,\overrightarrow{ds} = \oint_{S_a} \gamma \vec{E}\,\overrightarrow{ds}, \qquad (2)$$

где $\vec{\delta}$ – плотности тока; S_a – контур интегрирования вокруг анода; γ – удельная электропроводность электролита; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, которая определялась численно в каждом узле сетки. Контур интегрирования для вычисления тока был выбран вдоль периметра прямоугольного анода, заданного координатами $(x_1\ y_1; x_2\ y_1; x_2\ y_2;\ x_1\ y_2)$. Формула для вычисления тока системы следующая:

$$I_{calc1} = \left(\sum_{j=1}^{n} \left|\delta_{(x)m_1,j}\right| \Delta y + \sum_{j=1}^{n} \left|\delta_{(x)m_2,j}\right| \Delta y + \sum_{i=1}^{m} \left|\delta_{(y)i,n_1}\right| \Delta x + \sum_{i=1}^{m} \left|\delta_{(y)i,n_2}\right| \Delta x \right) \cdot z_3, \qquad (3)$$

где z_3 – продольный размер системы вдоль оси z; $\Delta x, \Delta y$ – шаг сетки; m_1, n_1, m_2, n_2 – координаты узлов сетки, в пределах которых вычисляется плотность тока.

На первом этапе проводился расчет падения напряжения на электролите при расчете распределения потенциала с граничным условием φ_a= 1 В. Это значение было скорректировано умножением на коэффициент $K_0 = U_{exp}/U$ для того, чтобы потенциалы совпали с точностью ± 5% с экспериментально измеренными значениями в ряде выбранных точек (рисунок 4*а*). В силу допущения о линейности и однородности электролита как проводящей среды такое масштабирование возможно.

На втором этапе осуществлялся расчет эффективной глубины системы z_3 через умножение матрицы потенциалов на коэффициент $K_1 = I_{exp}/I_{calc1}$ для приведения в соответствие расчетного и экспериментального токов. Затем вычислялось первичное распределение плотности тока (РПТ) по поверхности анода с использованием разности потенциалов на последнем шаге сетки вокруг анода.

Анодная область, описывающая нелинейность системы, включала в себя анод и прилегающую к нему небольшую область электролита, ограниченную прямоугольником S_{area1} с пониженной относительно электролита проводимостью.

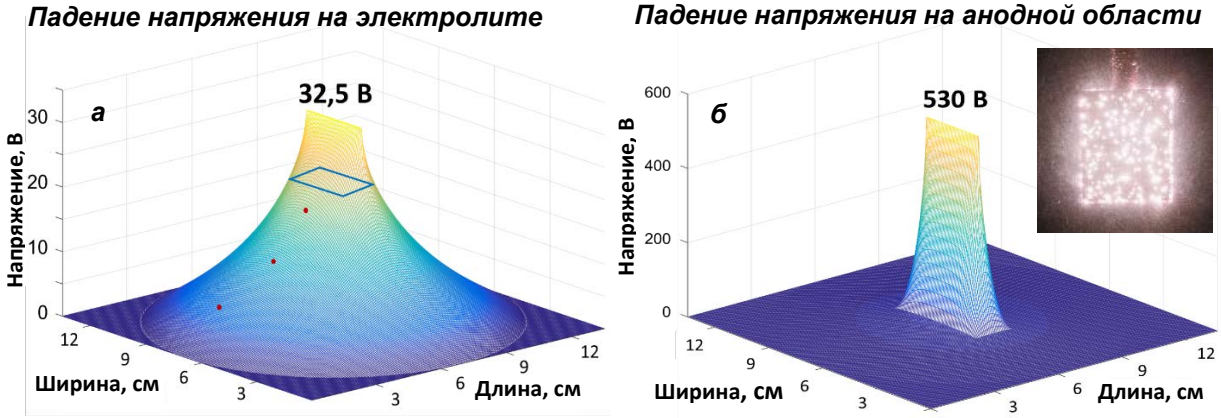


Рисунок 4 – Результаты моделирования распределения потенциала в электролите (а) и в анодной области (б)

Контур интегрирования S_{area2} для вычисления тока системы I_{calc2} задавался координатами, которые варьировались в пределах границы анодной области и поверхности металлического анода для коррекции формы распределения плотности тока через коэффициент $0 < K_1 < 1$. Потенциал анода на этом этапе устанавливался на уровне рабочего напряжения электролизера U_a. Граничное условие на месте стыка анодной области и электролита принималось в соответствии с матрицей потенциалов, полученной ранее. Затем вычислялась новая матрица потенциалов внутри анодной области (рисунок 4*б*). Эффективная проводимость анодной области определялась как $\gamma_{oxide} = K_3 \cdot \gamma$, где $K_3 = I_{exp}/I_{calc2}$ – коэффициент коррекции проводимости, который также определялся из условия равенства расчетного интегрального тока I_{calc2}, вычисленного по уравнению (3) и экспериментального тока I_{exp}.

Затем была учтена нелинейность системы путем использования экспериментальной ВАХ процесса. Для этого вычислялось распределение падения напряжения в оксидном слое по матрице потенциалов, полученной на втором этапе. Каждая точка получившегося распределения напряжения соотносилась с вольтамперной характеристикой, учитывая таким образом реальные свойства процесса ПЭО. Это распределение использовалось для получения вторичного РПТ в покрытии. Блок схема-алгоритма вычислений приведена на рисунке 5. Полученное вторичное РПТ использовалось для оценки распределения толщины покрытия на основе закона Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{z} \cdot \delta \cdot s \cdot t \cdot \eta, \qquad (4)$$

где F = 96484 Кл/моль число Фарадея; z – количество электронов в электрохимической реакции формирования оксидного слоя; M – молярная масса оксида, г/моль; δ – плотность тока на аноде, А/м^2; t – время обработки, с; η – выход по току для электрохимических реакций. Толщина покрытия определяется через плотность формируемого оксида (рисунок 6*г*, кривая 1). Результатом решения явилось распределение толщины покрытия вдоль поверхности образца (рисунок 6*г*, кривая 2).

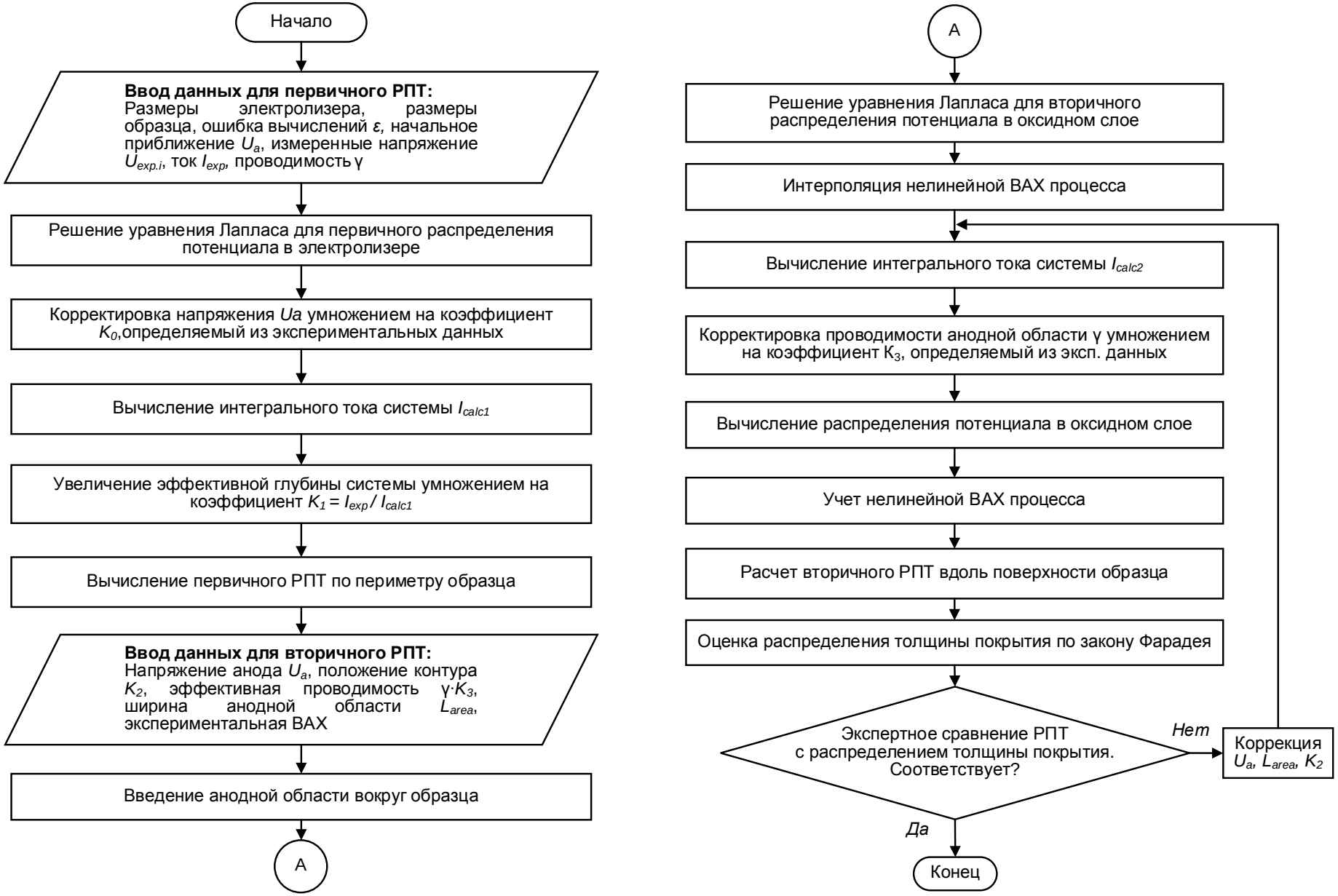


Рисунок 5 – Блок-схема вычисления плотности тока в покрытии

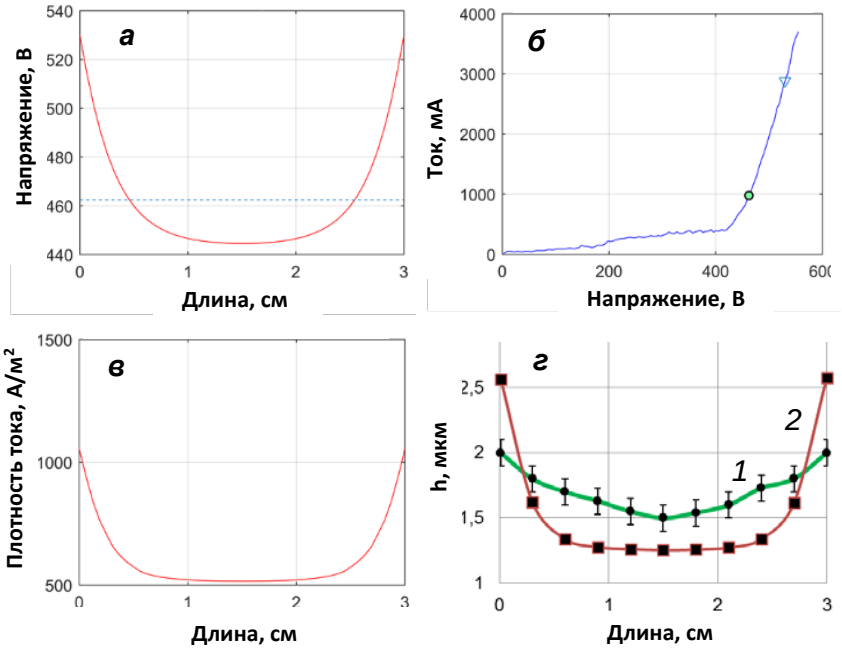


Рисунок 6 – Результаты моделирования распределения плотности тока в электролите и покрытии: падение напряжения вдоль образца (а); ВАХ (б); вторичное РПТ (в); распределение толщины покрытия (г); эксперимент (1), модель (2)

Полученное распределение качественно соответствует измеренному распределению толщины покрытия, что позволяет оценивать неравномерность формируемых покрытия для изделий сложной формы и способствует повышению точности измерения толщины покрытия в ходе обработки.

Четвертая глава посвящена разработке способов контроля процесса ПЭО как объекта измерения и контроля. Для их обоснования была разработана феноменологическая модель процесса ПЭО, состоящая из трех основных блоков, включающих процессы: на рабочем электроде, в объеме электролита, на противоэлектроде (см. рисунок 1). Феноменологическая модель позволяет обосновать способы измерения толщины покрытия в ходе ПЭО.

Разработан способ контроля процесса ПЭО по электрическим характеристикам. В качестве информативного параметра используется величина среднего значения напряжения в импульсном режиме обработки с фиксированной амплитудой импульсов напряжения. Среднее значение напряжения увеличивается во времени в связи с изменением постоянной времени переходных процессов как реакции электролизера на отключение источника и отражает изменение сопротивления покрытия, напрямую связанного с его толщиной. На рисунке 7*а* показаны примеры осциллограмм, где кривая U_1 соответствует осциллограмме после 5 минут обработки со средним значением напряжения $U_{ср1}$, кривая U_2 и $U_{ср2}$ – после 35 минут, а $U_{ид}$ – идеальной форме импульса для чисто резистивной нагрузки. Данная величина имеет высокую степень корреляции ($R^2 > 0{,}98$) с толщиной формируемого покрытия (рисунок 7*б*) и использована для косвенного измерения толщины покрытия без прерывания процесса.

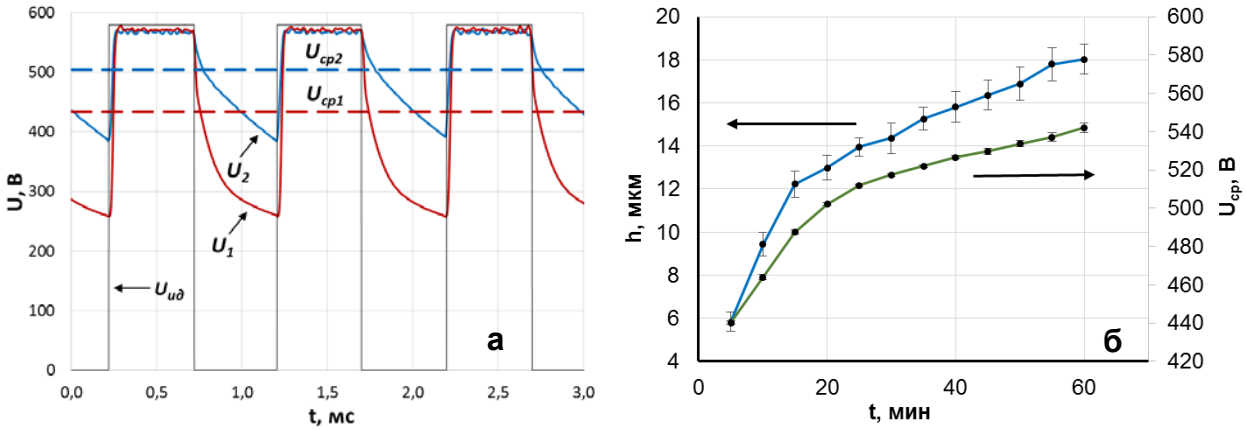


Рисунок 7 – Осциллограммы напряжения обработки при ПЭО в импульсном режиме (а); графики роста толщины покрытия и среднего значения напряжения (б)

Разработан способ контроля процесса ПЭО по оптическим характеристикам. Оптический спектр излучения микроразрядов демонстрирует снижение интенсивности линий материала подложки (Al 396 нм) и рост интенсивности линий компонентов электролита (Na 589 нм). Физически это объясняется тем, что с увеличением времени обработки количество микроразрядов существенно уменьшается, но средний размер и яркость отдельных вспышек увеличивается, а в связи с ростом толщины покрытия доля излучения, соответствующая материалу подложки, уменьшается. Выявлено, что отношение интенсивности линии компонента электролита к интенсивности линии металла подложки $\ln(I_{Na}/I_{Al})$ в логарифмическом масштабе имеет высокую степень корреляции с толщиной покрытия (рисунок 8) в ходе обработки ($R^2 > 0{,}98$). Данная зависимость использована для косвенного измерения толщины покрытия без прерывания обработки.

Тарировочные прямые, полученные экспериментальным путем для двух методов измерения толщины, представлены на рисунке 9*а* и 9*б* соответственно.

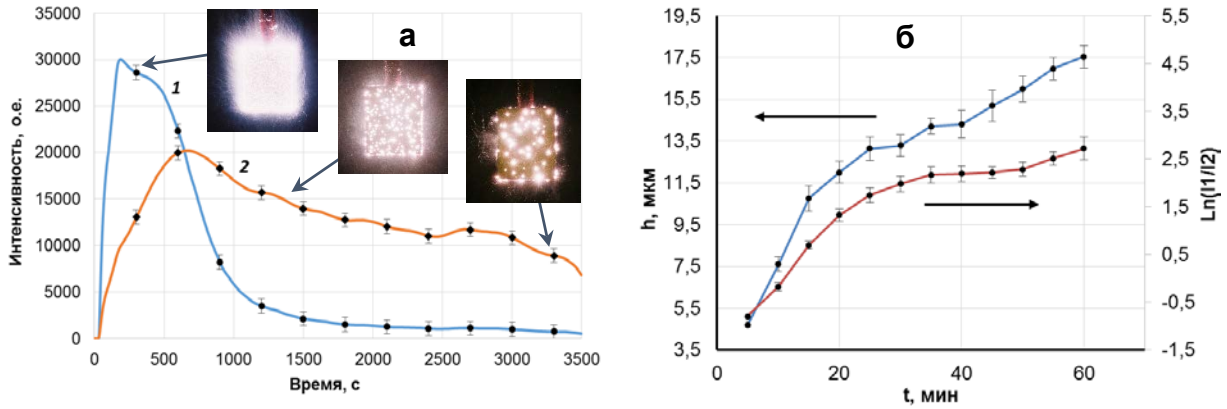


Рисунок 8 – Динамика изменения интенсивности спектральных линий Al 396 нм (1) и Na 589 нм (2) в ходе ПЭО и фотографии микроразрядов (а); за висимости $\ln(I_{Na}/I_{Al})$ и толщины покрытия от времени (б)

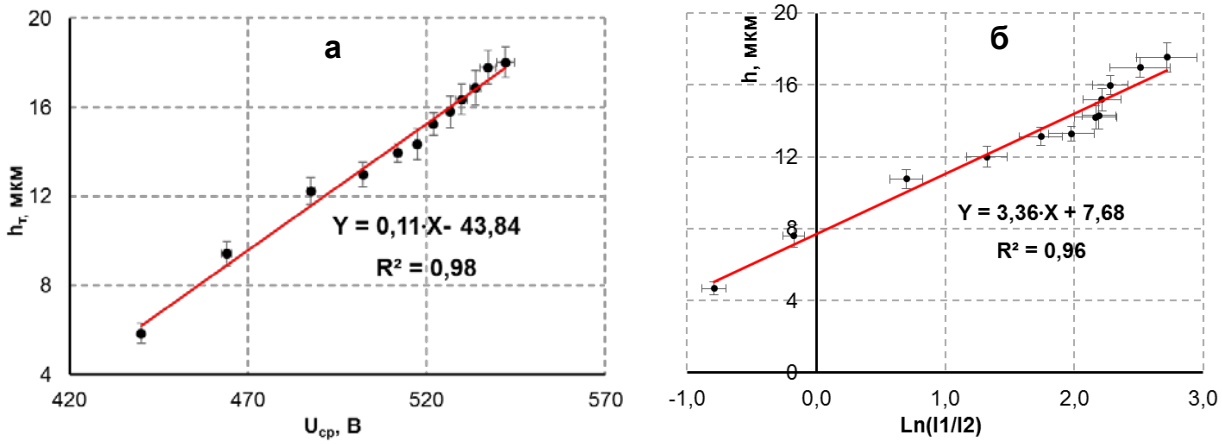


Рисунок 9 – Тарировочные прямые для способов измерения толщины покрытия по величине среднего значения напряжения (а) и интенсивности спектральных линий (б)

Проведена экспериментальная оценка точности измерения предложенных способов. Получено семейство тарировочных кривых. Построены гистограммы распределения ошибок измерений, проверена гипотеза о нормальном распределении ошибок по критерию χ^2 Пирсона. Определена величина относительной погрешности измерения для каждого способа, которая составила не более ±9 % от диапазона измерения, что достаточно для практического применения разработанных способов.

Пятая глава посвящена разработке ИИС для процесса ПЭО. Разработана структурная схема ИИС с двумя контурами обратной связи с использованием выявленных закономерностей (см. рисунок 2). В систему входят источник питания и задающее устройство, с помощью которого оператор выставляет требуемые параметры технологического процесса U_0 и T_0 для достижения заданной толщины покрытия $h_ц$. Первый контур обратной связи отвечает за регулирование температуры в заданных пределах. Второй состоит из блоков косвенного измерения толщины покрытия и усреднения и позволяет оператору получать информацию о состоянии поверхности без прерывания процесса. По достижении целевой толщины покрытия срабатывает сигнализация, рекомендующая оператору отключить питание электролизера и завершить процесс. Рассмотрены два варианта построения системы косвенного измерения толщины покрытия (рисунок 10). В первом варианте в системе реализуется способ, основанный на измерении среднего значения напряжения, устройство для реализации которого состоит из фильтра низких частот, аналого-цифрового преобразователя, блока расчета среднего значения напряжения и блока расчета толщины покрытия. Во втором варианте – способ, основанный на анализе оптического излучения микроразрядов, устройство для реализации которого состоит из спектрометра, модуля сопряжения с персональным компьютером и блока расчета толщины покрытия по спектральным линиям. Разработаны алгоритмы программного управления ИИС ПЭО для двух рассмотренных вариантов. На рисунке 11 приведен пример измерения толщины покрытия в ходе ПЭО по электрическим характеристикам процесса с помощью разработанной ИИС.

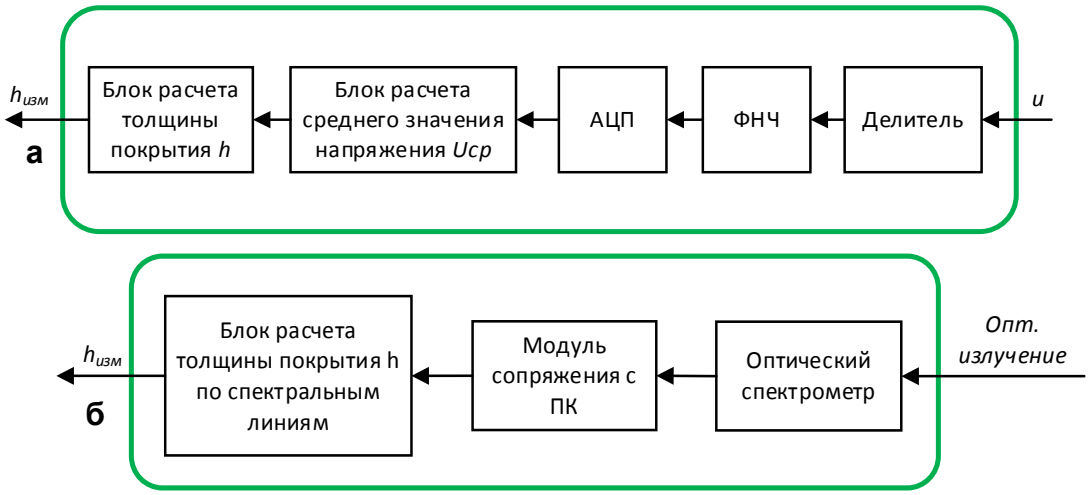


Рисунок 10 – Блок-схема измерительной части в контуре обратной связи ИИС ПЭО на основе электрических (*а*) и оптических (*б*) характеристик

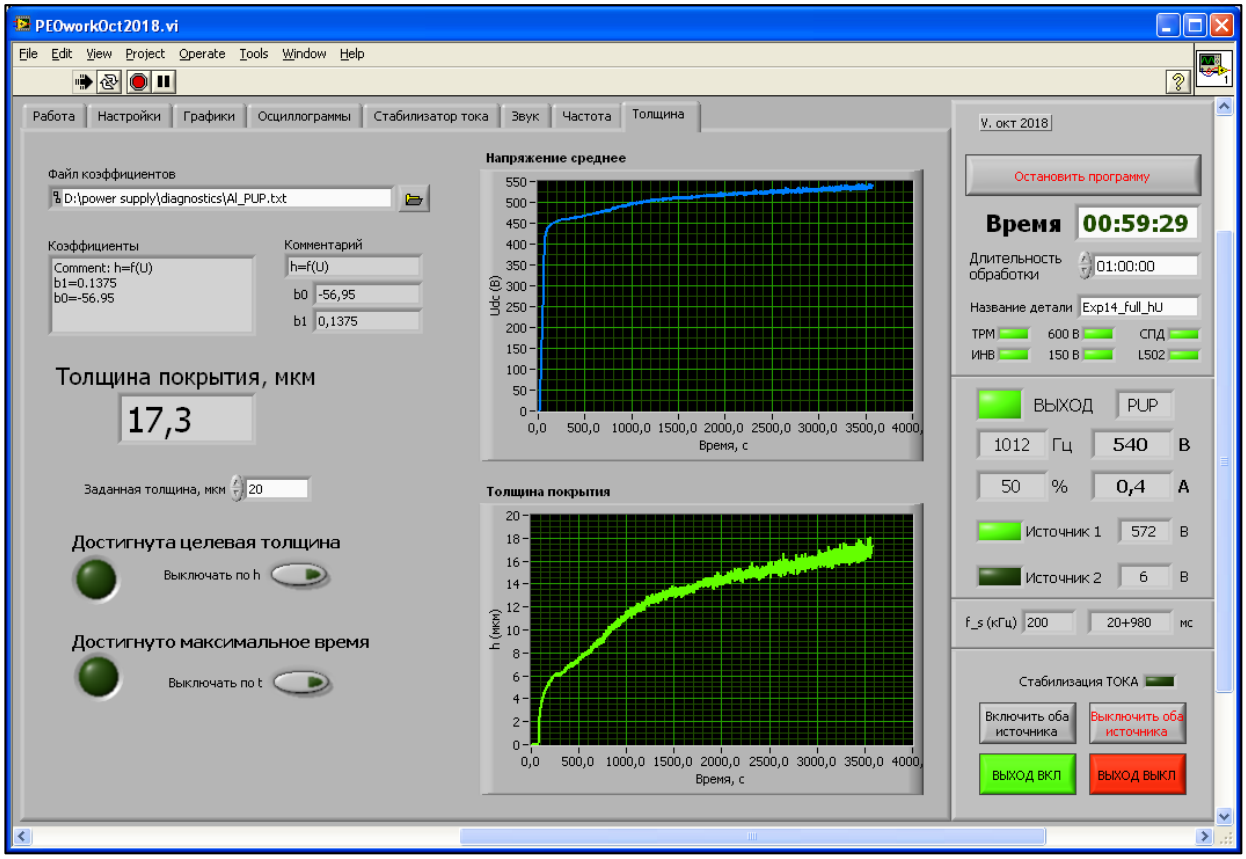


Рисунок 11 – Интерфейс программной части ИИС ПЭО для измерения толщины покрытия по электрическим характеристикам

Внедрение в промышленности ИИС с диагностикой толщины покрытия и отключением источника питания при достижении заданного значения толщины покрытия позволило повысить качество оксидирования алюминиевых сплавов за счет снижения числа бракованных деталей, имеющих избыточную или недостаточную толщину покрытия, с 5-6% до 2-3%.

В сравнении с аналогичными ИИС, построенными на основе способов определения толщины покрытия с использованием постоянных времени переходных процессов на электролизере, спектрального состава сигналов тока и напряжения, результатов статистического анализа популяции микроразрядов на поверхности детали, разработанные способы отличаются большей простотой реализации, что повышает надежность измерений.

В **приложениях** приведены таблицы измерений электрических и оптических характеристик процесса, акт использования результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современного состояния исследований в области измерения характеристик плазменно-электролитических процессов, формализованы механизмы явлений в виде феноменологической модели, *что позволило* предложить новые подходы к контролю толщины покрытия в ходе ПЭО, *отличающиеся* установлением взаимосвязей толщины покрытия с изменением формы импульсов напряжения на электролизере и со снижением интенсивности линии оптического излучения материала подложки на фоне роста линии компонента электролита.

2. Разработаны способы косвенного измерения толщины покрытия в ходе ПЭО на основе экспериментально подтвержденных взаимосвязей с электрическими и оптическими характеристиками процесса, *отличающиеся* применением среднего значения импульсного напряжения на электролизере, а также использованием отношения интенсивности двух спектральных линий в оптическом излучении, соответствующих компоненту электролита и материалу подложки, взятых в логарифмическом масштабе, *что позволяет* контролировать толщину покрытия с абсолютная погрешностью ±1,81 мкм и ±1,89 мкм соответственно, что достаточно для практического применения, требующего в настоящее время попадание в коридор ± 5 мкм при целевой толщине покрытия 30-40 мкм.

3. Предложена методика решения краевой задачи распределения плотности тока в электролизере и покрытии, *отличающаяся* учетом нелинейности вольтамперной характеристики, *что позволяет* осуществить структурную оптимизацию электролизера для снижения неравномерности формирования покрытия по поверхности детали сложной формы, что снижает погрешность интегральной оценки толщины покрытия косвенными методами.

4. Разработана структура ИИС и ключевые элементы ее аппаратного и программного обеспечения для реализации предложенных способов измерения толщины покрытия, *отличающиеся* созданием нового контура обратной связи, обеспечивающего косвенное измерение ненаблюдаемой переменной – толщины покрытия с погрешностью в коридоре ± 5 мкм и завершение процесса при достижении требуемого значения, *что позволяет* при внедрении на производстве снизить число бракованных деталей, имеющих избыточную или недостаточную толщину покрытия, с 5-6% до 2-3%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Горбатков, М.В. Измерение толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического оксидирования по оптическим спектрам / Горбатков М.В., Е.В. Парфенов, В.Р. Мукаева, С.В. Жернаков, А.Л. Ерохин // Датчики и системы. – 2018. № 1. – С. 36–39.

2. Мукаева, В.Р. Исследование акустического спектра процесса электролитно-плазменного полирования для диагностики шероховатости поверхности / В.Р. Мукаева, М.В. Горбатков, Р.Г. Фаррахов, Е.В. Парфенов, А.Л. Ерохин // Вестник УГАТУ. – 2017. – Т. 21, № 3 (77). – С. 32–39.

3. Парфенов, Е.В. Автоматизированная технологическая установка для исследования электролитно-плазменных процессов / Е.В. Парфенов, Р.Г. Фаррахов, В.Р. Мукаева, М.В. Горбатков, И.А. Мелемчук, А.Г. Стоцкий, Я.В. Чернейкина // Вестник УГАТУ. – 2016. Т. 20, № 4 (74). – С. 23–31.

4. Горбатков, М.В. Функциональная модель процесса электролитно-плазменной обработки как объекта управления / М.В. Горбатков, Е.В. Парфенов, С.В. Жернаков, Р.Р. Невьянцева // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18, № 3. – (64). С. 181–188.

Статьи в рецензируемых журналах, издаваемых за рубежом (Scopus):

5. Farrakhov, R.G. Plasma electrolytic oxidation treatment mode influence on corrosion properties of coatings obtained on Zr-1Nb alloy in silicate-phosphate electrolyte (Влияние режима плазменно-электролитического оксидирования на коррозионные свойства покрытий на сплаве Zr-1Nb, полученных в силикатно-фосфатном электролите) / R.G. Farrakhov, V.R. Mukaeva, A.R. Fatkullin, M.V. Gorbatkov, P.V. Tarasov, D.M. Lazarev, N. Ramesh Babu, E.V. Parfenov // 2nd International Conference on New Material and Chemical Industry. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 292. – P. 012006.

6. Parfenov, E.V. Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modelling (Об интеллектуальных технологиях в области электролитно-плазменной обработки: обзор методологических подходов к моделированию процесса) / E.V. Parfenov, A. Yerokhin, R.R. Nevyantseva, M.V. Gorbatkov, C.-J. Liang, A. Matthews // Surface and Coatings Technology. – 2015. – V. 269. – P. 2 22.

Патенты:

7. Пат. Российская Федерация № 2672036 G01B 11/06, C25D 21/12. Способ измерения толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического оксидирования и устройство для его реализации / М.В. Горбатков, Е.В. Парфенов, А.Л. Ерохин, В.Р. Мукаева. – Опубл. 08.11.2018.

8. Пат. Российская Федерация № 2668344 G01B 7/06. Способ измерения толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического

оксидирования / М. В. Горбатков, Е.В. Парфенов, П.В. Тарасов, В.Р. Мукаева, Р.Г. Фаррахов. – Опубл. 28.09.2018.

9. Пат. Российская Федерация № 2611632 G 01 B 7/06 Способ определения толщины покрытия в ходе процесса твердого анодирования / Е.В. Парфенов, И.Ю. Шевчук, М.В. Горбатков, А.В. Гусаров, Д.М. Лазарев, В.Р. Мукаева, А.Р. Фаткуллин, Р.Г. Фаррахов, З.Г. Порутчикова, Н.А. Назарова. – Опубл. 28.02.2017.

Программы для ЭВМ:

10. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018660868. Программа для решения краевой задачи распределения плотности тока при плазменно-электролитическом оксидировании с учетом нелинейных характеристик / М.В. Горбатков, Е.В. Парфенов, А.Л. Ерохин. – Зарег. 29.08.2018.

11. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2013618088. Программа микроконтроллера для спектральной диагностики и управления процессами электролитно-плазменной обработки / М.В. Горбатков, Е.В. Парфенов, В.Р. Мукаева. – Зарег. 29.09.2013.

Статьи в других изданиях:

12. Фаррахов, Р.Г. Влияние состава электролита на защитные свойства ПЭО-покрытия на циркониевом сплаве Zr-1Nb / Р.Г. Фаррахов, Е.В. Парфенов, В.Р. Мукаева, М.В. Горбатков, П.В. Тарасов, А.Р. Фаткуллин, Н. Рамешбабу, Б. Рависанкар // Электронная обработка материалов. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 23-30.

13. Горбатков, М.В. Устройство импульсного управления и диагностики процесса электролитно-плазменной обработки / М.В. Горбатков // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. – С. 96.

14. Горбатков, М.В. Микроконтроллерное устройство импульсного управления и диагностики для процесса плазменно-электролитического оксидирования / М.В. Горбатков // Мавлютовские чтения: материалы Всероссийской научной конференции. – Уфа: изд. УГАТУ. – 2012. – Т. 3. – С. 82-83.

Диссертант  М.В. Горбатков