

На правах рукописи



**ЧУДИНОВ ДАНИЛА БОРИСОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА  
МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ  
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6**

Специальность

05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор  
**Серов Михаил Михайлович**

Официальные оппоненты: – **Белкин Павел Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Костромской государственной  
университет», профессор

– **Гладкова Александра Александровна**,  
кандидат химических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС», доцент

Ведущая организация: ФГБУН «Институт химии Дальневосточного  
отделения» Российской академии наук

Защита диссертации состоится 01 декабря 2020 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/upload/iblock/54f/Dissertatsiya\\_CNudinov.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/54f/Dissertatsiya_CNudinov.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Для улучшения механических и физико-химических свойств деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, находит свое применение метод поверхностной модификации деталей посредством микродугового оксидирования (МДО). При МДО деталь подвергается электрохимической обработке в электролитной ванне, в результате чего на поверхности формируется оксидное керамикоподобное покрытие. Процесс МДО проходит при участии микродуговых разрядов, функционирующих на обрабатываемой поверхности, характеристики которых определяются параметрами импульсов электрического тока, формируемых специализированными технологическими источниками тока (ТИТ).

На свойства МДО-покрытий существенным образом влияют состав электролита, параметры технологического режима, а также его стабильность при параллельной обработке деталей. Корректировка параметров технологического режима в большинстве случаев позволяет уменьшить влияние этих факторов на качество модификации поверхности. В настоящее время актуальной задачей является разработка процесса микродугового оксидирования для параллельной обработки деталей, позволяющего автоматически осуществлять подобную корректировку режима обработки отдельно для каждой детали, что позволяет повысить производительность, воспроизводимость и качество модификации поверхности в технологиях МДО при массовом производстве деталей.

**Целью работы** является изучение стабильности свойств МДО-покрытий при параллельной обработке деталей из алюминиевого сплава АМг6 и разработка на этой основе автоматизированного процесса микродугового оксидирования, обеспечивающего повышение качества и воспроизводимости покрытий на одновременно обрабатываемых деталях.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выявить факторы, влияющие на характеристики формируемых покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых деталей в условиях параллельной обработки.
2. Предложить физико-математическую модель процесса параллельной обработки, позволяющую обосновать способ автоматической коррекции режима.
3. Разработать автоматизированную систему управления процессом МДО-обработки с интегрированным устройством для параллельной обработки

деталей.

4. Разработать алгоритмы функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом и ее составных устройств.

5. Экспериментально подтвердить разработанный способ автоматизированной параллельной обработки процесса МДО.

6. Провести экспериментальную апробацию автоматизированного процесса параллельной МДО-обработки и разработанной автоматизированной системы управления.

### **Научная новизна**

1. Предложена физико-математическая модель процесса параллельной обработки, позволяющая рассчитать электрическое сопротивление системы деталь-покрытие-электролит-ванна на стадиях анодирования и разрядов МДО, и учитывающая изменения открытой пористости и структуры покрытия.

2. Показано, что при параллельной обработке деталей неравномерность формирования покрытия на стадии микродугового разряда связана с разной степенью локализации очагов горения разрядов на поверхности деталей, обусловленной изменением открытой пористости.

3. Установлено, что на начальном этапе микродугового оксидирования отношение токов между двумя параллельно обрабатываемыми деталями пропорционально корню квадратному из отношения площадей обрабатываемых поверхностей.

4. Показано, что для формирования одинаковых покрытий в процессе параллельной обработки деталей необходимо, чтобы проходящее через них количества электричества было пропорционально площади их обрабатываемой поверхности.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Разработаны функциональные схемы автоматизированной системы управления (АСУ), а также алгоритмы автоматизации технологического процесса микродугового оксидирования и коррекции его режимов при параллельной обработке деталей сложной формы.

2. Разработан способ автоматической коррекции режима параллельной МДО-обработки по количеству электричества, протекающего через каждую деталь.

3. Разработан способ автоматического определения площади поверхности деталей сложной формы на основе предложенной физико-математической модели процесса параллельной обработки.

4. Разработан технологический процесс микродугового оксидирования для параллельной обработки деталей из алюминиевого сплава АМгб, основанный на автоматической корректировке режима МДО-обработки, что позволило улучшить стабильность свойств покрытий на одновременно обрабатываемых деталях.

#### **Методология и методы исследования**

Для достижения поставленной цели были использованы методы вихретоковой толщинометрии, измерения сквозной пористости по электрическому сопротивлению двухэлектродной электрической ячейки, определения напряжения электрического пробоя покрытий, измерения микротвердости по Виккерсу, статистической обработки данных, математического моделирования, схемотехнического моделирования электронных устройств, системного анализа, анализа электрических цепей.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на воспроизводимость МДО-покрытий при параллельной обработке деталей из алюминиевого сплава АМгб.
2. Физико-математическая модель процесса параллельной МДО-обработки деталей.
4. Способ автоматической коррекции режима параллельной МДО-обработки.
5. Функциональные схемы АСУ и интегрированного в нее устройства для параллельной обработки деталей
6. Алгоритмы работы АСУ и ее составных устройств.
7. Результаты экспериментальной оценки возможностей АСУ.

#### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается системным подходом к решению задач, большим объемом экспериментальных данных, полученных с использованием проверенных физических методов исследования, непротиворечивостью полученных результатов результатам других авторов, их соответствием известным теоретическим представлениям физики процесса микродугового оксидирования, эффективностью предложенных технических решений, подтвержденных успешной реализацией разработанной технологии обработки деталей из алюминиевых сплавов.

### **Апробация работы**

Материалы работы были доложены на 12 общероссийских и международных научных конференциях, совещаниях и семинарах, среди которых: «Гагаринские чтения», Москва, 2010-2016 гг., «Быстрозакаленные материалы и покрытия», Москва, 2010-2014 гг., «Новые материалы и технологии», Москва, 2010 г., «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2012 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 4 статьи в журналах из списка ВАК, из них две статьи индексируемые в WoS и Scopus, получены два патента РФ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературных источников из 104 наименований. Материал диссертации изложен на 146 страницах, содержит 55 рисунков и 13 таблиц.

## **Глава 1 Состояние вопроса исследования**

В главе приведен обзор применения технологии микродугового оксидирования для модификации поверхности деталей, изготовленных из материалов на основе алюминия и его сплавов. Показано, что модифицированные поверхностные слои, сформированные данным методом, улучшают такие свойства поверхности, как стойкость к коррозии и износу, служат в качестве диэлектрических покрытий или могут быть использованы как адгезионные подслои для последующего нанесения лакокрасочных покрытий. Основными характеристиками покрытий, определяющими их функциональное назначение в данном случае, являются толщина, сквозная пористость, электрическая прочность и микротвердость.

Установлено, что характеристики получаемых МДО-покрытий, помимо материала основы, определяются электрическим режимом обработки, длительностью процесса, составом электролита. При этом воспроизводимость характеристик и качество покрытий могут ухудшаться из-за влияния таких факторов как температура и степень выработки электролита, а также стабильность электрических параметров процесса на отдельных деталях при параллельной обработке.

Проведен анализ существующего оборудования и систем автоматизации для процесса МДО. Установлено, что исследования в этой области далеки от завершения, так как имеющиеся системы автоматизации не до конца

учитывают все параметры и лимитирующие факторы, возникающие во время проведения процесса параллельной обработки. На основании проведенного анализа показано, что решением этих проблем может являться разработка нового поколения автоматизированных систем для управления процессом МДО, учитывающих все параметры и лимитирующие факторы, возникающие во время процесса, и обеспечивающих коррекцию режима обработки по этим параметрам.

Исходя из обзора имеющихся средств автоматизации процесса МДО, для разрабатываемой автоматизированной системы управления процессом микродугового оксидирования выбран прототип алгоритма автоматизации технологического процесса МДО.

Показано, что в разрабатываемой автоматизированной системы управления целесообразно совместить функции мониторинга и управления технологическим процессом.

## **Глава 2    Обоснование параметров и технологических возможностей автоматизированной системы управления**

Для количественной оценки влияния технологических факторов на воспроизводимость параметров МДО-покрытий, был выполнен цикл экспериментов, в которых осуществлялась параллельная МДО-обработка образцов в типовых режимах.

В ходе экспериментальных исследований были сформированы МДО-покрытия на сплаве АМг6 в трех технологических режимах продолжительностью 15, 60 и 120 мин. Обработке при этом подвергались параллельно по 6 образцов в виде таблеток площадью по 0,1 дм<sup>2</sup> каждый. В каждом технологическом режиме было обработано 5 таких партий. Процесс проводился на переменном токе (анодно-катодный режим при равных плотностях анодного и катодного тока), средняя плотность которого составляла 15 А/дм<sup>2</sup>. Состав электролита при этой обработке - 1,5 г/л едкого натра и 9 г/л силиката натрия.

Результаты измерений, полученные в ходе экспериментальных исследований, подвергались статистической обработке. На рисунках 1 и 2 представлены результирующие показатели исследуемых свойств покрытий образцов, сформированных в ходе эксперимента.

На рисунке 1 приведена гистограмма усредненных показателей свойств покрытий и доверительные интервалы их оценки. На основании этой гистограммы можно сделать вывод, что наибольшая стабильность в исследуемых режимах обеспечивается для показателей сквозной пористости и

толщины покрытий, а наименьшая – для микротвердости.

Вместе с тем, коэффициенты вариации показателей свойств покрытий одновременно обрабатываемых образцов (рисунок 2) в 15 и 60 мин режимах достигают существенных значений (выше 25%), что свидетельствует о неравномерном распределении электрического тока между параллельно обрабатываемыми деталями.

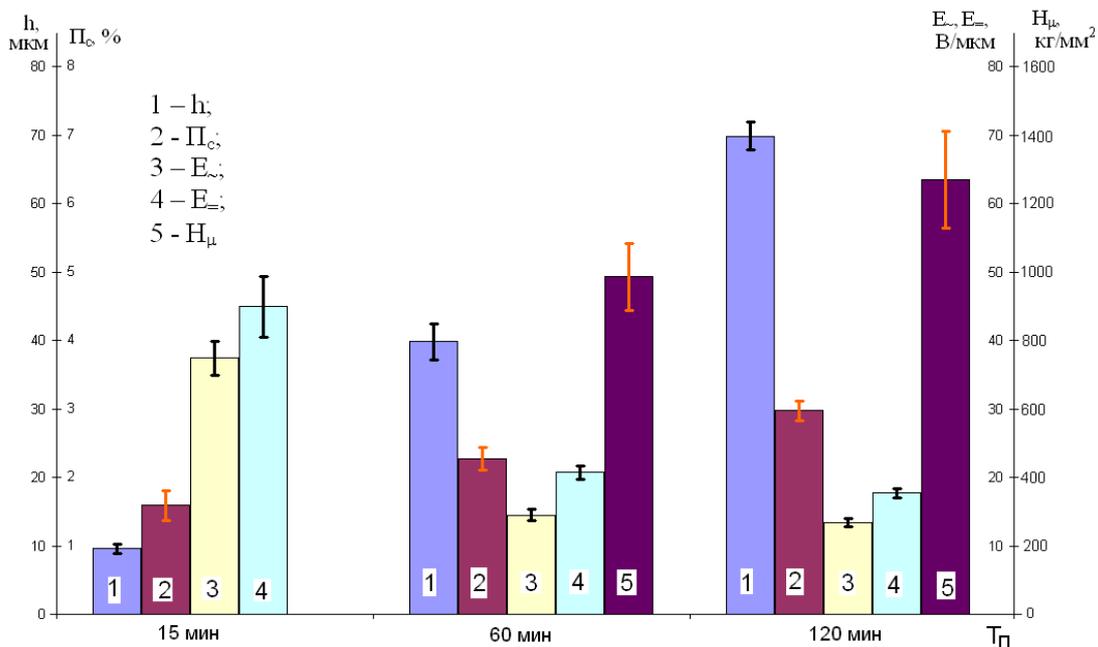


Рисунок 1 – Усредненные свойства МДО-покрытий, сформированных в исследуемых режимах

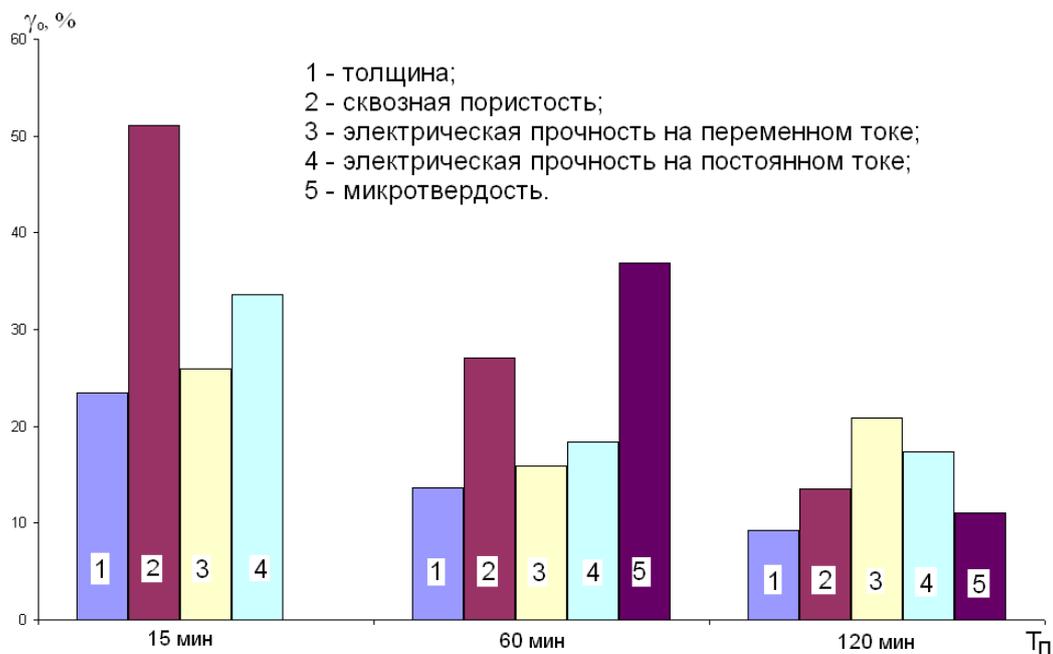


Рисунок 2 – Коэффициенты вариации усредненных свойств одновременно сформированных МДО-покрытий

Следовательно, для повышения воспроизводимости формируемых при параллельной обработке МДО-покрытий целесообразно осуществлять выравнивание количества электричества, прошедшего через поверхность каждой детали за время обработки.

МДО относится к электрохимическим процессам, в которых, согласно закону Фарадея, масса вещества образующегося на электроде пропорциональна количеству электричества прошедшего через этот электрод:

$$m = k \cdot Q_{эл} = k \int_0^{t_n} I dt, \quad (1)$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент вещества, г/(А·ч);  $Q_{эл}$  – количество электричества, прошедшее через электрод за время процесса, ч·с;  $t_n$  – продолжительность процесса, ч;  $I$  – сила тока, прошедшего через электрод, А.

Поэтому при параллельной обработке необходимо учитывать распределение электрического тока между отдельными деталями, имея в виду, что между каждой деталью и ванной приложено одинаковое напряжение  $U$  (рисунок 3).

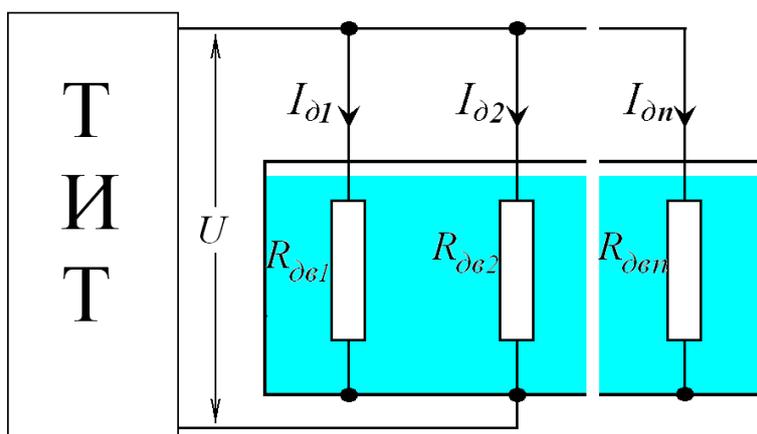


Рисунок 3 – Параллельная МДО-обработка деталей

Согласно закону Ома распределение токов между параллельно обрабатываемыми деталями:

$$I_{д1} = \frac{U}{R_{дв1}}; \quad I_{д2} = \frac{U}{R_{дв2}}; \quad \dots; \quad I_{дn} = \frac{U}{R_{двn}}, \quad (2)$$

где  $R_{дв1}$ ,  $R_{дв2}, \dots, R_{двn}$  – сопротивление цепи деталь-электролит-ванна соответственно для первой, второй, ..., n-ой параллельно обрабатываемой детали; Ом.

Электрическое сопротивление цепи деталь-электролит-ванна будет определяться как сумма электрических сопротивлений детали ( $R_d$ , Ом), покрытия ( $R_n$ , Ом), электролита ( $R_{эл}$ , Ом) и ванны ( $R_v$ , Ом):

$$R_{\text{дв}} = R_d + R_n + R_{эл} + R_v, \quad (3)$$

Значения сопротивлений в выражении (3) могут быть определены из удельных электрических сопротивлений ( $\rho$ , Ом·м) их материалов.

Вместе с тем, щелочные электролиты при МДО обладают высокой рассеивающей способностью электрического тока, что позволяет при анализе системы деталь-электролит-ванна ограничиться рассмотрением сферической модели.

Учитывая, что площадь обрабатываемой поверхности существенно меньше площади поверхности электролитной ванны, для сферической модели системы деталь-электролит-ванна (рисунок 4) справедливы следующие выражения:

$$R_d = \frac{\rho_d}{4 \cdot \pi \cdot r_d} = \frac{\rho_d}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}}, \quad (4)$$

$$R_n \approx \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{4 \cdot \pi \cdot r_d^2} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{S_n}, \quad (5)$$

$$R_{эл} = \frac{\rho_{эл}}{4 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r_d} - \frac{1}{r_v} \right) = \frac{\rho_{эл}}{4 \cdot \pi \cdot r_d} \cdot \left( 1 - \frac{r_d}{r_v} \right) \approx \frac{\rho_{эл}}{4 \cdot \pi \cdot r_d} = \frac{\rho_{эл}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}}, \quad (6)$$

$$R_v \approx \frac{\rho_v \cdot d_v}{4 \cdot \pi \cdot r_v^2} = \frac{\rho_v \cdot d_v}{S_v}, \quad (7)$$

где  $\rho_d$ ,  $\rho_{нк}$ ,  $\rho_{эл}$ ,  $\rho_v$  – удельные сопротивления металла детали, МДО-покрытия, электролита и металла ванны, Ом·м;  $r_d$ ,  $r_v$  – радиусы детали и внутренней полости ванны, м;  $S_v$  – площадь поверхности внутренней полости ванны;  $S_n$  – площадь поверхности детали;  $h_{нк}$  – толщина МДО-покрытия, м;  $d_v$  – толщина стенки ванны.

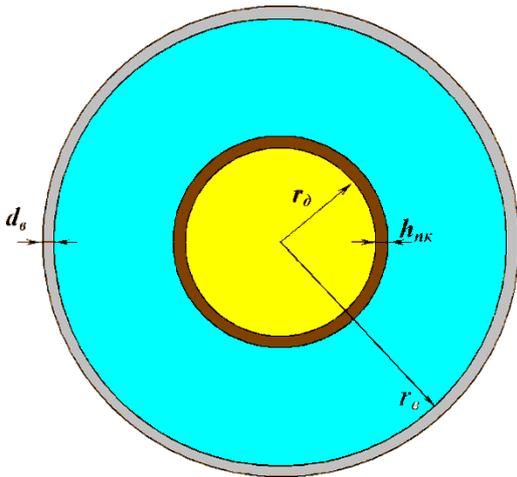


Рисунок 4 – Модель системы деталь-электролит-ванна

Принимая во внимание значительную разницу в соотношениях удельных электрических сопротивлений материалов отдельных компонентов системы деталь-электролит-ванна,

$$\frac{R_d}{R_э} \leq 6 \cdot 10^{-5}, \quad (8)$$

$$\frac{R_б}{R_{эл}} \leq 1,9 \cdot 10^{-4}, \quad (9)$$

сопротивлениями  $R_d$  и  $R_б$  можно пренебречь из-за их незначительного влияния на сопротивление всей системы. Следовательно:

$$R_{дб} = R_n + R_{эл} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{S_n} + \frac{\rho_{эл}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot S_n}. \quad (10)$$

Перед началом процесса МДО сопротивлением  $R_n$  можно пренебречь:

$$R_{дб} \approx \frac{\rho_{эл}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot S_n}. \quad (11)$$

Вместе с тем, на стадиях существования электрического разряда процессы образования МДО-покрытия одновременно проходят не на всей обрабатываемой поверхности, а только в открытых порах покрытия (рисунок 5).

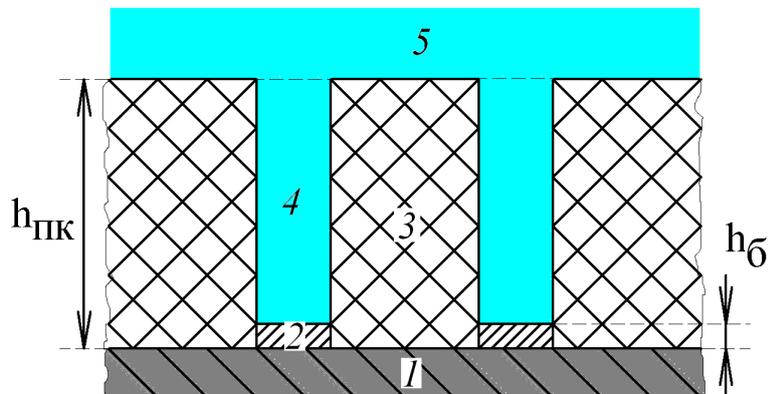


Рисунок 5 – Модель структуры МДО-покрытия: 1 – обрабатываемый сплав, 2 - барьерный слой, 3 – наружный пористый слой, 4 – столб электролита в поре, 5 – электролит снаружи покрытия

Учитывая коэффициент сквозной пористости  $K_n$ :

$$K_n = \frac{S_{оп}}{S_n}, \quad (12)$$

где  $S_{оп}$  – площадь поверхность открытых пор.

На стадиях существования МДР сопротивление деталь-ванна определяется выражением:

$$R_{об} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_0}{K_n \cdot S_n}. \quad (13)$$

Вместе с тем, коэффициент сквозной пористости обрабатываемой поверхности постоянно изменяется, что подтверждается визуальным наблюдением перемещающихся локализаций (пятен) МДР разрядов на обрабатываемой поверхности. Относительные отклонения свойств МДО-покрытий между параллельно обрабатываемыми деталями могут достигать 40-50%. Это свидетельствует о неравномерном распределении электрического тока между обрабатываемыми поверхностями деталей в группе и, соответственно, неодинаковом количестве прошедшего через них электричества. На основании этого был предложен способ повышения стабильности свойств МДО-покрытий при параллельной обработке путем выравнивания количества электричества через поверхности отдельных деталей.

### **Глава 3    Аппаратные средства автоматизированной системы управления**

Для реализации автоматизированного процесса МДО параллельной обработки деталей была разработана специализированная АСУ, состоящая из ТИТ, одного или нескольких устройств параллельной обработки (УПО) и модуля мониторинга технологического процесса. В этой системе функции формирования требуемых для проведения процесса МДО выполняет система управления ТИТ, выравнивания количества электричества между параллельно обрабатываемыми деталями – система управления УПО, а сбор данных лимитирующих МДО параметров и корректировку проведения технологического режима – модуль мониторинга технологического процесса. Связь между этими компонентами АСУ осуществляется с помощью сетевых интерфейсов по локальной информационной сети.

Разработанное УПО обеспечивает автоматическую коррекцию режима МДО, обеспечивающую выравнивание количеств электричества, прошедших через поверхности 2-5 параллельно обрабатываемых деталей. Если же требуется обслуживание большего количества деталей, то это обеспечивается

использованием дополнительных УПО – одного для пяти деталей.

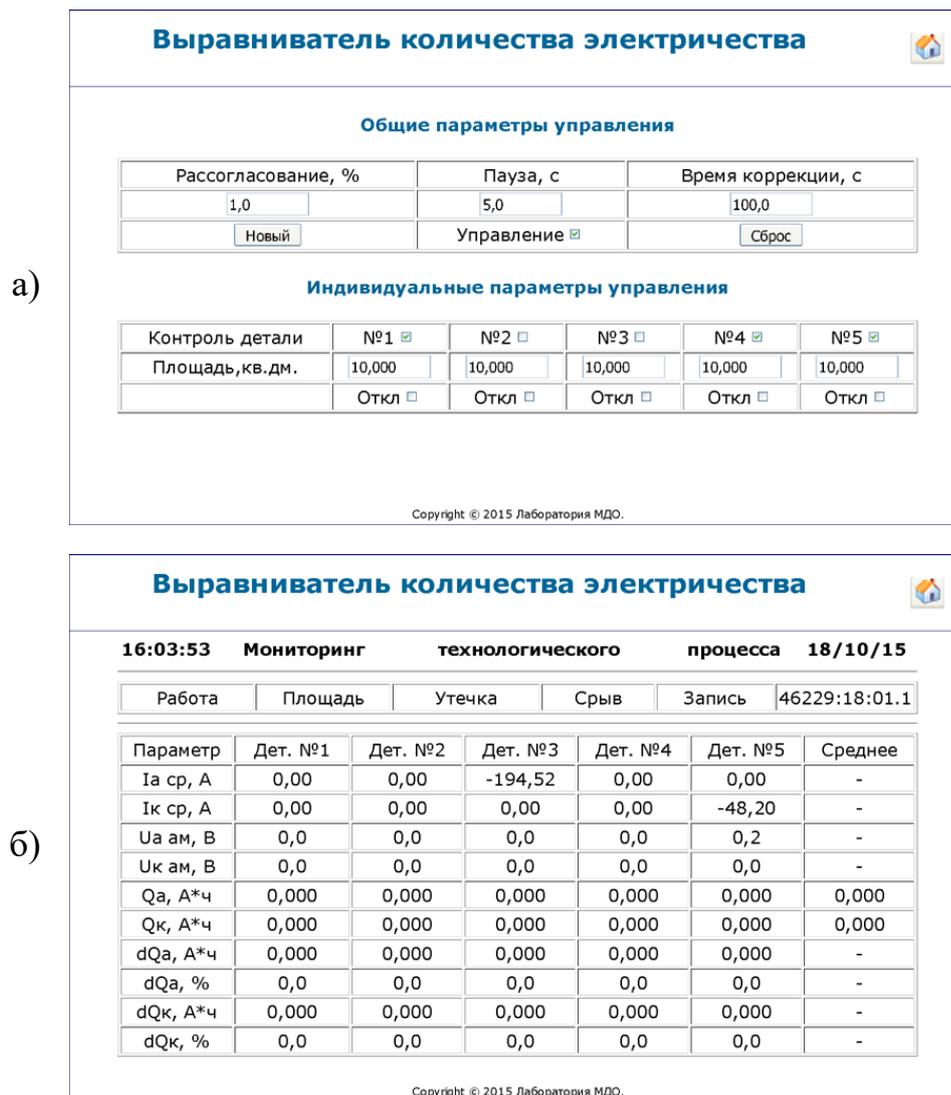
УПО объединяет пять идентичных каналов управления, состоящих из: датчика протекающего через деталь электрического тока, масштабирующего усилителя, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), алгоритмического обработчика данных, выходного усилителя мощности и подключающего (отключающего) деталь реле (пускателя). Для всех пяти каналов функции АЦП и алгоритмических обработчиков данных выполняет микроконтроллер. Он же обеспечивает сетевой интерфейс взаимодействия с остальными устройствами АСУ и оператором технологического процесса.

Функционирует УПО следующим образом. В ходе проведения МДО датчики измеряют электрический ток, протекающий через каждую деталь, АЦП оцифровывает сигналы датчиков. В алгоритмическом обработчике оцифрованные данные интегрируются во времени, тем самым определяется количества прошедшего электричества, полученные подвергаются алгоритмической обработке (рисунок 7). По результатам этой обработки осуществляется отключение или подключение обрабатываемой детали к ТИТ.

#### **Глава 4 Программные средства автоматизированной системы управления**

В предлагаемой АСУ предусмотрен удаленный доступ к технологическому оборудованию, осуществляемый по сети Интернет с помощью шифрованного VPN канала связи. По этому каналу возможно получение информации о текущем состоянии технологического процесса, отклонениях и сбоях в работе технологического оборудования, получение протоколов работы оборудования, а также дистанционное управление процессом.

Для удаленного доступа к технологическому оборудованию в компьютере модуля мониторинга организован стандартный http сервер и разработан web-интерфейс. На рисунке 6 представлены примеры html-страниц этого интерфейса.



**Рисунок 6 – Страницы web-интерфейса для управления процедурой выравнивания количества электричества между обрабатываемыми деталями (а) и мониторинга технологического процесса (б).**

На основании предложенного способа коррекции режима был разработан алгоритм (рисунок 7) функционирования УПО. Устройство обнаруживает детали с наибольшим и наименьше значениями количества электричества (блоки 7-13), и, если разница между этими значениями превышает заданный порог (блок 14), то в течение заданного интервала времени происходит отключение детали с наибольшим значением количества электричества (блоки 15-21). За этот интервал оставшиеся в группе детали «догоняют» по количеству электричества отключенную деталь. После подключения детали к ТИТ устройство в течение защитного интервала времени блокирует следующие отключение любой детали в группе. На это решение был получен патент [6]

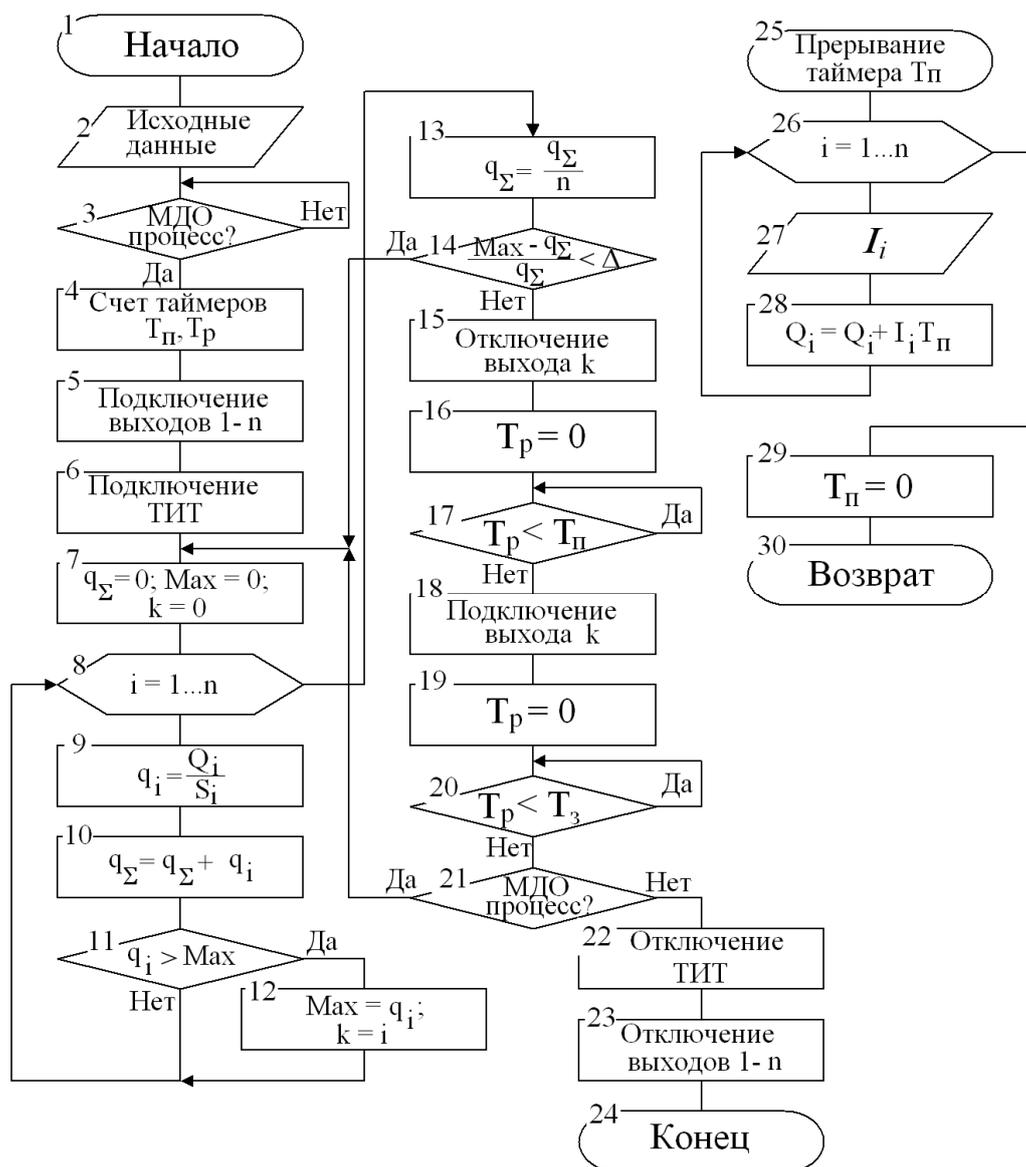


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма коррекции режима при групповой обработке деталей по количеству электричества, прошедшему через каждую деталь

## Глава 5 Экспериментальная оценка технологических возможностей и апробация автоматизированной системы управления

В пятой главе выполнена апробация разработанной автоматизированной системы управления процессом МДО, приведены результаты экспериментальной оценки ее возможностей.

Испытания проводились в два этапа:

1. МДО-обработка без применения УПО и исследование свойств контрольной группы образцов.
2. МДО-обработка с применением УПО и исследование свойств образцов равной площади.

На первом и втором этапах исследования проводились на дискообразных

образцах площадью 0,1 дм<sup>2</sup>, изготовленных из алюминиевого сплава АМгб. В каждой группе было по три таких образца.

МДО-обработка выполнялась на конденсаторном ТИТ в анодно-катодном режиме при равенстве анодного и катодного токов и суммарной плотности тока 9 А/дм<sup>2</sup> в силикатно-щелочном электролите (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – 9 г/л и КОН – 2 г/л). Продолжительность обработки составляла 60, 120 и 180 мин. На первом и втором этапах исследований каждый эксперимент повторялся 5 раз.

После каждой МДО-обработки на образцах измеряли свойства сформированных покрытий: толщину, сквозную пористость, напряжения пробоя на постоянном и переменном токах, а для образцов, время формовки которых превысило 120 мин, и микротвердость.

Каждая обработка с использованием УПО осуществлялась при фиксированных параметрах индивидуальной коррекции режима обработки: пороге относительного отклонения количества электричества и длительности интервала коррекции режима.

На первом этапе были обработаны контрольные группы образцов.

На втором этапе выяснялось влияние на повторяемость основных свойств МДО-покрытий порога относительного отклонения количества электричества, прошедшего через каждую деталь от среднего значения в группе. Эксперименты проводились для порогов: 1,5%; 2,5%; 5%; 7,5%. Длительность интервала коррекции на этом этапе составляла 1 мин.

Оценка стабильности процесса параллельной МДО-обработки на этапах один и два проводилась статистическими методами на основе контрольных карт Шухарта.

Далее были проведены сопоставление и анализ данных, полученных на первом и втором этапах лабораторных испытаний, результаты которых представлены на рисунках 8-11.

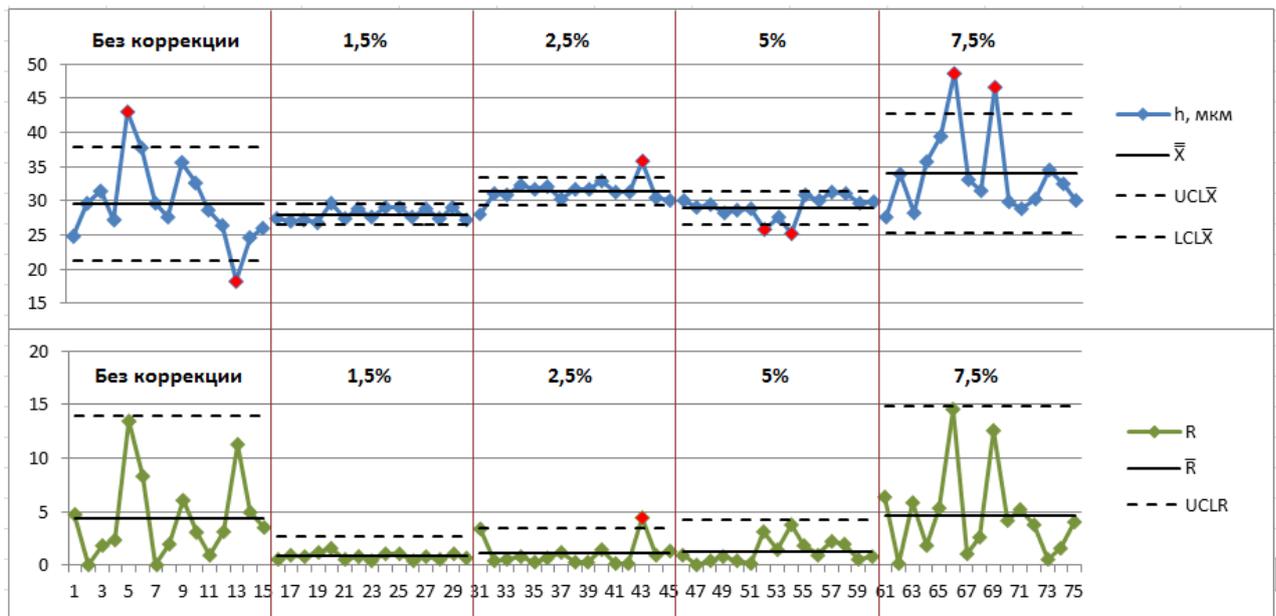


Рисунок 8 – Контрольная карта толщины покрытий сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин на алюминиевом сплаве АМг6

Результаты исследований толщин МДО-покрытий, сформированных на группах образцов сплава АМг-6 в течение 60 мин, позволяют сделать вывод (рисунок 8), что лучшей повторяемостью обладают МДО-покрытия, сформированные с использованием УПО при 1,5% пороге коррекции режима по относительному отклонению количества электричества  $\Delta_{пқ}$ .

Сквозная пористость покрытий (рисунок 9) у всех образцов, обработанных на первом и втором этапах испытаний, не превысила порог в 5%, что позволяет отнести эти покрытия к коррозионно-защитным. Вместе с тем, наименьшие значения сквозной пористости были достигнуты при применении УПО с  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ . Показатели повторяемости характеристик покрытий при такой коррекции были более высокие, чем без коррекции режима, однако несколько лучшими показателями стабильности обладают покрытия, сформированные при  $\Delta_{пқ} = 5\%$ . Последнее связано с более высокой сквозной пористостью. Поэтому можно утверждать, что лучшим для минимизации показателя сквозной пористости при групповой обработки деталей является коррекция режима при  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ .

При исследованиях электрической прочности МДО-покрытий (рисунок 10) наилучшими показателями повторяемости также обладают покрытия, сформированные при коррекции режима с помощью УПО при  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ .

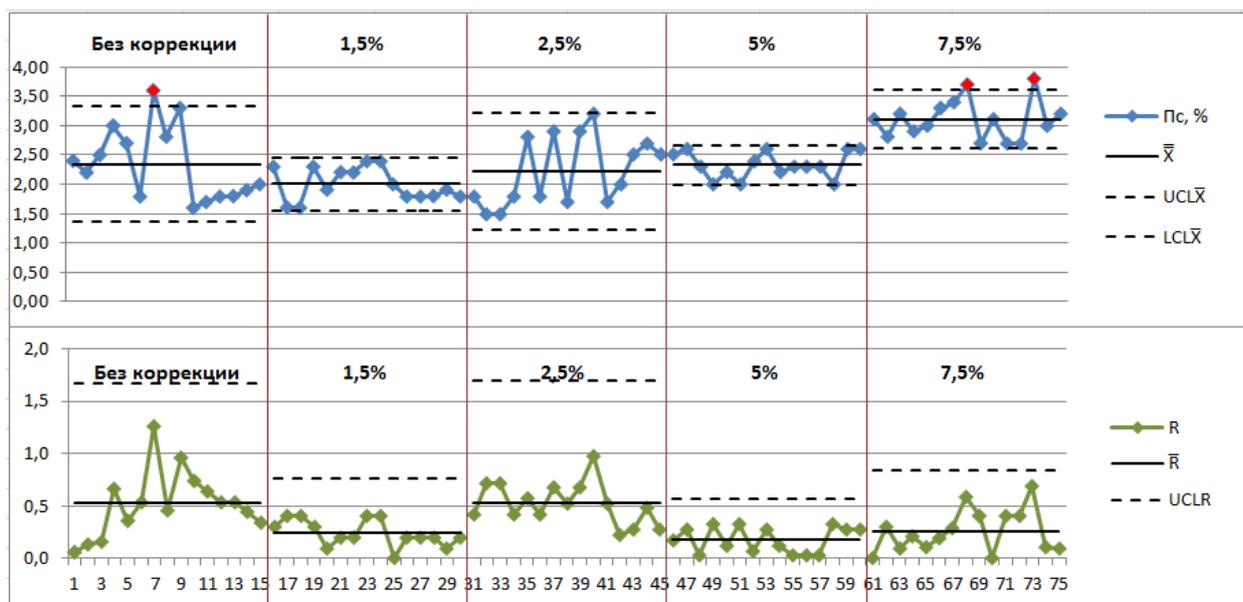


Рисунок 9 – Контрольные карты сквозной пористости покрытий, сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин на алюминиевом сплаве АМг6

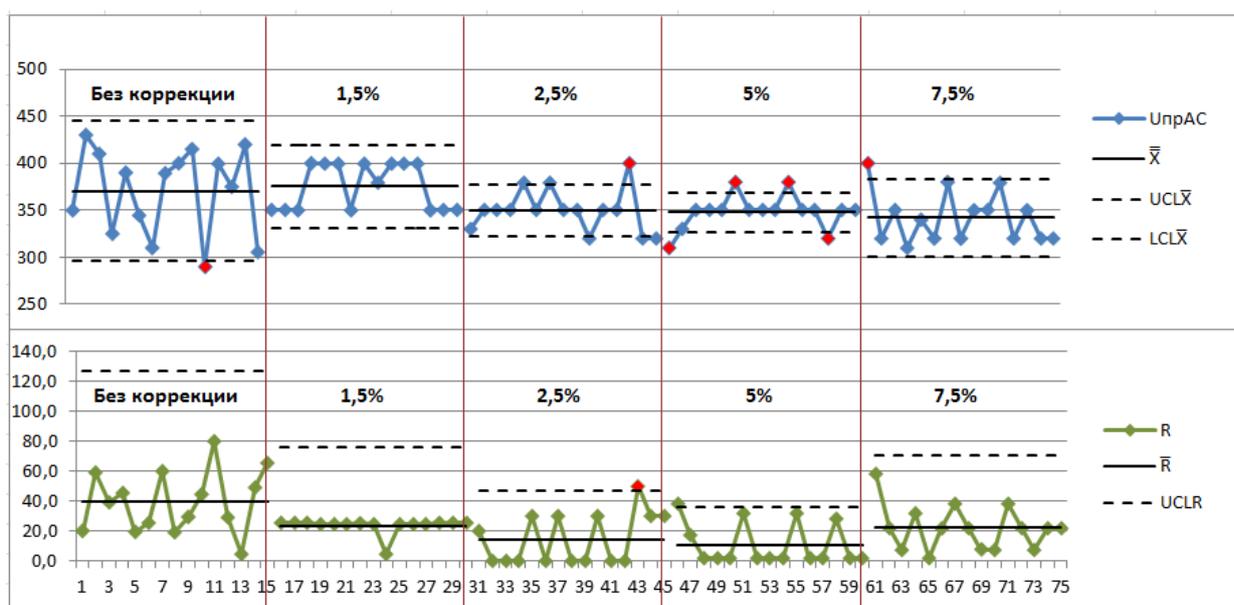


Рисунок 10 – Контрольные карты электрической прочности МДО-покрытий, сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин на алюминиевом сплаве АМг6

Наибольшая стабильность свойств покрытий наблюдается при коррекции режима их формирования с помощью УПО и наименьшем заданном пороге коррекции режима по относительному отклонению количества электричества  $\Delta_{пк} = 1,5\%$ . Наименьшая стабильность наблюдается при отсутствии коррекции режима обработки.

Таким образом, применение разработанного устройства позволяет повысить повторяемость результатов при параллельной МДО-обработке. Лучшая повторяемость результатов достигается при наименьшем значении порога коррекции режима по относительному отклонению количества электричества  $\Delta_{пк} = 1,5\%$ . Данное значение являлось уставкой режима коррекции при проведении дальнейших испытаний.

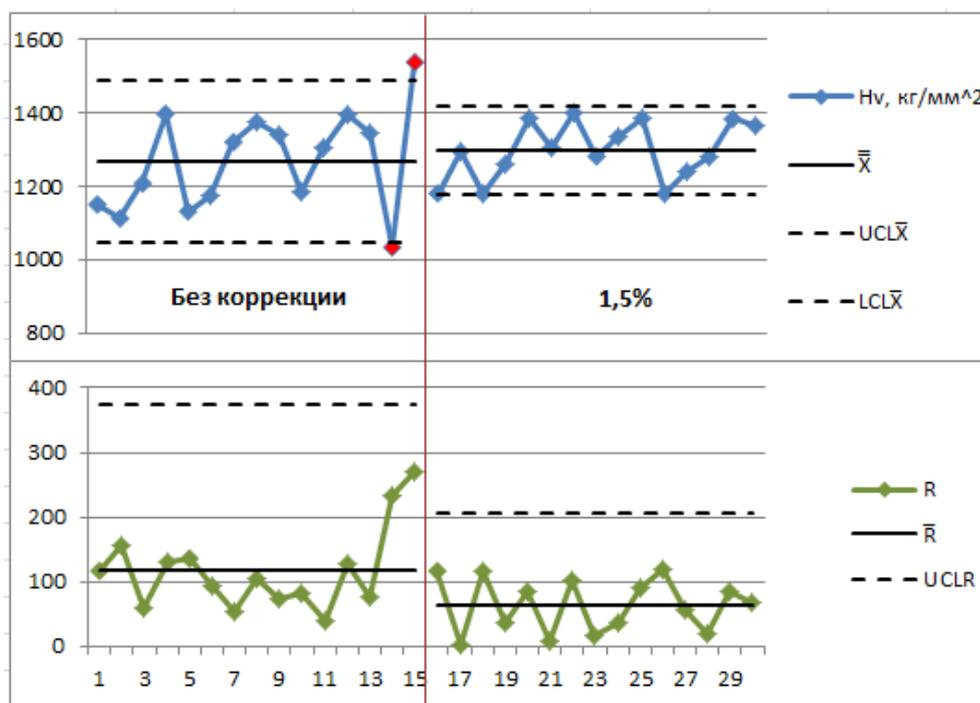


Рисунок 11 – Контрольные карты микротвердости покрытий, сформированных при параллельной обработке в течение 180 мин на алюминиевом сплаве АМг6

Применение УПО при МДО-обработке также оказывает положительное влияние на показатели стабильности значений микротвердости покрытий (рисунок 11).

В ходе выполнения работы был изготовлено устройство для групповой обработки деталей с автоматизированной системой управления, которым был оснащен промышленный технологический источник тока ТИТ МДО-100Г мощностью 100 кВт. Разработанная АСУ совместно с источником МДО-100Г успешно применялись для обработки мелких и средних партий деталей (алюминиевых мембран датчиков давления, роликов расходомеров жидкостей и газов).

## Выводы по работе

1. Были проведены экспериментальные исследования по воспроизводимости свойств сформированных МДО-покрытий, в ходе которых установлено, что свойства покрытий, формируемых параллельно в одной электролитной ванне, могут существенно различаться из-за неравномерного распределения электрического тока через обрабатываемые образцы.

2. Разработана модель распределения электрического тока в электролите при МДО, которая позволила обосновать способ автоматической коррекции режима при параллельной МДО-обработке, повышающий качество и воспроизводимость покрытий.

3. Предложен алгоритм автоматизации процесса МДО, который позволил контролировать и автоматически корректировать ход выполнения режима обработки по совокупности технологических параметров, определяемых выработкой и температурой электролита, условиями функционирования микродугового разряда и распределением электрического тока между обрабатываемыми поверхностями.

4. Разработаны функциональные схемы АСУ, позволяющие осуществлять автоматическую коррекцию технологических режимов МДО при параллельной обработке деталей и обработке деталей сложной формы (патенты РФ 97734 и 135648).

5. Разработаны программно-аппаратные устройства АСУ и соответствующее программное обеспечение, обоснованы алгоритмы их функционирования.

6. Проведена экспериментальная апробация разработанной АСУ, в результате которой подтверждена высокая эффективность индивидуальной коррекции режима обработки деталей в зависимости от количества прошедшего электричества через каждую деталь в обрабатываемой группе.

7. Выработаны рекомендации по выбору интервалов коррекции для обеспечения наилучшей стабильности процесса МДО в зависимости от назначения формируемого покрытия.

В целом, в результате выполнения диссертационной работы была разработана, исследована и внедрена принципиально новая АСУ, позволяющая индивидуально для каждой детали корректировать режим МДО при параллельной обработке.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. *Людин В.Б.* Алгоритм автоматизации конденсаторного технологического источника тока для микродугового оксидирования/ *Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Виноградов А.В., Желтухин А.В., Чудинов Д.Б.*// Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 108-111.
2. *Аникин В.А.* Исследование структуры керамополимерных функциональных покрытий с использованием спектromетрии ядерного обратного рассеяния/ *Аникин В.А., Борисов А.М., Востриков В.Г., Гусев А.В., Крит Б.Л., Маилян К.А., Романовский Е.А., Чудинов Д.Б., Ткаченко Н.В.*// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015, №. 3, С.11-14.
3. *Людин В.Б.* Автоматизация технологического процесса микродугового оксидирования при групповой обработке деталей/ *Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Крит Б.Л., Чудинов Д.Б., Федичкин И.Д., Мелихов В.В., Кондрацкий И.О.*// «Приборы» № 12, 2017 год, с. 19-23
4. *Людин В.Б.* Стабильность свойств защитных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования при групповой обработке деталей/ *Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Крит Б.Л., Чудинов Д.Б., Федичкин И.Д., Мелихов В.В.*// Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2018 год №1, с 44-50
5. Патент РФ № 97734 (С25D 11/02) Устройство для микродугового оксидирования алюминиевых сплавов и покрытий/ *Суминов И.В., Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Крит Б.Л., Борисов А.М., Чудинов Д.Б., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Сорокин И.В., Граменицкий М.Д., Васин В.А., Сомов О.В.*// Оpubл. в Бюл. № 26. 2010.
6. Патент РФ № 135648 (С25D 11/02) Устройство для групповой обработки деталей методом микродугового оксидирования/ *Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Суминов И.В. Крит Б.Л., Борисов А.М., Васин В.А., Сомов О. В., Савва В.В., Андрианова Н.Н., Чудинов Д.Б.*// Оpubл. в Бюл. № 35. 2013.
7. *Людин В.Б.* Алгоритм автоматизации конденсаторного технологического источника тока для микродугового оксидирования/ *Людин В.Б., Эпельфельд В.А., Виноградов А.В., Желтухин А. В., Чудинов Д.Б.*// Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 9-й Всероссийской с международ. участием науч.-тех. конф. 30 ноября – 1 декабря 2010 г.. МАТИ: Сб. трудов. М.:МАТИ, 2010.-356с. с. 162-166.
8. *Людин В.Б.* Микроконтроллерная система управления тиристорного регулятора напряжения / *Людин В.Б., Серов М.М., Виноградов А.В., Чудинов*

*Д.Б.* // Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 10-й Юбилейной Всероссийской с международ. участием науч.-тех. конф. 29-30 ноября 2011 г.. МАТИ: Сб. трудов. М.:МАТИ, 2011. 392с. с 266-270.

9. *Желтухин Р.В.* Модернизация программно-аппаратного комплекса мониторинга параметров МДО-процесса/ *Желтухин Р.В., Чудинов Д.Б., Виноградов А.В., Людин В.Б.*// Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 11-й Всероссийской с международ. участием науч.-тех. конф. 27-28 ноября 2012 г.. МАТИ: Сб. трудов. М.:МАТИ, 2012.-399с. с 290-293.
10. *Людин В.Б.* Исследование влияния выработки электролита на стабильность показателей свойств МДО-покрытий/ *Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Чудинов Д.Б., Федичкин И.Д., Мелихов В.В.*// Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 12-й Всероссийской с международ. участием науч.-тех. конф в 2-х томах. Том 1. 26-27 ноября 2013 г. МАТИ: Сб. трудов. М.:МАТИ, 2013. 386с. с 289-294.
11. *Людин В.Б.* Разработка автоматизированной системы групповой обработки деталей методом микродугового оксидирования/ *Людин В.Б., Чудинов Д.Б., Федичкин И.Д., Мелихов В.В.*// Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 13-й Международной научно-технической конференции. – М.: ПРОБЕЛ-2000, 2014. С. 169-172.