

На правах рукописи



ЛАЗАРЕВ Денис Михайлович

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ
ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ МИКРОРАЗРЯДОВ**

**Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2013

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

Научный руководитель канд. техн. наук, доцент
Парфенов Евгений Владимирович

Официальные оппоненты д-р техн. наук, проф.
Тагирова Клара Фоатовна,
профессор кафедры технической кибернетики
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»

канд. техн. наук, доцент
Кирюшин Олег Валерьевич,
доцент кафедры автоматизации технологических
процессов и производств ФГБОУ ВПО
«Уфимский государственный нефтяной
технический университет»

Ведущая организация ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский
государственный технологический университет
имени К. Э. Циолковского (МАТИ)»

Защита диссертации состоится «12» апреля 2013 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, Республика Башкортостан, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «___» марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) является современной наукоемкой технологией и представляет собой процесс наращивания оксидных покрытий на поверхностях легких металлов и их сплавов. Высокая износостойкость, стойкость к коррозии, хорошие декоративные свойства оксидных покрытий, формируемых методом ПЭО, обуславливают все большее применение таких покрытий в автомобильной, судостроительной и других областях промышленности.

Широкое внедрение в производство плазменно-электролитических процессов неразрывно связано с их автоматизацией. При автоматизации необходимо учитывать, что процесс ПЭО проводится при высоких напряжениях (400–1000 В), в ходе обработки необходимо контролировать заданный режим работы установки, осуществлять сбор и обработку информации о протекании процесса, принимать решение о его завершении. Указанные особенности требуют интеграции оператора установки и управляющей ЭВМ в автоматизированную систему управления технологическим процессом. Однако в связи с тем, что нанесение покрытий методом ПЭО предложено сравнительно недавно, создание промышленных автоматизированных систем управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования (АСУТП ПЭО) сдерживается из-за недостаточной изученности процесса как объекта управления. Кроме того, при создании АСУТП ПЭО необходимо решать задачу контроля толщины покрытия, решение которой затруднено из-за невозможности непосредственного измерения свойств поверхностного слоя детали в ходе обработки. Решение задачи контроля толщины покрытия усложняется тем, что число непосредственно наблюдаемых переменных состояния объекта управления ограничено.

Таким образом, возникает необходимость решения актуальной научной задачи, связанной с разработкой автоматизированной системы управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования с контуром контроля толщины покрытия в ходе обработки.

Известно, что в ходе процесса ПЭО на обрабатываемой поверхности возникают многочисленные микроразряды, оказывающие существенное воздействие на оксидный слой и материал сплава, и выглядящие как видимые невооруженным глазом светящиеся области диаметром от 0,1 до 1 мм. В ходе процесса ПЭО отмечается перемещение микроразрядов по поверхности детали, изменение спектра их свечения, видимого размера и плотности распределения в зависимости от условий и длительности обработки, а, следовательно, от свойств поверхности, и, в первую очередь, от толщины покрытия. Таким образом, значительный объем информации о состоянии поверхностного слоя, а также о механизме процесса ПЭО как объекта управления может быть извлечен при обработке фотографий популяции микроразрядов.

Цель работы. Повышение эффективности процесса плазменно-электролитического оксидирования за счет разработки способов управления на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов.

Для достижения цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Анализ методов построения автоматизированных систем управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования.
2. Исследование характеристик процесса плазменно-электролитического оксидирования как объекта управления в составе АСУТП.
3. Разработка алгоритма обработки фотографий микроразрядов и пакета прикладных программ для расчета статистических характеристик их популяции в составе системы сбора и обработки данных АСУТП ПЭО.
4. Разработка способов автоматизированного управления технологическим процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов.
5. Разработка и апробирование аппаратно-программного комплекса АСУТП, реализующего способы автоматизированного управления процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов.

Научная новизна работы

1. Новизна результатов анализа методов построения автоматизированных систем управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования заключается в выявлении структуры АСУТП ПЭО, *отличающейся тем, что* в канале обратной связи обосновано использование фотографического метода регистрации микроразрядов, позволяющего по статистическим характеристикам их популяции рассчитывать толщину покрытия.
2. Новизна результатов исследования характеристик процесса ПЭО как объекта управления в составе АСУТП заключается в выявлении закономерностей, связывающих непосредственно наблюдаемые переменные объекта управления – напряжение источника и статистические характеристики микроразрядов с ненаблюдаемыми свойствами поверхности, такими как толщина покрытия и шероховатость, *отличающихся тем, что* в контуре обратной связи использованы средний размер и плотность распределения микроразрядов для косвенного измерения толщины покрытия.
3. Новизна алгоритма обработки фотографий популяции микроразрядов заключается в автоматическом распознавании местоположения и размера микроразрядов, *отличающегося тем, что* позволяет создавать пакеты прикладных программ, интегрированные в систему сбора и обработки данных АСУТП ПЭО для расчета статистического распределения микроразрядов по размерам, определять средний размер и плотность распределения микроразрядов в широком диапазоне экспозиций (программы для ЭВМ №№ 2009611127, 2012660449).
4. Новизна способов автоматизированного управления заключается в формализации расчета толщины покрытия и момента окончания процесса, *отличающейся тем, что* расчет производится только по значениям непосредственно наблюдаемого среднего размера и плотности распределения микроразрядов либо с помощью интегрального информативного параметра, либо с помощью нейросетевой модели (патент РФ № 2435134).

5. Новизна аппаратно-программного комплекса АСУТП заключается в контуре контроля толщины покрытия и принятия решения об окончании процесса, *отличающегося тем, что* комплекс реализует разработанные способы автоматизированного управления технологическим процессом ПЭО по характеристикам микроразрядов.

Практическая значимость работы заключается в повышении эффективности плазменно-электролитического оксидирования алюминиевых сплавов на 7–10 % за счет использования в составе автоматизированной системы управления контура контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов, позволяющего косвенно измерять толщину покрытия с погрешностью 4–6 % и исключать передержку обрабатываемой детали в ходе ПЭО за счет поддержки принятия решения о завершении процесса. Практическая значимость работы подтверждена актами о внедрении результатов работы на ОАО «КумАПП» и в филиале ФГБОУ ВПО «УГАТУ» в г. Кумертау.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, планирования эксперимента, цифрового фотографирования, электронной и оптической микроскопии, измерения толщины и шероховатости поверхности, корреляционного и статистического анализа, распознавания образов и цифровой обработки изображений, нейросетевого моделирования. Обработка экспериментальных данных и исследование нейросетевых моделей проводились на основе оригинальных программ для персональных ЭВМ, составленных с использованием пакета прикладных программ *MATLAB*.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа основ и методов построения автоматизированных систем управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования (*соответствуют п. 3 паспорта специальности*).

2. Результаты исследования характеристик процесса плазменно-электролитического оксидирования как объекта управления в составе АСУТП (*соответствуют п. 3 паспорта специальности*).

3. Алгоритм обработки фотографий микроразрядов и пакет прикладных программ для расчета статистических характеристик их популяции в составе системы сбора и обработки данных АСУТП ПЭО (*соответствует п.8 и п. 10 паспорта специальности*).

4. Способы автоматизированного управления технологическим процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов (*соответствуют п. 3 и п. 15 паспорта специальности*).

5. Результаты апробирования аппаратно-программного комплекса АСУТП, реализующего способы автоматизированного управления процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов (*соответствуют п. 10 и п. 18 паспорта специальности*).

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов основана на использовании апробированных научных положений и методов исследования, корректном применении математического аппарата и методов

обработки данных, согласовании новых результатов с известными теоретическими положениями. Достоверность полученных теоретических положений и выводов работы подтверждается комплексом экспериментальных исследований и результатами имитационного моделирования. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением современных средств измерения свойств поверхности, обработанной в ходе ПЭО, использованием сертифицированной и аттестованной измерительной аппаратуры, корректной статистической обработкой данных эксперимента.

Апробация результатов работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и Всероссийских научных конференциях: Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2007-2012 гг.), III Международная научно-техническая конференция «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей» (Кострома, 2010г.), Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2007–2010 гг.), Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2008, 2011, 2012 гг.).

Работа выполнена в рамках следующих научных программ:

- Договор о творческом сотрудничестве между ОАО «КумАПП» и ФГБОУ ВПО «УГАТУ» от 04.08.2011 г. № 545/98.
- Договор о создании (передаче) научно-технической продукции № АП-ТО-15-12-ХГ-929/48 от 29.06.2012 г. между ОАО «КумАПП» и ФГБОУ ВПО «УГАТУ».
- Грант Британского Королевского общества на совместные научные исследования с Университетом Шеффилда № IE111315 на 2012 год.
- Премия имени А.С. Палатникова в области науки, техники, организации производства и инноваций (г. Кумертау, 2008, 2011 гг.).

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 1 патенте РФ и 2 свидетельствах об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, включает 184 страницы текста, содержит 55 иллюстраций, 35 таблиц и библиографический список из 142 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проанализировано современное состояние и известные подходы к исследованиям в области автоматизации процесса плазменно-электролитического оксидирования. Показана актуальность решаемой задачи на основе анализа направлений научных исследований в области управления

процессом ПЭО. Обоснована необходимость построения АСУ ТП ПЭО, в составе которых функционируют модули контроля параметров состояния поверхностного слоя и поддержки принятия решения об окончании процесса нанесения покрытия.

Для решения поставленных задач проведен анализ работ отечественных и зарубежных ученых, внесших значительный вклад в изучение объекта и предмета исследования. Исследования В. В. Баковец, В. И. Белеванцева, П. С. Гордиенко, А. Л. Ерохина, Ю. В. Магуровой, А. И. Мамаева, В. С. Руднева, Л. А. Снежко, И. В. Суминова, О. П. Терлеевой, А. В. Тимошенко, В. И. Черненко и др. посвящены изучению физико-химических и технологических особенностей процесса ПЭО. Подходы к мониторингу и диагностике процесса ПЭО по электрическим, оптическим и акустическим сигналам рассмотрены в исследованиях М. Бойнет, П. С. Гордиенко, Ф. Джаспард-Мекюсон, А. Л. Ерохина, Ю. В. Магуровой, А. И. Максимова, А. И. Мамаева, В. А. Мамаевой, А. Маттьюза, Э. Матыкиной, Ф. Мекюсон и др. Подходы к построению систем управления технологическими процессами ПЭО и электролитно-плазменной обработки рассматриваются в работах В. Н. Борилова, С. А. Горбаткова, А. И. Мамаева, А. Е. Михеева, Е. В. Парфенова, Л. А. Снежко, И. В. Суминова, В. И. Черненко и др. Теоретические основы разработки современных систем управления сложными техническими объектами, в том числе, технологическими процессами механической, электрохимической, электротермической и электроэрозионной обработки с использованием диагностики неконтролируемых переменных состояния объекта рассматриваются в работах В. В. Атрощенко, В. И. Васильева, В. П. Житникова, А. Н. Зайцева, В. Ц. Зориктуева, Б. Г. Ильясова, Г. Г. Куликова, А. Г. Лютова, К. Ф. Тагировой и др.

Проведен анализ особенностей процесса ПЭО как объекта управления. Показано, что при напряжениях 200...800 В на поверхности вентильных металлов, таких как алюминий, титан, тантал, цирконий и др. образуется полупроводниковый оксид, который при анодном включении детали запирает ток. В результате на нем происходит основное падение напряжения источника. За счет высокой напряженности поля в оксиде появляются микрозаряды, которые существенно интенсифицируют процесс анодного окисления, но при этом делают процесс сложным и нелинейным. Установлено, что мониторинг процесса ПЭО возможен по электрическим характеристикам электролизера и статистическим характеристикам микрозарядов. Вольтамперные характеристики электролизера позволяют идентифицировать стадию процесса ПЭО: электролизная, искровая, микродуговая и дуговая. Частотные характеристики электролизера позволяют разрабатывать его схемы замещения. Визуально наблюдаемые микрозаряды позволяют экспертно идентифицировать тип разряда: искровой, микродуговой и дуговой. В свою очередь, по типу разрядов и их миграции на поверхности металла можно идентифицировать стадию процесса ПЭО. Показана информативность таких характеристик популяции микрозарядов, как плотность распределения и средний размер микрозаря-

дов, которые могут быть использованы при построении модели процесса ПЭО как объекта управления.

Проведен анализ известных способов косвенного измерения таких параметров состояния поверхностного слоя, как толщина и пористость покрытия, шероховатость поверхности в процессе ПЭО. Установлено, что косвенное измерение указанных параметров поверхностного слоя в ходе ПЭО осуществляется, как правило, на основе регистрации и анализа наблюдаемых электрических параметров процесса (напряжение, ток и импеданс электролизера). Общий недостаток рассмотренных способов измерения параметров состояния поверхности заключается в сложности их практической реализации, обусловленной необходимостью гальванической развязки между измерительной цепью и электролизером, частотной фильтрации и преобразования информативных сигналов, введением дополнительных модуляторов для измерения импеданса и т.д. Указанный недостаток может быть устранен путем разработки новых способов измерения параметров состояния поверхности, основанных на регистрации и анализе статистических характеристик микро-разрядов, визуально наблюдаемых в ходе процесса ПЭО.

Проведен анализ в области разработок систем управления процессом ПЭО и процессами электролитно-плазменной обработки. Проведена классификация автоматизированных систем управления и установок, используемых для реализации процесса ПЭО. Установлено, что в настоящее время для проведения процесса ПЭО применяются автоматизированные системы управления со стабилизацией технологических параметров, системы с программным управлением режимами обработки, а также системы управления длительностью обработки по таймеру или по предельной температуре электролита. Однако большинство рассмотренных систем не решают задачу контроля толщины покрытия в ходе процесса ПЭО. На основе проведенного анализа современного состояния и известных подходов к автоматизации процесса ПЭО поставлена цель и определены задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты исследования характеристик процесса ПЭО как объекта управления для сплавов BS6082 и Д16Т.

Представлены результаты экспериментального исследования зависимости выходных характеристик процесса ПЭО (толщина покрытия h , шероховатость поверхности Ra) от условий обработки (напряжение источника U , длительность обработки t). Результаты получены с использованием метода планирования полнофакторного эксперимента.

С помощью нейронной сети F_1 (рисунок 1) установлена связь между выходными характеристиками процесса ПЭО (оценки \hat{h}, \hat{Ra}) и входными (U, t):

$$[\hat{h}, \hat{Ra}] = F_1[U, t], \quad (1)$$

Во всей работе применялись нейронные сети с радиально-базисной функцией; в качестве активационной функции нейронов скрытого слоя использовалась функция Гаусса; входные параметры масштабировались к диапазону $[-1; 1]$ для выравнивания дисперсии воспроизводимости. Анализ результатов восстановления закономерностей показал, что с увеличением вре-

мени и напряжения обработки толщина формируемого покрытия увеличивается. Для обоих сплавов наиболее интенсивный рост покрытия наблюдается при напряжениях 500...600 В. При этом наибольшие значения толщины наблюдаются при напряжении $U = 600$ В.

Приведены результаты исследования характеристик микроразрядов, наблюдаемых в ходе процесса ПЭО. В таблице 1 представлены фотографии микроразрядов на поверхностях образцов из сплавов при различных напряжениях и длительностях обработки для длительности выдержки $\tau = 1/15$ с. Показано, что для исследованных сплавов такие статистические характеристики популяции микроразрядов, как общее количество и средний размер, изменяются в ходе обработки, что связано с ростом оксидного слоя. Установлен диапазон напряжений и длительностей обработки (450...600 В, 1...30 мин), а также условий фотосъемки (1/2...1/2000 с), при которых возможна идентификация статистических характеристик популяции микроразрядов.

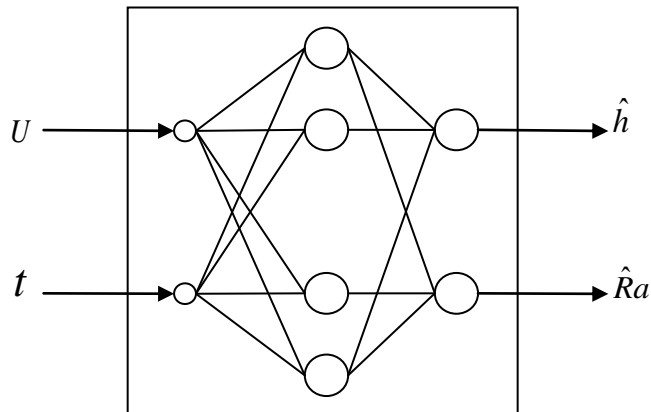


Рисунок 1 – Структура нейронной сети F_1

Таблица 1
Фотографии микроразрядов на поверхности образцов при $\tau = 1/15$ с

	Сплав BS6082		Сплав Д16Т	
$U, \text{В}$ $t, \text{мин}$	500	550	500	550
5				
15				

В третьей главе рассмотрена разработка алгоритма обработки фотографий микроразрядов и расчета статистических характеристик их популяции. На рисунке 2 представлена блок-схема разработанного алгоритма. Особым блоком алгоритма является удаление ауры свечения вокруг точечных микроразрядов, что позволяет распознавать микроразряды в условиях сильного зашумления, обусловленного процессом фотосъемки в ходе ПЭО.

По алгоритму разработана программа обработки фотографий популяции микроразрядов. Разработанная программа позволяет автоматически выделять зону исследования, идентифицировать местоположение и размер микроразрядов, а также рассчитывать статистические характеристики их популяции.

В таблице 2 представлены результаты работы алгоритма для сплавов BS6082 и Д16Т при различных напряжениях и длительностях обработки для длительности выдержки $\tau = 1/15$ с. Проведен анализ полученных гистограмм, который показал, что вид гистограмм зависит от параметров обработки и времени экспозиции. В общем случае гистограммы имеют вид, близкий к распределению Пуассона. Показана информативность центрального момента распределения для косвенного измерения толщины наносимого покрытия.



Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма обработки фотографий микроразрядов: $GRAY_{ij}$ – яркость пикселя с координатами (i, j) в полутоновом изображении; R_{ij}, G_{ij}, B_{ij} – значения яркости красного, зеленого и синего цветов; $F_1(X)$ – исходное полутоновое изображение; $F_2(X)$ – полутоновое изображение со сглаженными контурами объектов; X – двумерный вектор, представляемый с помощью ансамбля пороговых множеств; B – структурообразующий элемент, представляемый в виде множества; T – значение глобального порога яркости; \hat{B} – центральное отражение множества B ; $(\hat{B})_z$ – параллельный сдвиг множества \hat{B} в точку $z=(z_1; z_2)$.

Гистограммы распределений микрозарядов при $\tau=1/15$ с

		Сплав BS6082		Сплав Д16Т	
$t, \text{ мин}$	$U, \text{ В}$	500	550	500	550
		5	Общее количество микрозарядов: 111 	Общее количество микрозарядов: 148 	Общее количество микрозарядов: 23
15		Общее количество микрозарядов: 25 	Общее количество микрозарядов: 62 	Общее количество микрозарядов: 3 	Общее количество микрозарядов: 10

С помощью нейронной сети F_2 обобщенно-регрессионного типа установлена связь между характеристиками микрозарядов (оценки плотности распределения микрозарядов \hat{N} и среднего размера микрозаряда \hat{S}), условиями обработки (U, t) и фотосъемки (выдержка τ):

$$[\hat{N}, \hat{S}] = F_2[U, t, \tau_L], \quad (2)$$

где $\tau_L = -\lg(\tau)$ – логарифмированное значение выдержки.

На рисунке 3 представлены результаты нейросетевого моделирования характеристик микрозарядов с помощью нейронной сети F_2 .

Показано, что в качестве информативных параметров, по которым возможно контролировать состояние поверхности, например, толщину покрытия, необходимо использовать характеристики гистограмм: плотность распределения и средний размер микрозарядов.

По результатам анализа закономерностей изменения характеристик микрозарядов предложено и разработано два способа контроля толщины покрытия в ходе процесса ПЭО.

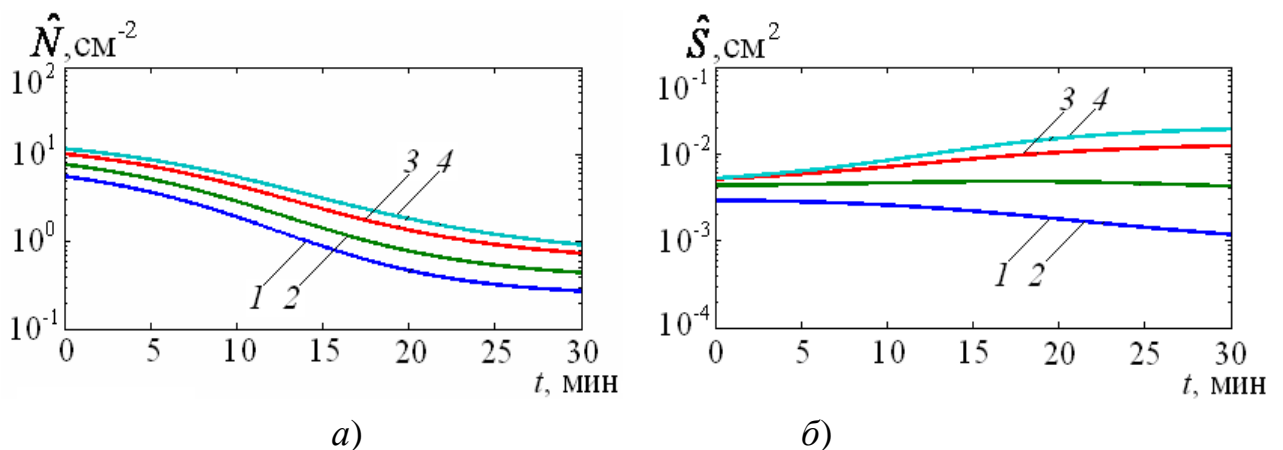


Рисунок 3 – Результаты нейросетевого моделирования характеристик микрозарядов для сплава Д16Т: а – плотность распределения (\hat{N}); б – средний размер (\hat{S}); 1 – $U = 450$ В; 2 – $U = 500$ В; 3 – $U = 550$ В; 4 – $U = 600$ В

Первый способ основан на применении интегрального информативного параметра P , не зависящего явно от напряжения и времени, и вычисляемого из параметров популяции микроразрядов по формуле:

$$P(t) = k \cdot \int_0^t S(x) \cdot N(x) dx, \quad (3)$$

где x – переменная интегрирования; k – эмпирический коэффициент;

$$\hat{h} = k_1 \cdot P + h_0. \quad (4)$$

По формуле (4) получены кусочно-линейные калибровочные зависимости, с помощью которых вычисляется идентифицируемая толщина покрытия по интегральному информативному параметру.

Второй способ основан на применении нейросетевой модели F_3 , с помощью которой по значениям информативных параметров микроразрядов вычисляется толщина покрытия и шероховатость поверхности:

$$[\hat{h}, \hat{Ra}] = F_3[N, S]. \quad (5)$$

Показано, что разработанные способы позволяют косвенно измерять толщину покрытия в процессе плазменно-электролитического оксидирования, и могут быть использованы в АСУ ТП ПЭО с новым контуром обратной связи по параметрам состояния поверхности.

В четвертой главе рассмотрена разработка способов управления процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов. Сформулирована задача управления, заключающаяся в синтезе алгоритма управления, который за конечное время t обеспечивает получение на поверхности детали покрытия требуемой толщины h_3 на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов. Разработаны структуры систем и алгоритмы управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов.

На рисунке 4 представлена структурная схема автоматизированной системы управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по обобщенному информативному параметру. Система содержит новый контур обратной связи, в состав которого входят блоки, предназначенные для обработки фотографий микроразрядов, расчета информативных параметров популяции микроразрядов, их свертки в интегральный информативный параметр P , косвенного измерения текущего значения толщины покрытия $h_{\text{тек}}$ по значению параметра P и отключения источника питания от электролизера, если $h_{\text{тек}}=h_3$. Разработан алгоритм управления ТП ПЭО, обеспечивающий работу системы управления, показанную на рисунке 4.

На рисунке 5 представлена структурная схема системы управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по нейросетевой модели F_3 . Данная система отличается от системы, показанной на рисунке 4, блоками косвенного измерения текущего значения толщины покрытия $h_{\text{тек}}$ с помощью нейросети F_3 в предлагаемом контуре обратной связи. Разработан алгоритм управления ТП ПЭО, обеспечивающий работу системы управления, показанную на рисунке 5.

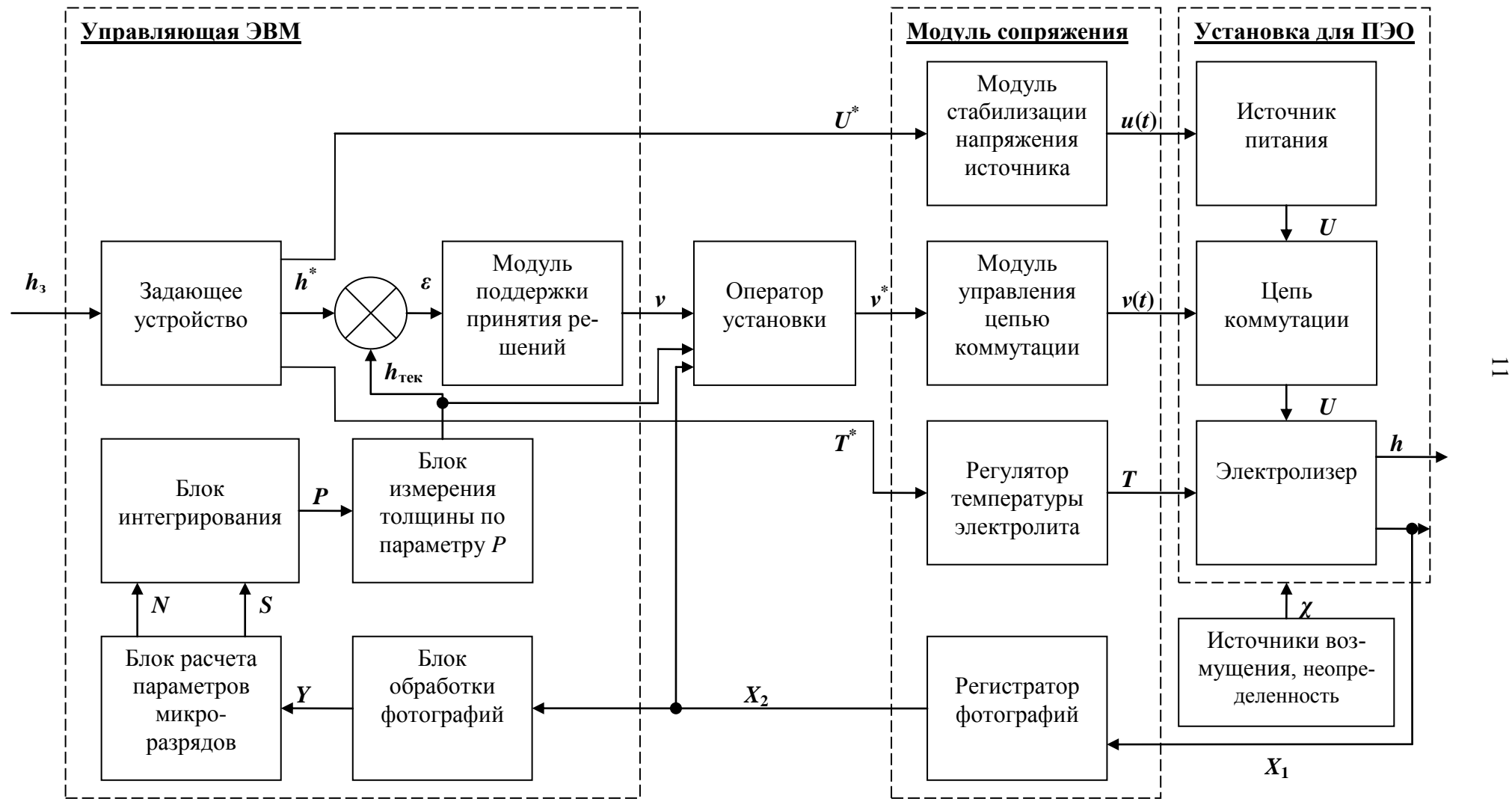


Рисунок 4 – Структурная схема системы управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по интегральному информативному параметру

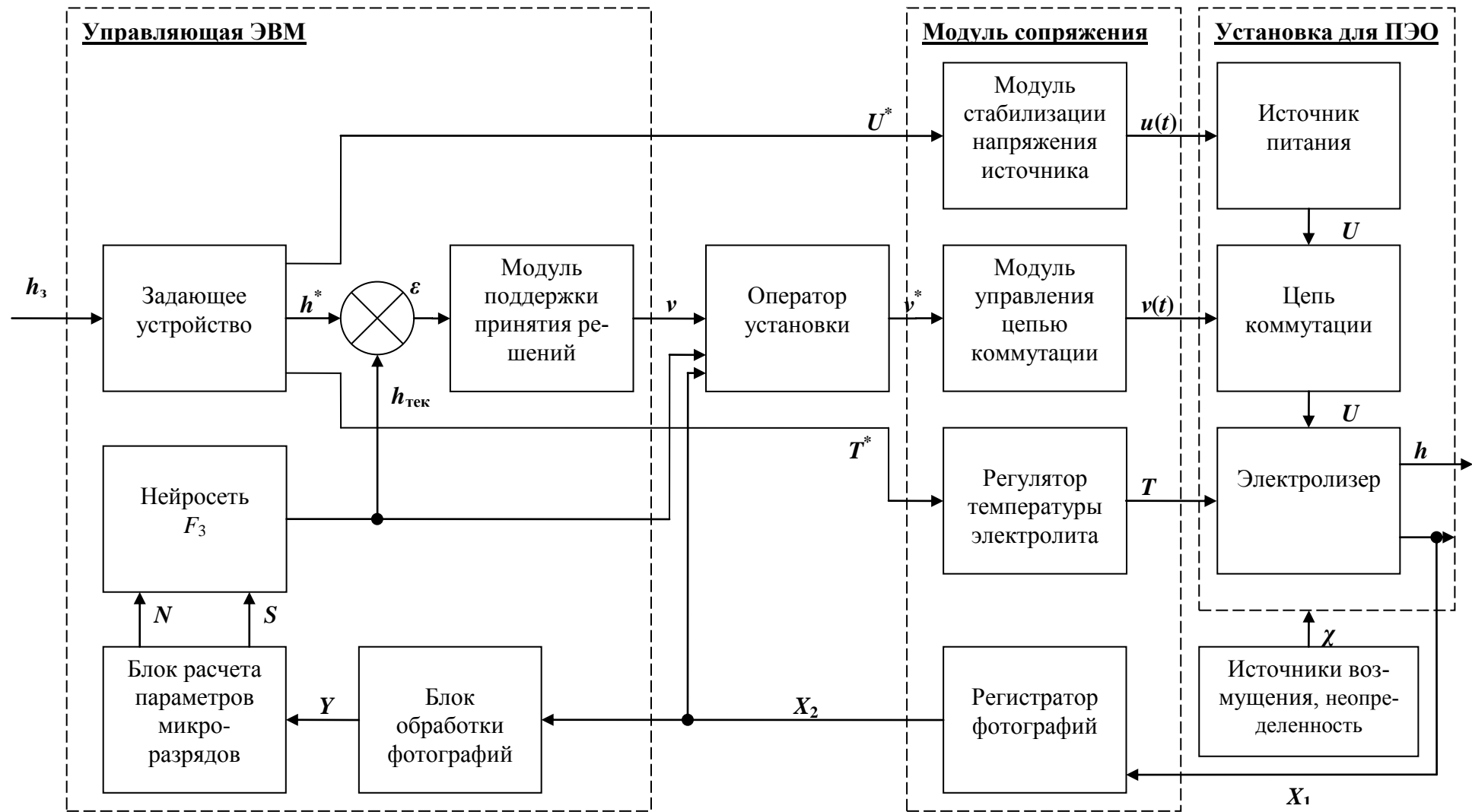


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по нейросетевой модели

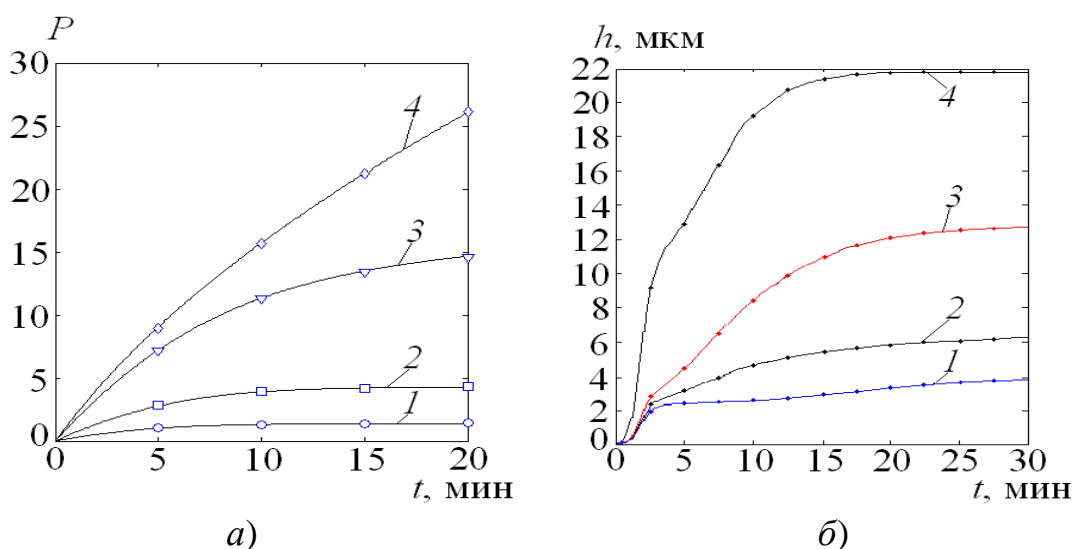


Рисунок 6 – Экспериментальные точки и расчетные кривые вычислительного эксперимента по контролю толщины покрытия: *а* – по интегральному информативному параметру P ; *б* – по нейросетевой модели F_3 ; 1 – $U = 450$ В; 2 – $U = 500$ В; 3 – $U = 550$ В; 4 – $U = 600$ В

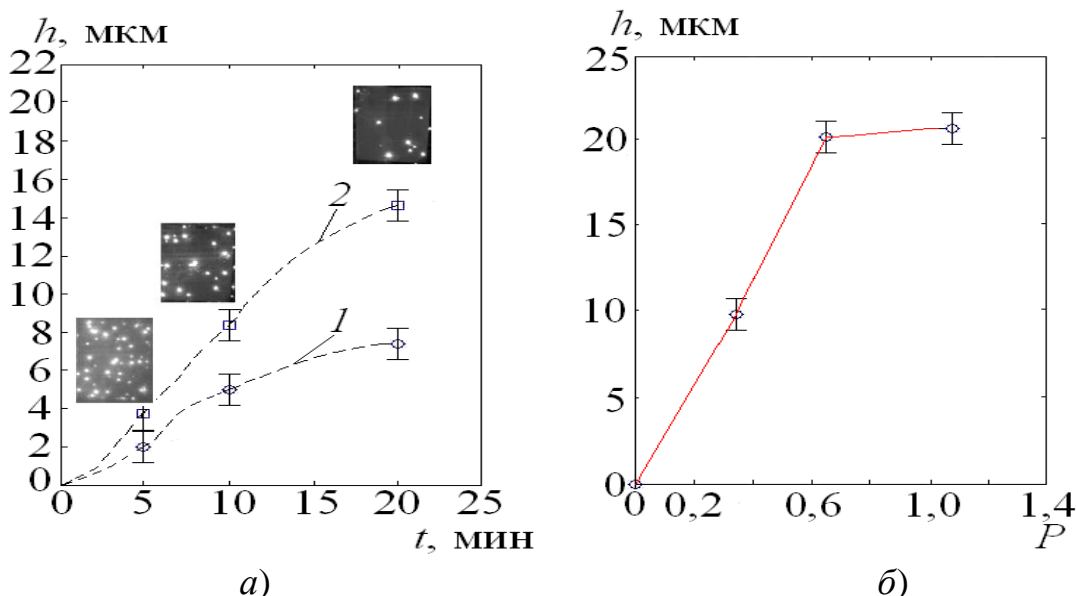


Рисунок 7 – Результаты экспериментов по управлению длительностью процесса ПЭО с контролем толщины покрытия: *а* – результаты измерения толщины покрытия в ходе обработки и соответствующие фотографии; *б* – калибровочная кривая зависимости $h = f(P)$; 1 – $U = 500$ В; 2 – $U = 550$ В

На основе структур систем и алгоритмов разработаны способы управления длительностью процесса ПЭО. Результаты вычислительного эксперимента по контролю толщины покрытия показаны на рисунке 6.

Для экспериментального апробирования способов управления разработан лабораторный прототип автоматизированной установки, на котором проведены эксперименты по управлению длительностью процесса ПЭО с контролем толщины покрытия. В ходе экспериментов задавались требуемые значения толщины покрытия $h_3 = 7$ мкм для $U = 500$ В и $h_3 = 15$ мкм для $U = 550$ В. При $U = 500$ В толщина покрытия косвенно измерялась и контролировалась по интегральному информативному параметру P , при $U = 550$ В –

по нейросетевой модели F_3 . Процесс завершался при достижении требуемого значения толщины покрытия. Результаты экспериментов, подтверждающие работоспособность способов, показаны на рисунке 7. Установлено, что толщина покрытия, полученная в процессе ПЭО с помощью разработанных способов, в пределах погрешности совпадает с толщиной, определенной с помощью независимых измерений после обработки. Таким образом, показано, что использование в составе аппаратно-программного комплекса контура контроля толщины покрытия по характеристикам микрозарядов, косвенно измеряющего толщину покрытия с погрешностью 4–6 %, позволяет уменьшить длительность процесса на 7–10 %, тем самым снизить энергопотребление и повысить его эффективность.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проанализированы существующие автоматизированные системы управления и автоматизированные технологические установки для реализации процесса плазменно-электролитического оксидирования. Показано, что большинство существующих АСУ ТП не решают задачи контроля толщины покрытия в ходе процесса ПЭО. Обоснована необходимость создания АСУ ТП, которая позволит получать покрытия требуемой толщины и повысит эффективность процесса ПЭО за счет нового контура контроля толщины покрытия по характеристикам микрозарядов, рассчитываемым на основе фотографического метода.

2. На основе экспериментального исследования характеристик процесса ПЭО выявлены закономерности, связывающие непосредственно наблюдаемые переменные объекта управления – напряжение источника и статистические характеристики микрозарядов с ненаблюдаемыми свойствами поверхности, такими как толщина покрытия и шероховатость поверхности, определен диапазон экспозиций фотосъемки (1/50...1/500 с), при которых возможно определение среднего размера и плотности распределения микрозарядов в условиях зашумления.

3. Предложен алгоритм обработки фотографий микрозарядов и расчета статистических характеристик их популяции, обеспечивающий автоматическое распознавание местоположения и размера микрозарядов за счет удаление свечения электролита вокруг них и подгона круглых шаблонов под их изображения. Разработан пакет прикладных программ, реализующий предложенный алгоритм и обеспечивающий расчет гистограммы распределения микрозарядов по размерам, среднего размера и плотности их распределения.

4. Разработано два способа автоматизированного управления процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия с использованием: 1) интегрального информативного параметра, вычисляемого из среднего размера и плотности распределения микрозарядов и не зависящего явно от напряжения и времени; 2) нейросетевой модели, которая по среднему размеру и плотности распределения микрозарядов вычисляет толщину покрытия и шероховатость поверхности. В разработанных способах автоматизированного управления используется новый контур обратной связи для косвенного измерения толщины покрытия в ходе обработки и формирования рекомендации об окончании процесса.

5. Разработан аппаратно-программный комплекс АСУТП, реализующий предложенные способы автоматизированного управления процессом ПЭО на основе контроля толщины покрытия по характеристикам микроразрядов. Создан его лабораторный прототип, с помощью которого проведены эксперименты по управлению процессом ПЭО с контролем толщины покрытия по характеристикам микроразрядов. На образцах из сплава Д16Т получены покрытия с заданными значениями толщины 7 и 15 мкм, при этом в ходе обработки толщина покрытия косвенно измерялась и контролировалась с погрешностью 4–6 % по характеристикам микроразрядов. Экспериментально доказано, что эффективность процесса ПЭО повышается на 7–10 % за счет применения разработанных способов автоматизированного управления.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Математическое моделирование процессов в источнике питания для электролитно-плазменной обработки / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин, Е. В. Парфенов, А. И. Даутов // Вестник УГАТУ: научн. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун.-та. 2008. Т. 10, № 2 (27). С. 131–141.

2. Математическое моделирование процесса электролитно-плазменной обработки с использованием нейронных сетей / Е. В. Парфенов, А. Р. Фаткуллин, Д. М. Лазарев, А. Л. Ерохин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. № 3. С. 47–56.

3. Идентификация технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования / Е. В. Парфенов, Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин, А. Л. Ерохин // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 4. С. 6–13.

Патент:

4. Патент 2435134 (РФ). МПК G 01 В 11/06. Способ определения толщины покрытия при плазменно-электролитическом оксидировании / Е. В. Парфенов, Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин, А. И. Даутов, А. Л. Ерохин, Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин. Оpubл. 27.11.2011. БИ № 33.

Программы для ЭВМ:

5. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2009611127. Программа анализа микроразрядов по фотографиям процесса электролитно-плазменной обработки / Е. В. Парфенов, Д. М. Лазарев. Зарег. 19.02.2009.

6. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2012660449. Программный комплекс для анализа изображений микроразрядов PEO Discharge Analysis / Е. В. Парфенов, А. Л. Ерохин, В. Р. Мукаева, Д. М. Лазарев, Ч. Ч. Лянь. Зарег. 20.11.2012.

Статьи в сборниках научных трудов:

7. Применение интеллектуальных систем управления для автоматизации процесса электролитно-плазменной обработки / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин // Актуальные проблемы в науке и технике: Сб. ст. 3-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: Диалог, 2008. Т. 2. С. 82–84.

8. Применение операционной среды Matlab для обработки изображений микроразрядов при плазменно-электролитическом оксидировании / Д. М. Лазарев // Мавлютовские чтения: Тез. докл. молодежн. науч. конф. Уфа: УГАТУ, 2008. Т. 3. С. 62–63.

9. Исследование плотности распределения микроразрядов при плазменно-электролитическом оксидировании алюминия / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин // Гагаринские чтения: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. М.: МАТИ, 2009. Т. 3. С. 102–103.

10. Идентификация процесса плазменно-электролитического оксидирования по фотографиям микроразрядов / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин, Е. В. Парфенов, А. Л. Ерохин // Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. Кострома: КГУ им. Н. А. Некрасова, 2010. С. 263–268.

11. Выбор типа нейронной сети для моделирования процессов электролитно-плазменной обработки / А. Р. Фаткуллин, Д. М. Лазарев // Гагаринские чтения: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. М.: МАТИ, 2010. Т. 3. С. 106–108.

12. Статистический анализ распределений микроразрядов при плазменно-электролитическом оксидировании / Д. М. Лазарев // Мавлютовские чтения: Тез. докл. молодежн. науч. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 3. С. 81–82.

13. Модульный автоматизированный источник питания для установки плазменно-электролитического оксидирования / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин // Актуальные проблемы в науке и технике: Сб. ст. 6-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: Диалог, 2011. Т. 2. С. 76–80.

14. Система регистрации и обработки фотографических изображений микроразрядов в процессе плазменно-электролитического оксидирования / Д. М. Лазарев, А. Р. Фаткуллин // Гагаринские чтения: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. М.: МАТИ, 2011. Т. 3. С. 133–134.

15. Управление технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования на основе оперативной диагностики состояния объекта / Д. М. Лазарев // Актуальные проблемы в науке и технике: Сб. ст. 7-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2012. Т. 2. С. 132–136.

16. Сравнительный анализ характеристик микроразрядов при плазменно-электролитическом оксидировании алюминиевых сплавов BS6082 и Д16Т / Д. М. Лазарев, В. Г. Кальянов // Гагаринские чтения: Тез. докл. междунар. молодежн. науч. конф. М.: МАТИ, 2012. Т. 3. С. 90–91.

Соискатель



Д.М. Лазарев