



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

---

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Серов Михаил Михайлович

Москва 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 4   |
| 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ.....   | 9   |
| 1.1. Применение технологии МДО .....   | 9   |
| 1.2. Технология микродугового оксидирования .....  | 16  |
| 1.3. Средства автоматизации технологического процесса.....   | 22  |
| 1.4. Выводы .....  | 34  |
| 2. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА<br>МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ<br>ДЕТАЛЕЙ..... | 35  |
| 2.1. Методика и оборудование эксперимента.....   | 35  |
| 2.2. Исследование воспроизводимости свойств МДО-покрытий при параллельной<br>обработке .....                                     | 41  |
| 2.3. Физико-математическая модель процесса параллельной МДО-обработки .  | 56  |
| 2.4. Выводы .....  | 66  |
| 3. АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА<br>ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ МДО-ОБРАБОТКИ .....  | 67  |
| 3.1. Функциональная схема автоматизированной системы управления .....  | 67  |
| 3.2. Средства управления и мониторинга системы .....   | 70  |
| 3.3. Устройство параллельной обработки для технологий МДО .....  | 82  |
| 3.4. Выводы .....  | 88  |
| 4. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ<br>УПРАВЛЕНИЯ.....  | 89  |
| 4.1. Алгоритм функционирования автоматизированной системы управления ..  | 89  |
| 4.2. Интерфейс удаленного доступа к технологическому оборудованию .....  | 94  |
| 4.3. Алгоритмы устройства параллельной обработки.....  | 96  |
| 4.4. Выводы .....  | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ..... | 102 |
| 5.1. Методика экспериментальной апробации .....  | 102 |
| 5.2. Результаты экспериментальной апробации .....  | 106 |
| 5.3. Результаты внедрения .....  | 130 |
| 5.4. Выводы .....  | 132 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 133 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....  | 135 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....  | 136 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** 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 электролитической 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.

**Степень разработанности темы.** Развитие исследований в области МДО-обработки началось в 70-х годах прошлого века. Большой вклад в развитие и практическое применение технологии МДО внесли Г.А. Марков, П.С. Гордиенко, В.С. Руднев, И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Н. Дураджи, П.Н. Белкин, А.Л. Ерохин, А.И. Мамаев и др.

Тема автоматизации процесса МДО получила развитие в работах В.Б. Людина и А.В. Виноградова. В них классифицированы и исследованы

режимы МДО-обработки, разработаны программные и аппаратные средства АСУ, улучшающие повторяемость и воспроизводимость процесса микродугового оксидирования для последовательной обработки.

**Объект исследования.** Процесс микродугового оксидирования для параллельной обработки деталей из алюминиевого сплава АМг6.

**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 и обосновать факторы, влияющие на свойства 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. Опробовать автоматизированный процесс параллельной МДО-обработки и разработанную автоматизированную систему управления в производственных условиях.

**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.

**Научная новизна** работы:

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 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.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Результаты исследований лимитирующих параметров технологических режимов и средств автоматизации и управления, используемых в технологиях МДО при параллельной обработке.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на воспроизводимость МДО-покрытий при параллельной обработке деталей из алюминиевого сплава АМгб.

3. Физико-математическая модель процесса параллельной МДО-обработки деталей.

4. Алгоритм автоматизации технологического процесса и 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.

**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 в производстве деталей из алюминиевых сплавов.

**Личный вклад автора** заключается в постановке и решении научных задач, разработке технических решений, участии в их реализации, анализе и обобщении полученных экспериментальных результатов.

**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, два патента РФ.

**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.



## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1. Применение технологии МДО

В современной промышленности находят широкое применение изделия из алюминия, а также сплавов на их основе. Однако их коррозионностойкие и износостойкие свойства ниже, чем у нержавеющей стали и сталей с высокой удельной прочностью. В связи с этим, наряду с классическим материаловедением, ставящем своей задачей улучшения материала основы в целом, получили развитие пути локального улучшения характеристик поверхности деталей при помощи нанесения покрытий и/или преобразования структуры поверхностных слоев [1-6].

Известны способы защиты поверхностей деталей путем получения тонких оксидных пленок с последующим нанесением противокоррозионных лакокрасочных составов. Недостатком такого способа является низкая адгезия покрытия с материалом основы. Для защиты от трения и износа применяют толстые оксидные покрытия получаемые методом анодирования в холодных электролитах. Такая обработка позволяет повысить износостойкость поверхности в 1,5-2 раза [7-13].

Вместе с этим известны способы электрохимической формовки оксидных покрытий с использованием энергии микроразрядов возникающих в результате электрического пробоя анодной оксидной пленки – микродуговое оксидирование (МДО). Участие микроразрядов в процессе формирования покрытий позволяет получать на поверхности деталей сложные многофункциональные керамикоподобные покрытия, превосходящие материал основы по характеристикам износостойкости и коррозионностойкости в десятки раз [14-20].

Технологическому процессу МДО могут подвергаться детали, изготовленные из материалов, основой которых являются металлы с ярко выраженными вентильными свойствами. Оксидные пленки, образующиеся на поверхности этих металлов, обладают униполярной проводимостью в

системе металл-оксид-электролит, что и дало название группе этих металлов по аналогии с полупроводниковым вентилем. К вентильным металлам относятся Al, Mg, Ti, Zr, Nb, Ta, Вe, а также сплавы на их основе [14-21].

В процессе МДО формируется трехслойное покрытие, состоящее из переходного слоя прилегающего непосредственно к материалу основе, рабочего (промежуточного) и внешнего технологического слоя. Характеристики и свойства МДО-покрытий, определяются структурой и физико-механическими свойствами этих слоев. Переходной слой является самым тонким и обеспечивает высокую адгезию покрытия с металлом основы. Рабочий слой покрытия обладает высокой микротвердостью и низкой пористостью, его наличие позволяет придать поверхности наибольшую стойкость к коррозии и износу, существенно повысить конструкционную жесткость. Технологический слой обладает меньшей по сравнению с рабочим слоем микротвердостью, но большей пористостью и развитой внутренней структурой, что придает пониженную теплопроводность поверхности [14,16,18, 21,23].

Процесс формирования покрытия при МДО во многом зависит от электрических режимов обработки и толщины покрытия. Рост покрытия приблизительно до 10 мкм происходит преимущественно за счет технологического слоя. При дальнейшем росте происходит разделение технологического слоя и образование переходного слоя. Рабочий слой требует больших энергетических затрат и начинает формироваться при толщинах от 50 мкм. Управляя и изменяя электрические параметры режимов обработки, можно влиять на процессы формирования данных слоев [16,18,24-28].

Таким образом, многофункциональность МДО-покрытий и возможность варьировать большое число характеристик при формовке оксидных слоев позволяет применять эти технологии в перспективных разработках высокотехнологичных отраслей промышленности.

В машиностроении сверхтвердые оксидные слои сформированные методом МДО нашли свое применение как износостойкие и антифрикционные покрытия взамен легированной стали, что обеспечивает кратное увеличение износостойкости и наработке на отказ[16,18,39].

В приборостроении МДО-покрытия используются как: антидиффузионные слои нагревательных систем; матированные и чёрные слои абсорберы радиаторов; износостойкие покрытия на быстровращающихся деталях расходомеров дозаторов жидкостей и газов; коррозионностойкие МДО-покрытия на корпусных деталях из алюминиевого сплава АМгб; износостойкие и коррозионностойкие покрытия для приборных рам и МДО покрытия для повышения жесткости рам гироскопов [16,18,30].

Благодаря диэлектрическим свойствам и хорошей теплопроводностью МДО покрытия используются в электронной промышленности для создания корпусов микросхем, подложек светодиодов, печатных плат и танталовых анодах электролитических конденсаторов[16,18,29].

Благодаря высокой коррозионной стойкости детали с МДО покрытием применяются для работы в условиях контакта с агрессивной средой. Так в нефтегазовой промышленности МДО-покрытия на шибберных задвижках и торцевых уплотнителях трубозапорной арматуры многократно продлевает их срок службы при работе с сероводородсодержащими средами [34-36]. Также в нефтегазовой промышленности оксидные слои полученные методом МДО используются в качестве катализаторов для оксидного катализа [37] и защиты фильтрующих элементов [38].

Износостойкие МДО-покрытия на деталях станков используемых в текстильной промышленности (веретена, тарелочки натяжных приборов, нитеводители ткацких станков, раскладочные ролики) позволяют продлить их срок эксплуатации и снизить издержки производства [16,18].

Также технология МДО находит свое применение в производстве товаров бытового назначения. Антипригарные МДО-покрытия на поверхности сковород, противней и форм для запекания представляют надежную и экологичную альтернативу широко известным покрытиям из политетрафторэтилена (тефлона). Полированные МДО-покрытия подошв утюгов из алюминиевых сплавов снижают коэффициент трения приблизительно в 1,5 раза при повышении поверхностной твердости в 5-6 раз. Декоративные покрытия корпусов мелких бытовых приборов таких как фотоаппараты, телефоны, радиостанции, ручные фонарики, велосипедные насосы и т.п. улучшают эстетический вид конечного изделия и предотвращают «пачкающий» эффект алюминия [16,18].

В инструментальной промышленности МДО-покрытия применяются как абразивные слои на калибрах, притирах и дисках из алюминиевых сплавов (вместо алмазного покрытия). А также как покрытие, повышающие жесткость корпусов держателей для высокоскоростных фрез [16,18].

В аэрокосмической отрасли технологии МДО удачно вписываются в общую тенденцию, направленную на снижение веса и повышение надежности летательных аппаратов. Такой эффект достигается за счет замены стальных деталей на аналогичные изготовленные из легких алюминиевых сплавов с керамическими покрытиями [16,18].

Таким образом, многочисленные примеры применения, а также лабораторные, стендовые и натурные испытания изделий с использованием МДО-покрытий показали их пригодность для улучшения защитных свойств поверхности от трения и износа, повышения коррозионной стойкости, конструкционной жесткости и жаропрочности, придания поверхности электроизоляционных и поглощающих излучение свойств, создания пористых адгезионных подслоев используемых как грунт для последующего нанесения лакокрасочных покрытий.

Одним из распространённых материалов основы для получения модифицированных поверхностных слоев методом МДО является алюминиевый сплав АМгб. Среди прочих магналиев (сплавов алюминия и магния) этот сплав занимает первое место по прочности и твердости, но последнее место по коррозионной стойкости. Сплав АМгб обладает низкой плотностью  $2640 \text{ кг/м}^3$ . Детали, изготовленные из данного материала с применением технологии микродугового оксидирования, хорошо зарекомендовали себя в таких областях как аэрокосмическая промышленность, приборостроение, машиностроение [16,18].

Схема классификации режимов МДО-обработки приведена на рисунке 1.1, серым цветом отмечены режимы применяемые для обработки алюминиевого сплава АМгб.

При проведении технологического процесса МДО используются в основном слабощелочные электролиты практически не наносящие ущерб окружающей среде и не требующие специальных средств утилизации, при разбавлении их в 10 раз полученный состав становится пригодным для слива в общепромышленную канализацию. Во время МДО-процесса происходит выделение исключительно водорода и кислорода. Все это делает процесс микродугового оксидирования в значительной мере более экологически безопасным по сравнению с прочими методами электрохимической обработки поверхности [16,18].

Многофункциональность и уникальность свойств покрытий полученных методом МДО на поверхностях алюминиевых сплавов делает актуальной задачу расширения применения этого метода. Однако исследования в этой области далеки от завершения. Так широкое распространение технологии МДО сдерживается ее высокая чувствительность к технологическим параметрам процесса, а также наличие большого числа лимитирующих факторов стохастически возникающих во время обработки. Все это затрудняет организацию массового производства, так как в условиях параллельной обработки большого числа изделий данные

особенности процесса сильно снижают выход годной продукции и, как следствие экономическую целесообразность применения технологии МДО. Решением этих проблем является разработка нового поколения автоматизированных систем по управления процессом, учитывающих все параметры и лимитирующие факторы обеспечивающих коррекцию режима обработки по этим параметрам.



Рисунок 1.1 – Классификация технологических режимов МДО

## 1.2. Технология микродугового оксидирования

Микродуговое оксидирование – это электрохимический процесс модификации поверхностей деталей изготовленных из вентильных металлов. В отличие от традиционного анодирования в процессе формирования МДО-покрытия принимают участие микроаряды, которые оказывают комплексное воздействие на формируемое покрытие, электролит и материал основы. Это позволяет формировать многофункциональные керамикоподобные покрытия с широким спектром полезных свойств, таких как высокая износостойкость, коррозионная стойкость, теплостойкость, диэлектрические свойства.

В отличие от анодирования МДО-процесс ведётся при напряжениях порядка 1000 В как правило на асимметричном переменном или импульсном токе, в преимущественно слабощелочных электролитах.

Процесс МДО обладает следующими преимуществами: экологичность и неагрессивность электролитов; возможность получения покрытий большой толщины без применения дополнительного холодильного оборудования; отсутствие необходимости в предварительной подготовке поверхности обрабатываемых деталей; высокая твёрдость и износостойкость покрытий; стабильность характеристик покрытий.

На свойства покрытий сформированных методом микродугового оксидирования наибольшее влияние оказывают следующие факторы: концентрация и состав электролита, режим обработки, материал подложки.

Электролиты для МДО разделяются на не способные образовывать нерастворимые оксиды (электролиты первого рода) и электролиты содержащие элементы образующие такие соединения (электролиты второго рода). Формируемое покрытие в электролитах первого рода растёт вглубь поверхности за счёт её окисления. В электролитах второго рода наблюдается



эффект прироста массы покрытия за образования нерастворимых оксидов, инкорпорирующийся в состав покрытия, что приводит к увеличению размеров детали после нанесения оксидного слоя [16,18].

Также электролиты МДО разделяются по водородному показателю pH. Щелочные электролиты готовятся на основе едких кали, натра или солей  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaAlO}$  [16,18,41]. Кислотные – на основе серной, фосфорной кислот или их смесей [21,31-33,40,41]. Нейтральные электролиты – на основе не подверженных гидролизу солей ( $\text{NaCl}$  и т. д.) [29].

В качестве электролита могут быть использованы смеси на основе одного, двух и более компонентов (многокомпонентные). В качестве однокомпонентных электролитов применяются растворы силикатов щелочных металлов ( $\text{NaSiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) или жидкого стекла ( $n\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$ ) [41,42]. К двухкомпонентным электролитам относят силикатно-щелочные смеси состоящие, например, из жидкого стекла и едкого кали [43]. Примерами электролитов состоящих из трех и более компонентов являются такие смеси как: алюминат и гексаметафосфат натрия с щелочью ( $\text{NaAlO}_2 + \text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18} + \text{KOH}$ ), молибдат аммония и силикат калия с щелочью ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} + \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$ ), ортофосфат, гидрокарбонат, силикат калия и щелочь ( $\text{K}_3\text{PO}_4 + \text{KHCO}_3 + \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$ ) [43].

Многокомпонентные электролиты в свою очередь можно разделить по признаку растворимости его компонентов, является ли он раствором или суспензией. В последнем случае нерастворимые соединения, такие как  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{MgO}$ , служат для придания особых свойств покрытию, а вещества  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  являются красящими пигментами и используются для получения цветных покрытий [44].

Допустимый срок использования электролита после его приготовления определяется количеством ампер-часов электричества пропущенного через раствор на единицу его объема (выработка электролита), которое не приводит к ухудшению качеств МДО-покрытий ниже допустимого предела.

Для силикатно-щелочных электролитов величина выработки составляет в среднем 6-10 А·ч/л.

Температура электролита также является существенным фактором, влияющим на качество формируемого МДО-покрытия. Повышение температуры приводит к ухудшению таких свойств как пробойное напряжение и пористость [34]. Кроме того, электролиты содержание соли слабых кислот подвержены гидролизу, что приводит к резкому снижению их работоспособности. Поэтому при МДО-обработке температура электролита 40-50°C являются предельной [16-18,46].

Следующим важным фактором, определяющим характеристики формируемого покрытия, является режим обработки. Режимы МДО обработки разделяются по виду тока (постоянный или переменный) и по полярности приложенного напряжения. Выделяю следующие режимы: анодный (на обрабатываемую деталь подается положительный потенциал), катодный (подается отрицательный потенциал), анодно-катодный (через обрабатываемую поверхность протекает переменный ток, содержащий анодную и катодную составляющую). В зависимости от изменения в процессе обработки электрических параметров в МДО-нагрузке выделяют режимы: гальваностатический (режим стабилизации постоянного значения тока), гальванодинамический (режим стабилизации изменяющегося во времени значения тока), потенциостатический (режим стабилизации постоянного значения напряжения), потенциодинамический (режим стабилизации изменяющегося во времени напряжения), режим постоянной мощности. Также важным показателем режима МДО обработки является его жесткость. Выделяют режимы: мягкий, мягко-жесткий, жестко-мягкий, жесткий [16-18,21,47-49].

Под жесткостью режима подразумевается уровень прикладываемого напряжения относительно пороговых напряжений зажигания и гашения микродуговых разрядов ( $U_z$ ,  $U_r$ ) в сформированном покрытии (рисунок 1.2). При мягком режиме (рисунок 1.2 а) прикладываемое напряжение постепенно

возрастает и убывает. Развитие МДО разряда в этом случае начинается при напряжении зажигания разряда, а заканчивается при напряжении гашения. При жестком режиме (рисунок 1.2 б) напряжение резко возрастает и спадает. Зажигание и погасание МДО разряда в этом случае происходит при напряжениях превышающих пороговые значения зажигания и гашения в большую и меньшую стороны соответственно. Задавая отличные принципы жесткости для переднего и заднего фронта одного полупериода, также получают мягко-жесткий (рисунок 1.2 в) и жестко-мягкий (рисунок 1.2 г).

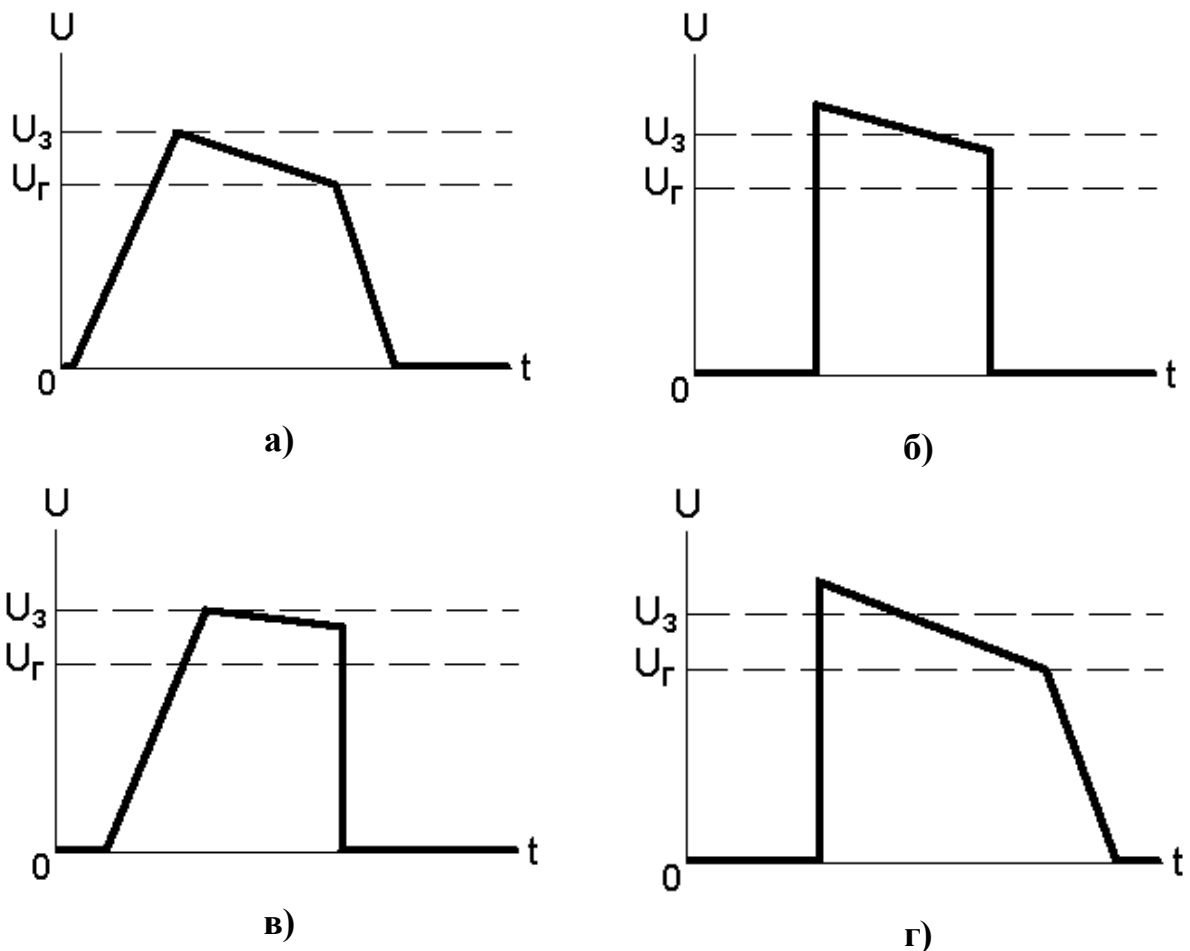


Рисунок 1.2 – Режимы МДО-обработки: мягкий (а), жесткий (б), мягко-жесткий (в) и жестко-мягкий.

Для МДО-обработки чаще всего используются мягкие анодно-катодные режимы. В этих режимах МДО-покрытия могут быть сформированы на большинстве вентильных металлах с требуемым набором физико-химических характеристик. Исключения составляют лишь материалы

с напряжением зажигания разряда превышающим 300 В и отсутствием на обрабатываемой поверхности сплошной барьерной АОП. На подобных материалах в мягком режиме обработки вместо зажигания разряда или вместе с ним происходит расстраивание (разрушение) обрабатываемой поверхности [16,18].

Основными параметрами мягких анодно-катодных режимов являются: плотность тока через обрабатываемую поверхность; соотношение анодной и катодной составляющих тока; продолжительность процесса обработки [16-18].

Мягкий анодно-катодный режим МДО-обработки обеспечивается при помощи пассивных или активных конденсаторных ТИТ. Параметры формируемых импульсов в установках подобного типа определяются в основном параметрами МДО-нагрузки. В случае использования активных ТИТ с силовыми полупроводниковыми ключами (СПК) может быть обеспечено управление соотношением анодного и катодного токов. [16,18,50,51].

Чередование жесткости режимов обработки положительно сказывается на МДО-процессе в случае работы с «труднозажигаемыми» сплавами. Так начало процесса может быть инициировано в жестком режиме с последующим переходом к мягкому. Данный подход снижает вероятность образования прожогов покрытия вызванных жесткостью режима [16,18].

Во время обработки в мягких режимах на некоторых материалах может наблюдаться эффект затухания и гашения разряда. Этот процесс сопровождается растриванием обрабатываемой поверхности и уменьшением напряжения на МДО-нагрузке. Переход к жестко-мягкому режиму позволяет предотвратить эти процессы и продлить длительность обработки [16,18,46,52].

Также при обработке в мягком анодно-катодном режиме присуще пост-разрядные процессы, такие как травление металла основы в открытых порах покрытия после затухания разряда. Эти процессы могут быть детектированы

по отсутствию роста напряжения в МДО нагрузке. [18]. Для снижения негативного влияния этих процессов на качества покрытий может быть применен переход к мягко-жесткому режиму обработки.

Для повышения микротвердости покрытий на алюминиевых сплавах применяется комбинированная последовательная обработка в мягком анодно-катодном режиме с переходом на катодный режим и последующим возвратом в анодно-катодный [22,53-55].

### 1.3. Средства автоматизации технологического процесса

В общем случае установка для МДО состоит из электролитной ванны, технологического источника тока (ТИТ), и вспомогательного оборудования, такого как системы охлаждения и перемешивания электролита, вытяжная вентиляция и т.п. Система охлаждения электролита может представлять собой рубашку охлаждения ванны, через которую осуществляется прокачка охлаждающей жидкости, либо устройство прокачки электролита через внешний теплообменник. Перемешивание электролита в ванне осуществляется механически при помощи двигателя вращающего мешалку, либо продувом воздуха через электролит путем барботаж. Схема типовой МДО-установки изображена на рисунке 1.4 [16,18]

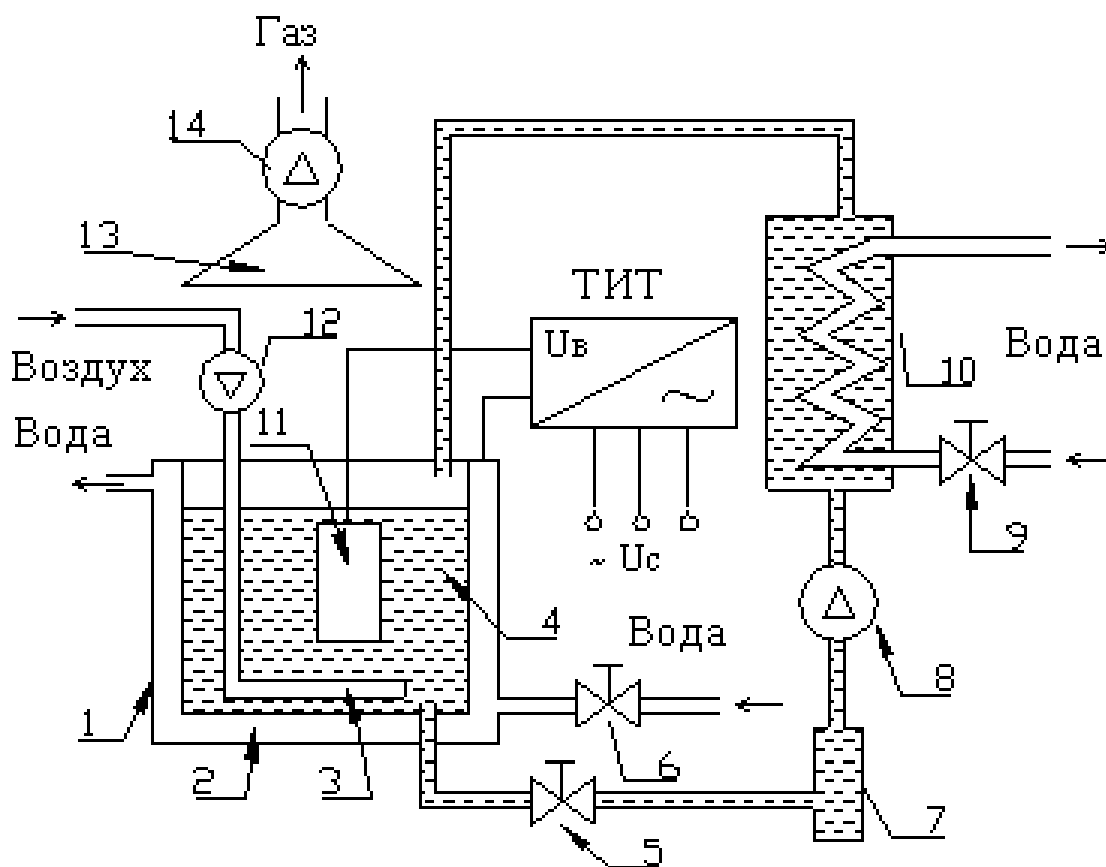


Рисунок 1.4 – Схема МДО-установки: 1 – электролитная ванна; 2 – рубашка водяного охлаждения; 3 – барботер; 4 – электролит; 5, 6, 9 – запорная арматура; 7 – фильтр; 8 – водяной насос; 10 – бак с теплообменником; 11 – деталь; 12 – воздушный компрессор; 13 – вытяжной зонт; 14 – вытяжной вентилятор

МДО-обработка осуществляется под воздействием импульсов электрического тока формируемого ТИТ из сети электропитания. Управление параметрами этих импульсов наряду с составом электролита обеспечивает требуемый режим МДО-обработки [16,18,27,48].

Структурная схема ТИТ приведена на рисунке 1.5. В данном примере ТИТ состоит из вводного устройства, энергетических и измерительных цепей, системы управления (СУ) силовыми ключами энергетических цепей, интегрированной для автоматизации и мониторинга МДО-процесса [18,50,56].

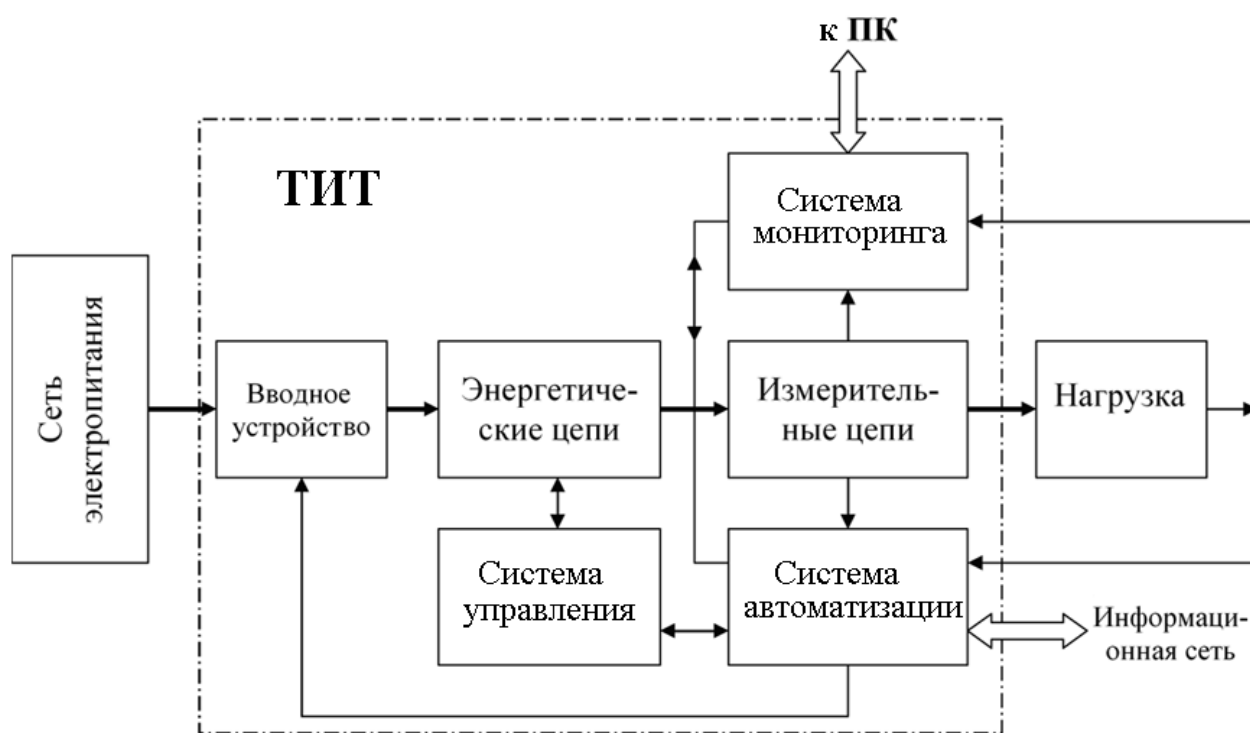


Рисунок1.5 – Структурная схема ТИТ для МДО

Вводное устройство выполняет функции защиты входных цепей ТИТ от перегрузок и короткого замыкания, а также используется для включения и выключения установки. В энергетических цепях происходит преобразование напряжения электропитания ТИТ в, требуемые для обеспечения определенного режима обработки, электрический ток. Управление силовыми полупроводниковыми ключами, включенными в энергетические цепи, осуществляется системой управления и автоматизации. Схема и алгоритм

управления энергетическими цепями во многом определяют технологические возможности ТИТ [50].

Система управления и автоматизации ТИТ позволяет обеспечить следующие функции [16,18]:

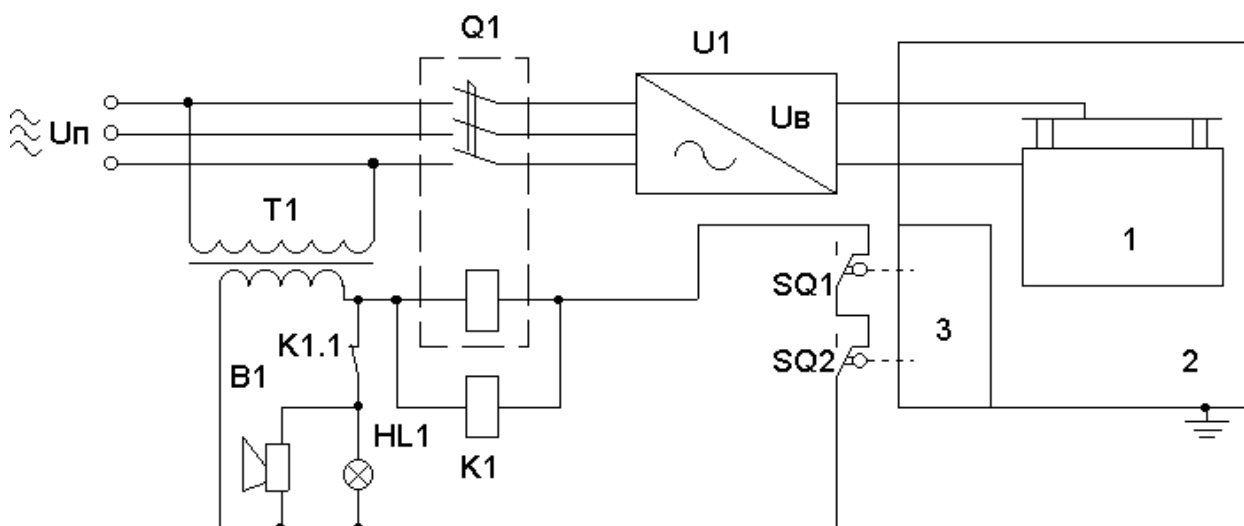
- безопасность проведения технологического процесса;
- функционирование силовых преобразователей;
- защиту силовых преобразователей от аварийных режимов;
- регулирование параметров выходных импульсов;
- измерение и индикацию параметров выходных токов и напряжений;
- контроль предельных параметров технологических режимов;
- сервисные функции.

Технологический процесс МДО протекает при повышенном напряжении, прикладываемом к обрабатываемой детали, величина которого может достигать до 1000 В. Электролитная ванна при этом не заземляется и также находится под напряжением. Для ограничения доступа к электролитной ванне находящейся под напряжением ее помещают за защитное ограждение (рисунок 1.6.), двери которого контролируются датчиками SQ1 и SQ2. Данные датчики представляют собой нормально замкнутые концевые выключатели, которые при открывании двери срабатывают и обесточивают управляющую обмотку автоматического выключателя Q1, отключающего питание силового преобразователя U1, и включающего световую (HL1) и звуковую (B1) сигнализацию. Все эти меры позволяют снизить вероятность поражения электрическим током при эксплуатации ТИТ.

Для обеспечения требуемой формы импульсов на МДО-нагрузке система управления должна обеспечивать определенные алгоритмы коммутации силовых полупроводниковых ключей (СПК), входящих в состав энергетических цепей ТИТ. Нелинейный характер МДО-нагрузки требует присутствия управляющего импульса или пачки импульсов в течение всего необходимого интервала проводимости СПК, поскольку коммутация



полууправляемого СПК одиночным (за период сети) коротким импульсом нестабильна. Исключение составляют пороговые системы импульсно фазового управления (СИФУ), следящие за напряжением на гальванической нагрузке [57-70].

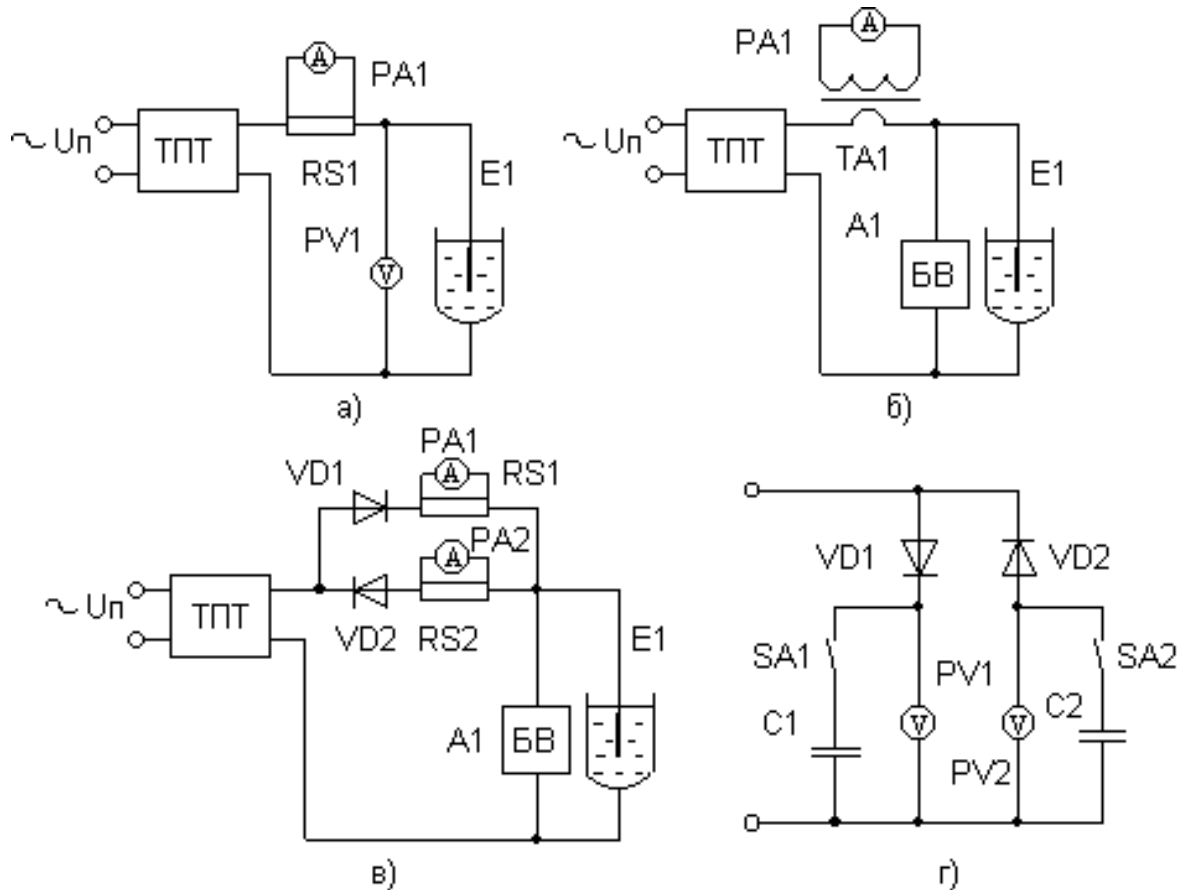


**Рисунок 1.6 – Цепи безопасности в установках МДО: 1 – электролитная ванна; 2 – защитное ограждение; 3 – дверь в защитном ограждении**

Для контроля выходных параметров тока и напряжения в МДО-нагрузке ТИТ оснащаются измерительными цепями. На рисунке 1.7 приведены схемы подключения измерительных цепей

В случае необходимости измерения электрических параметров в цепях постоянного или импульсного униполярного тока (рисунок 1.7, а) измерительные цепи состоят из амперметра PA1, установленного на измерительный шунт RS1, и вольтметра PV1. В ТИТ переменного тока (рисунок 1.7, б) измерительные цепи состоят из амперметра PA1, подключенного через измерительный трансформатор тока ТА1, и блока вольтметров А1. В случае, когда требуется отдельный контроль параметров анодной и катодной составляющей (рисунок 1.7, в), помимо блока вольтметров А1, измерительные цепи включают элементы VD1, RS1, PA1 для измерения токов анодной составляющей, и VD2, RS2, PA2 для катодной. Блок вольтметров (рисунок 1.7, г) также состоит из отдельных цепей

измерения напряжения анодной (VD1, C1, SA1, PV1) и катодной (VD2, C2, SA2, PV2) составляющей. По средствам замыкания переключателей SA1, SA2 осуществляется переключения из режима измерения среднего значения в режим измерения амплитудного напряжения.



**Рисунок 1.7 – Измерительные цепи ТИТ**

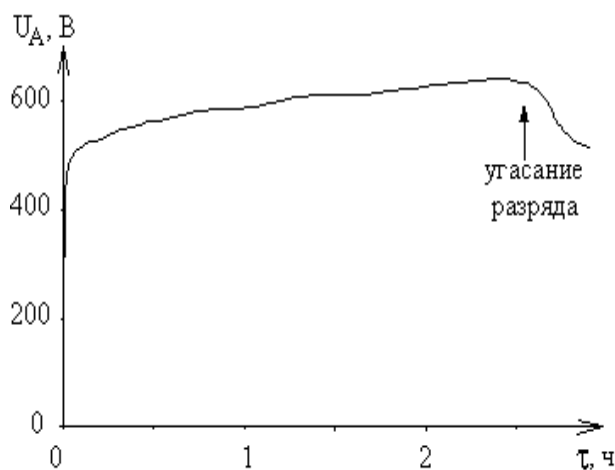
Во время процесса МДО также необходимо автоматически детектировать явления, негативно влияющие на стабильность и качество получаемых покрытий. К подобным явлениям относят превышение предельной температуры и выработки электролита.

Контроль степени выработки электролита осуществляется за счет учета удельного количества электричества, пропущенного через него. Значения максимального допустимого количества электричества для каждого вида электролита определяется экспериментально. Так, для силикатно-щелочного электролита установлено, что необходимо проводить корректировку после прохождения 6-10 А·ч/л, и его полную замену после 25-38 А·ч/л. Эти значения могут меняться в зависимости от состава электролита и материала

обрабатываемой детали.

Температура электролита также оказывает значительное влияние на технологический процесс МДО. При температуре менее 5-8 °С процесс оксидирования замедляется, а при превышении температуры 40-50°С резко ухудшается качество получаемых покрытий. Также при повышенной температуре интенсифицируются процессы гидролиза компонентов электролита, что приводит к преждевременной выработке электролита.

Технологический процесс МДО в большинстве случаев протекает при стабильном развитии горения микродугового разряда (МДР). Однако в отдельных случаях при определенных режимах обработки может наблюдаться явление преждевременного угасания МДР, приводящее к травлению и разрушению сформированного покрытия. Процесс угасания МДР сопровождается снижением анодной составляющей на МДО нагрузке (рисунок 1.8).



**Рисунок 1.8 – Анодная формовочная кривая при угасании МДР**

Пример реализации аппаратной системы автоматизации ТИТ переменного тока приведен на рисунке 1.9. В данной схеме контроль предельно допустимой температуры электролита осуществляется ртутным контактным термометром SK1. При

достижении предельного значения температуры происходит замыкание контакта ртутного термометра и включение реле К5, которое отключает реле К4 управляющее через контакт К4.1 состоянием ТИТ, в результате чего происходит прекращение МДО-процесса. Контакт К4.1 служит для управления ТИТ, если он замкнут работа разрешена, если разомкнут то запрещена.



питания ТИТ [16,18].

Функция катодной защиты детали реализуется через подачу постоянного отрицательного потенциала 8 В от вторичного источника питания образованного элементами TV1, UZ1, C1, R1, R2, PV1, PA1. Напряжение 8 В подается на деталь через тумблеры включения системы автоматизации SA1 и включения функции катодной защиты SA2, а также контакта реле КЗ.1.

Длительность МДО-процесса задается реле времени КТ1 и электромеханическими часами РТ1. Во время процесса напряжение 220 В с электролитической ванны приводит к срабатыванию реле К2, запускающее устройства контроля продолжительности процесса КТ1 и РТ1. По завершении заданного интервала времени реле времени КТ1 прекращает технологический процесс.

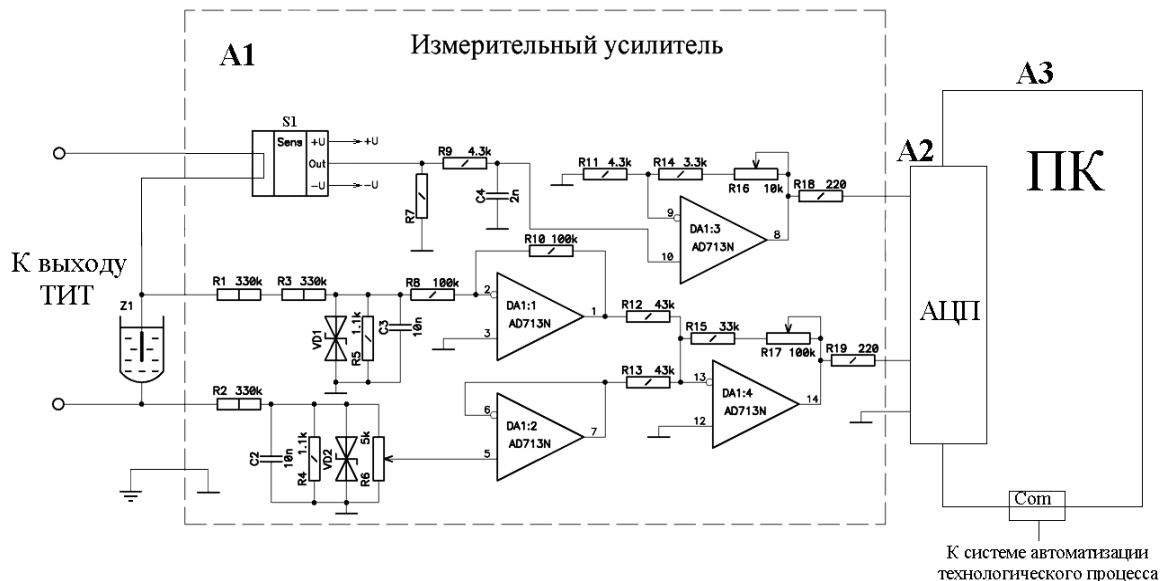
Непрерывный контроль таких факторов как температура, выработка электролита, условия зажигания и поддержания МДР, во многом определяет стабильность и воспроизводимость технологического процесса МДО. Выработка электролита может определяться по количеству электричества, прошедшего через него, а режим функционирования МДР зависит от электрического тока и напряжения в системе МОЭ [46].

Для эффективной автоматической корректировки МДО процесса необходимо непрерывно контролировать такие электрические параметры как средние и амплитудные значения анодной и катодной составляющей выходного напряжения, средние и действующие значения выходного тока в анодный и катодный полупериоды [16,18].

В случае наличия в системе автоматизации компьютеризированных вычислительных средств, требуемые характеристики токов и напряжений, как в анодный, так и в катодный полупериод, могут быть получены посредством математической обработки последовательной выборки мгновенных значений этих параметров. Данный подход также позволяет оценить динамику изменения этих параметров.

Существуют автономные и интегрированные в ТИТ системы мониторинга технологического процесса МДО. В автономных системах оцифровка, обработка и хранение данных выполняется на внешнем ПК, а в интегрированных функции мониторинга распределены между узлами и блоками ТИТ. Автономные системы мониторинга обеспечивают высокую производительность обработки данных и используются при проведении научных исследований. Интегрированные системы мониторинга при невысокой (по сравнению с автономными системами) производительности обладают низкой стоимостью, повышенной устойчивостью к сбоям и поэтому чаще используются в производственных процессах.

На рисунке 1.10 представлена функциональная схема автономной системы мониторинга технологического процесса МДО на основе ПЭВМ. На входах измерения напряжения и тока в этой системе установлен двухканальный измерительный усилитель А1, сигналы с выхода которого подаются на аналоговые входы компьютерной платы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) А2. Измеренные мгновенные значения оцифровываются в этой плате и затем поступают на информационные шины персонального компьютера (ПК) А3.



**Рисунок 1.10 – Функциональная схема автономной системы мониторинга процесса МДО**

В автономной системе мониторинга предусмотрена возможность ее синхронизации с системой автоматизации ТИТ. Для этого между ТИТ и системой мониторинга создается информационный канал с помощью последовательного интерфейса (Com-порт в ПК).

Датчиком тока системы мониторинга является полупроводниковый датчик Холла. В отличие от измерительного шунта или трансформатора тока данный вид электрического преобразователя свободен от таких недостатков как гальваническая связь с выходными цепями, и возможность работы исключительно с цепями переменного тока. Системы мониторинга с датчиком Холла могут обеспечивать достоверный сбор данных для всех видов ТИТ, включая работающие с постоянным или реверсивно импульсным током.

Для системы управления ТИТ и автоматизации процесса МДО предложен алгоритм [71], блок-схема которого представлена на Рисунке 1.11. Перед началом процесса МДО должны быть заданы требуемые значения технологических параметров (блок 2), такие как продолжительность процесса  $\tau_y$ , допустимое снижение напряжения на МДО-нагрузке  $\Delta U$ , максимальная температура электролита  $T_m$ , рабочая температура возобновления процесса  $T_p$  и др.

Затем по количеству электричества  $Q_n$ , прошедшего через электролит после последней корректировки его химического состава, определяется необходимость текущей коррекции или полной замены электролита. Первое необходимо если  $Q_n$  превысит уставку  $Q_k$  корректировки электролита (блок 3), а второе – если количество электричества  $\Sigma Q_n$ , прошедшего через электролит с момента его приготовления, превысит уставку  $Q_v$  полной его (блок 4). После корректировки (блоки 5-7) или замены (блоки 8-10) электролита запоминаются новые значения  $Q_n$  и  $\Sigma Q_n$  (блоки 7, 10).

Перед запуском сбрасываются значения таймера процесса  $\tau_n$  и наибольшее значения напряжения  $U_p$  на нагрузке (блок 11). После запуска

процесса (блок 12) выполняются рабочие циклы обработки (блоки 13, 14-17, 18, 22-28).

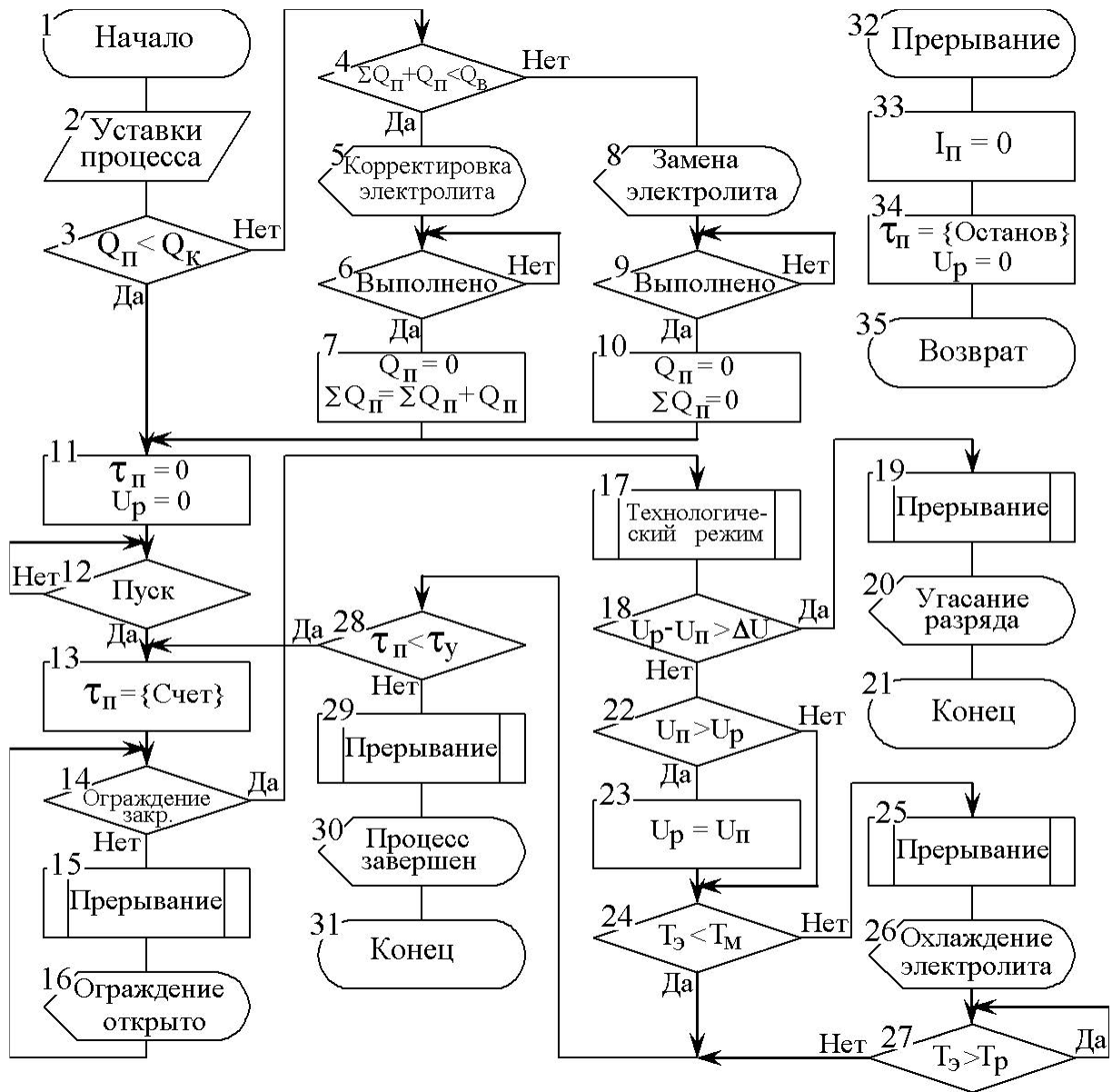


Рисунок 1.11 – Алгоритм автоматизации процесса МДО

Завершение МДО-обработки происходит по истечению времени процесса (блоки 28-31) или при недопустимом уменьшении напряжения на МДО-нагрузке (блоки 18-21). Кроме того, возможны прерывания МДО-процесса с последующим его возобновлением. Эти прерывания возникают при нарушениях целостности защитного ограждения электролитической ванны (блоки 14-16) и/или теплового режима в ней (блоки 24-27).



При любом прерывании или завершении технологического процесса должна выполняться подпрограмма «Прерывание» (блоки 32-35). При этом отключается ТП (блок 33), останавливается таймер процесса и сбрасывается значение  $U_p$  (блок 34).

Алгоритм автоматизации процесса МДО (рисунок 1.11) должен быть реализован в автоматизированной системе управления технологическим процессом. В качестве примера может служить система автоматизации представленная в работе [79], с реализацией данного алгоритма на электронной аппаратуре на базе высокопроизводительного микроконтроллера серии ADuC702x [75].

Системы управления и автоматизации технологического процесса можно существенным образом упростить при использовании унифицированных программируемых логических контроллеров (ПЛК) и программируемых логических реле, таких как Logo (Siemens), Easy (Moeller), Zen v2 (Omron) и т. д. Программирование этих программно-аппаратных устройств осуществляется на языке релейно-контактной логики, на котором можно достаточно просто реализовать алгоритм автоматизации технологического процесса МДО.

#### 1.4. Выводы

1. Технология микродугового оксидирования применяется для модификации поверхности деталей из алюминиевого сплава АМгб. Модифицированные поверхностные слои, сформированные данным методом, улучшают такие свойства поверхности как стойкость к коррозии и износу, служат в качестве диэлектрического покрытия, или могут быть использованный как адгезионный подслои для нанесения клея или ЛКП.

2. Из анализа литературы следует, что характеристики получаемых МДО покрытий определяются электрическим режимом обработки, длительностью процесса, составом электролита. На технологический процесс МДО, также оказывают влияние такие факторы как температура и степень выработки электролита, требующие постоянного мониторинга.

3. Существующие автоматизированные системы управления процессом МДО не предназначены для работы в условиях параллельной обработки. Для улучшения качества получаемых покрытий в условиях параллельной обработки необходимо разработать принципиально новую АСУ

4. На основании проведенного анализа для разрабатываемой автоматизированной системы управления технологическим процессом микродугового оксидирования выбран прототип алгоритма автоматизации технологического процесса МДО (рисунок 1.11).

5. В разрабатываемой автоматизированной системы управления целесообразно совместить функции мониторинга и управления процессом МДО.

## **2. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

### **2.1. Методика и оборудование эксперимента**

Для оценки воспроизводимости 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 АМгб в трех типовых 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.

После каждой МДО-обработки на образцах измеряли свойства сформированных покрытий: толщину, сквозную пористость, напряжения пробоя на постоянном и переменном токах, а для образцов, с временем формовки 60 и 120 мин, и микротвердость.

При указанных выше параметрах режимов обработки на сплаве АМгб формируются коррозионностойкие МДО-покрытия. Наиболее существенной характеристикой для таких покрытий является сквозная пористость, не должна превышать 5% [16,18]. Это значение принято в экспериментальных исследованиях в качестве порога для выбраковки образцов (в экспериментальных

таблицах такие покрытия отмечены цветом). Жестких требований к микротвердости коррозионностойких покрытий, как правило, не предъявляется.

В процессе формирования МДО-покрытий контролировалось напряжение в сети электропитания установки. Интервал колебаний этого напряжения ходе экспериментальных исследований составил 379...397 В (-0,2...+4,5 %), что меньше допустимого по ГОСТ 13109-97.

Результаты измерений, полученные в ходе экспериментальных исследований, подвергались статистической обработке [72, 73]. При этом определяли среднее значение ( $\bar{X}$ ) выборок ( $x_i$ ), отдельно для каждого этапа и всего эксперимента в целом:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.1)$$

где  $n$  – количество выборок данных.

Определяли абсолютные отклонения данных в выборке:

$$\Delta_i = x_i - \bar{X}. \quad (2.2)$$

Определяли модуль отклонения данных для одновременно сформированных образцов:

$$\Delta_{oi} = |x_{2i} - x_{2i-1}|. \quad (2.3)$$

Рассчитывали поправленную дисперсию:

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}. \quad (2.4)$$

Рассчитывали среднеквадратичное отклонение ( $s$ ) и коэффициент вариации ( $\gamma$ , %):

$$s = \sqrt{\delta^2}, \quad (2.5)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{\delta^2}}{\bar{X}} 100\%. \quad (2.6)$$

Предполагая нормальный закон распределения вероятностей случайной величины в выборке данных, определяли предельную погрешность оценки средней величины:

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{t_r S}{\sqrt{n}}, \quad (2.7)$$

где  $t_r$  – квантиль распределения Стьюдента, определяемый по таблицам распределения (доверительная вероятность принята равной 0,95).

Рассчитывали границы доверительного интервала:

$$[\bar{X} - \Delta_{\text{пр}}; \bar{X} + \Delta_{\text{пр}}]. \quad (2.8)$$

В ходе экспериментальных исследований существенное влияние уделялось оценке повторяемости параметров МДО-покрытий, формируемых при одновременной обработке одинаковых образцов. По условиям экспериментальных исследований таких образцов было шесть в каждой формовке МДО-покрытия. Эта оценка проводилась по относительным отклонениям параметров свойств МДО-покрытий:

$$\gamma_0 = \frac{\bar{\Delta}_0 + \Delta_{\text{про}}}{\bar{X}} 100\%, \quad (2.9)$$

$$\bar{\Delta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} \Delta_{oi}}{N_n}, \quad \Delta_{\text{про}} = t_r \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_n} (\Delta_{oi} - \bar{\Delta}_0)^2}{N_n(N_n - 1)}}, \quad (2.10)$$

где  $\bar{\Delta}_0$  – среднее значение модуля отклонения данных для одновременно сформированных образцов;  $\Delta_{\text{про}}$  – предельная погрешность оценки  $\bar{\Delta}_0$ ;  $N_n$  – количество пар одновременно обрабатываемых образцов.

При проведении процесса МДО проводился мониторинг параметров электрического тока, проходящего через обрабатываемую поверхность. Измерялись такие параметры как средние и амплитудные значения тока и напряжения анодной и катодной составляющей. Средние значения электрических параметров определяют процессы электролизного осаждения веществ на обрабатываемой поверхности, а амплитудные значения используются для оценки параметров зажигания МДР [14, 16].

Вместе с этим, в процессе МДО при оценке электроразрядных процессов развития МДР учитывается температура поровых каналов [14, 16], нагрев которых происходит за счет прохождения электрического тока. Энергия, затраченная при этом, зависит от активной мощности ( $P$ , Вт), выделяющейся на МДО нагрузке. При расчете мощности использовались действующие значения тока ( $I$ , А) и напряжения ( $U$ , В) [74]:

$$P = IU \cos \varphi, \quad (2.11)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением, рад.

Емкостью МДО-нагрузки можно пренебречь, так как она оказывает незначительное влияние на развитие МДР, следовательно  $\cos(\varphi) \approx 1$  [16].

При использовании систем мониторинга на основе микропроцессорных систем, данные о токе и напряжении фиксируются в виде мгновенных значений полученных с определенной частотой дискретизации. Требуемые параметры тока и напряжения при этом рассчитывались путем математической обработки массивов накопленных данных [77]. Для решения этой задачи в вычислительном устройстве системы мониторинга реализованы алгоритмы численного интегрирования по методу трапеций [80].

Определение среднего и действующего значения измеряемой величины по методу трапеций выполняется по формулам [14, 16]:

$$X_{\text{cp}} = \frac{1}{n \cdot \Delta\tau_{\text{д}}} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|x_i| + |x_{i+1}|}{2} \Delta\tau_{\text{д}} = \frac{1}{2 \cdot n} \sum_{i=1}^{n-1} (|x_i| + |x_{i+1}|), \quad (2.12)$$

$$X = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2 + x_{i+1}^2)}, \quad (2.13)$$

где  $X_{\text{cp}}$  – среднее значение измеряемой величины;  $X$  – действующее значение измеряемой величины;  $\Delta\tau_{\text{д}} = T/n$  – интервал дискретизации между выборками мгновенных значений измеряемой величины,  $x_i$  –  $i$ -я выборка измеряемой величины,  $n$  – количество выборок мгновенных значений измеряемой величины в ее периоде  $T$  (с).

Амплитудное значение измеряемой величины ( $X_m$ ), определялось как модуль наибольшего мгновенного значения за ее период:

$$X_m = \begin{cases} |X_i| & \text{при } X_m < |X_i|; \\ X_m & \text{при } X_m \geq |X_i| \end{cases} \quad (2.14)$$

При вычислении параметров анодной составляющей в формулы (2.12)-(2.14) следует подставлять положительные мгновенные значения измеряемой величины, а для катодной – отрицательные мгновенные значения.

Следующим важным технологическим параметром, влияющим на качество МДО-покрытий и требующим постоянного мониторинга, является температура электролита. Для исключения снижения качества покрытий, а также ухудшения состояния электролита, его температура не должна превышать 40-50°C [16-18,46,76].

Ванны для электролита, применяемые для проведения МДО, представляют собой емкости из нержавеющей стали оснащенные системами охлаждения и перемешивания электролита. Охлаждение электролита осуществляется непосредственно в ванне за счет покачивания охлаждающей жидкости через рубашку охлаждения ванны. Для повышения однородности и эффективности охлаждения, электролит в ванне во время процесса непрерывно перемешивается, что осуществляется посредством воздушного барботера или механической мешалки [16,18].

Для управления температурой и предотвращения перегрева электролита в работе использовались методы расчета на основе математической модели тепловых процессов в электролитной ванне [77]. Данная модель позволяет управлять температурой за счет установки определенного расход жидкости в рубашке охлаждения ванны в зависимости от мощности электрического тока (2.11) на выходе ТИТ.

Для обеспечения требуемого режима МДО через нагрузку должно проходить определенное количество электричества [78], поэтому вместе с измерением тока через нагрузку необходимо изменить длительность технологического процесса:

$$\Delta T_{\Theta} = \frac{\Delta I_{\Theta}}{I_3 - \Delta I_{\Theta}} T_3, \quad (2.15)$$

где  $\Delta T_{\Theta}$  - поправка уставки времени технологического процесса, с;  $T_3$  - уставка времени технологического процесса, с.



## 2.2. Исследование воспроизводимости свойств МДО-покрытий при параллельной обработке

В экспериментальных исследованиях толщины МДО-покрытий изменялись в диапазоне 6...14 мкм (рисунок 2.1 а) для 15 мин режима, 22...57 мкм для 60 мин режима (рисунок 2.1 б) и 62...80 мкм для 120 мин режима (рисунок 2.1 в). С увеличением продолжительности режима растет толщина покрытия, но этот рост не сопровождается однозначным снижением ее относительного среднеквадратического отклонения. Так при продолжительности режима 15 мин рассматриваемое отклонение составляло 13,8...20 %, 60 мин – 8,5...23,3%, а при 120 мин – 4,8...6,2 %. Следовательно, стабильность толщин формируемых покрытий несколько падает при продлении режима обработки с 15 до 60 мин, а при дальнейшем увеличении продолжительности режима до 120 мин - растет. Это можно объяснить тем, что начиная с 20-40 мин технологического процесса, в покрытии начинает формироваться плотный рабочий слой, состоящий преимущественно из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (корунд), и, к 40-60 мин будет наблюдаться интенсивное уплотнение покрытия [16,18]. Последнее приводит к дополнительным изменениям толщины покрытия. Затем процессы образования слоев в покрытии стабилизируются.

По мере выработки электролита изменяются толщины формируемых в нем МДО-покрытий (рисунок 2.1), так в диапазоне частичной выработки 0-60 % наблюдается повышение этих толщин, а при дальнейшей выработке электролита – уменьшение (рисунок 2.1 в) или стабилизация (рисунок 2.1 б). Повышение толщин, по-видимому, связано с эффектом “проработки” электролита - обогащением веществами, образующимися в результате частичного перехода в электролит веществ обрабатываемого сплава. Снижение или стабилизация толщин покрытий при частичных выработках электролита выше 60% связано со снижением концентрации активных веществ в электролите.

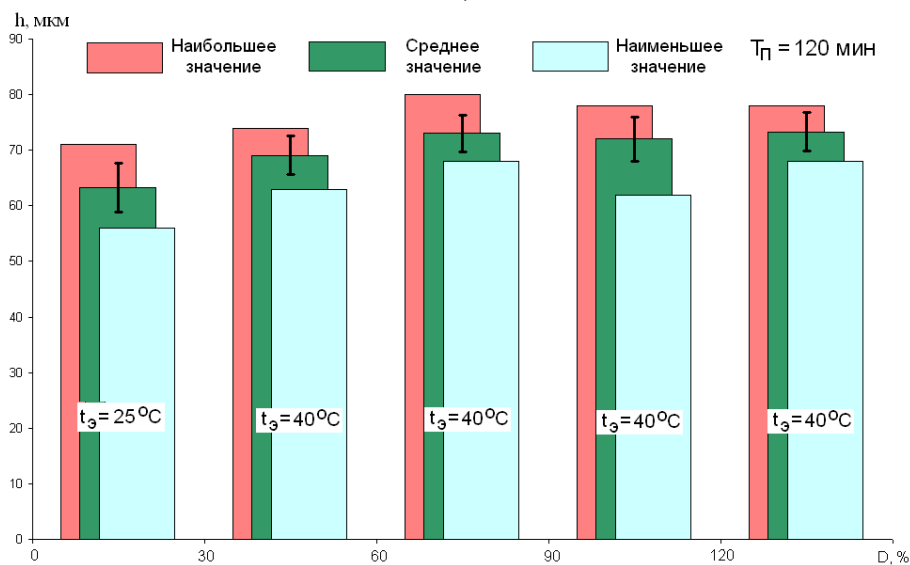
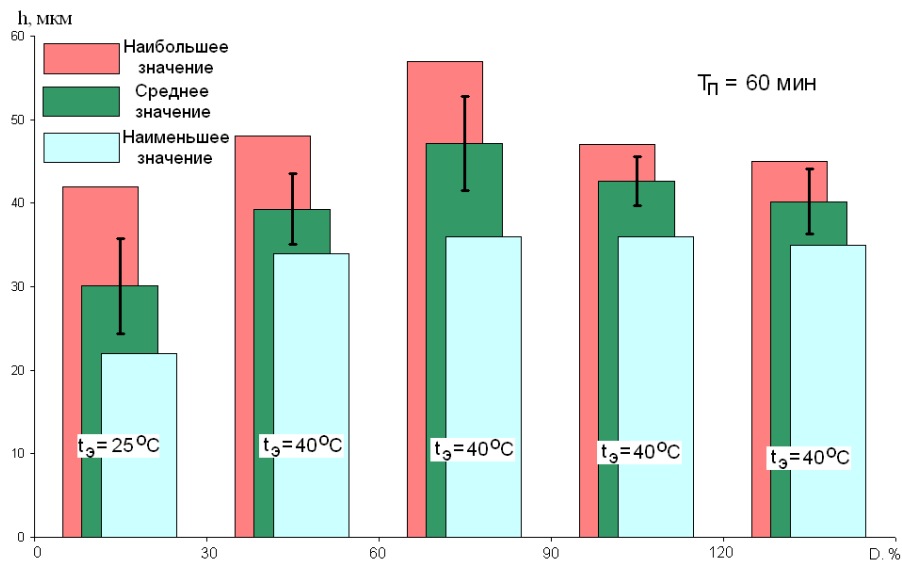
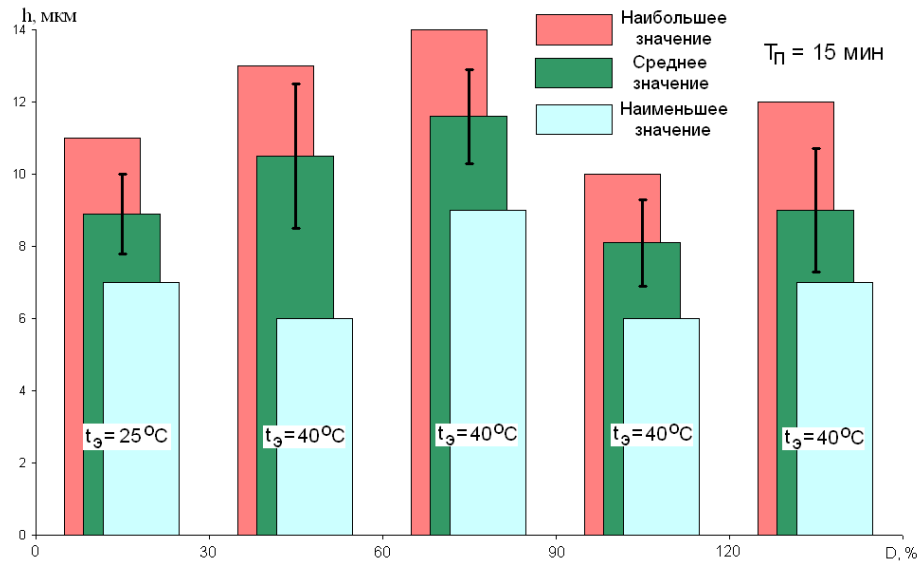


Рисунок 2.1 – Толщина МДО-покрытий, сформированных в течение 15 мин (а), 60 мин (б) и 120 мин (в).

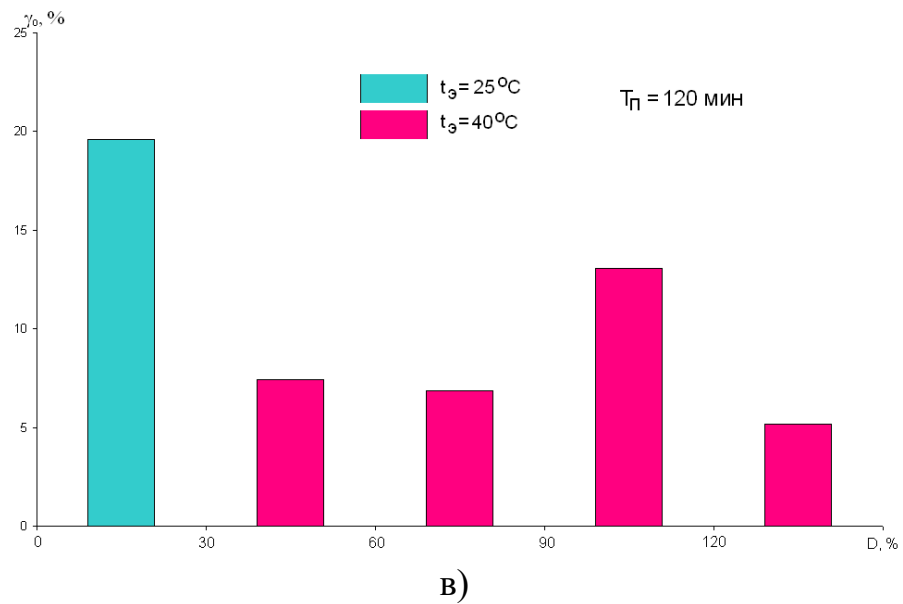
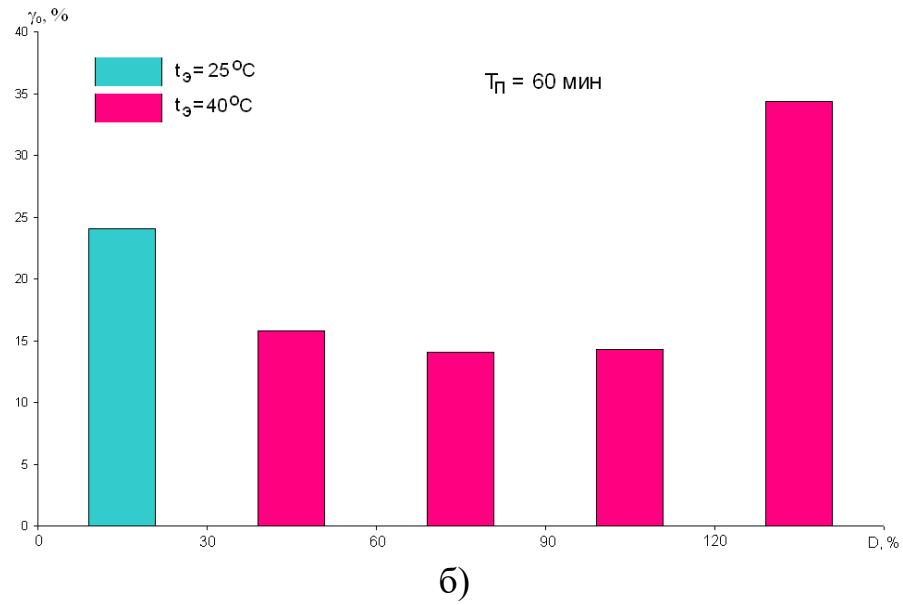
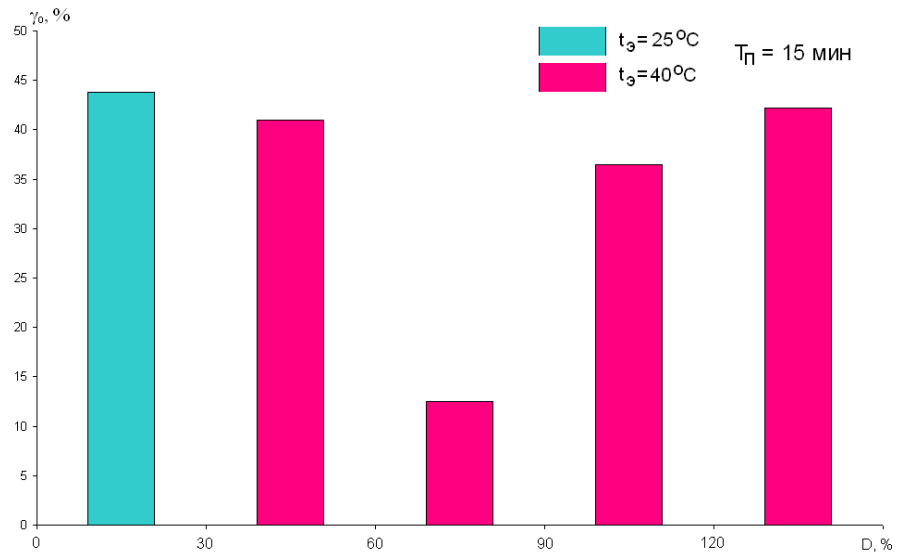


Рисунок 2.2 – Коэффициент вариации толщин одновременно сформированных МДО-покрытий. Продолжительность формовки: 15 мин (а); 60 мин (б); 120 мин (в).

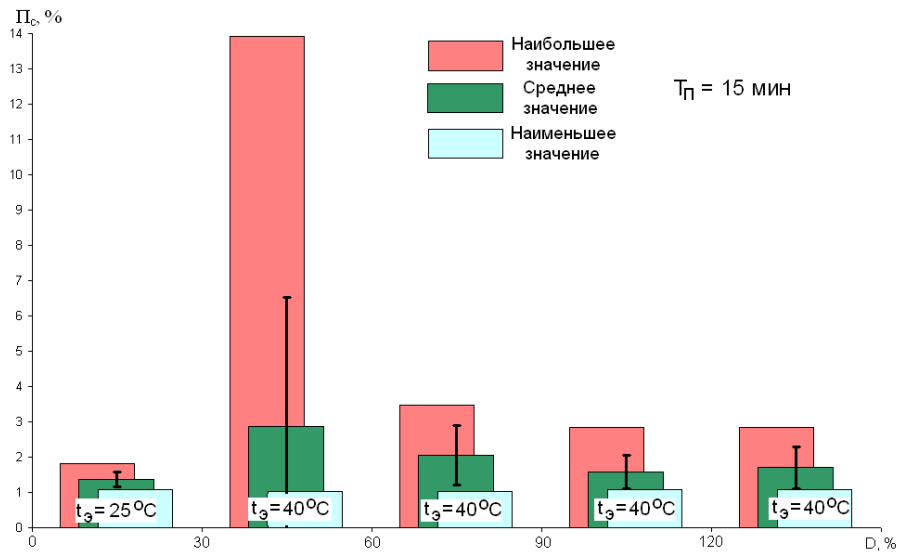
Кроме того, существенно различается толщина покрытий у образцов, обработка которых проводилась одновременно. Коэффициенты вариации толщин покрытий при этом достигают 45% для 15 мин режима (рисунок 2.2 а), 35 % для 60 мин режима (рисунок 2.2 в) и 20 % для 120 мин режима (рисунок 2.2 г).

Фарадеевские процессы образования покрытия определяются количеством электричества [10], прошедшем через обрабатываемую поверхность, следовательно, в исследуемых режимах электрический ток неравномерно распределен между поверхностями параллельно включенных образцов.

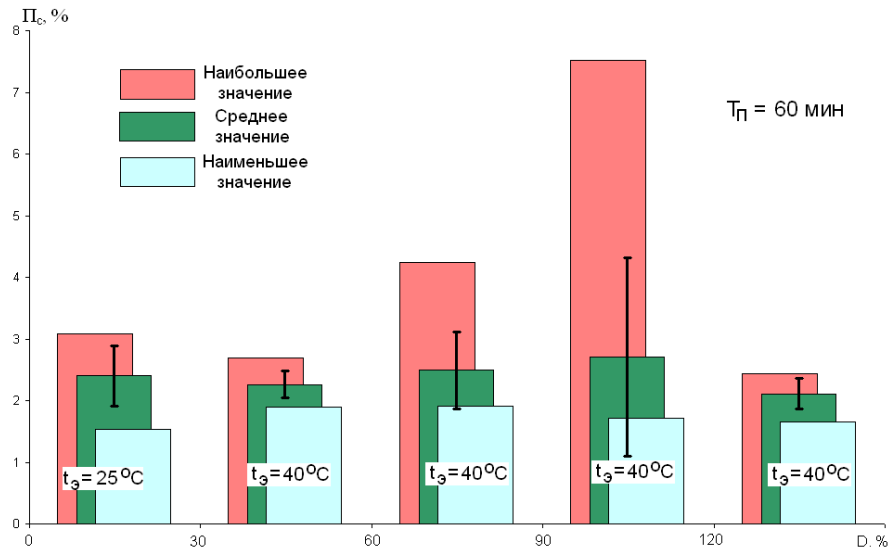
Показатели сквозной пористости покрытий, сформированных в эксперименте, достаточно стабильны. У 109 образцов из 114, то есть в 96 %, этот показатель ниже порогового значения 5 %, принятого для коррозионностойких МДО-покрытий [16,18]. Причем, у трех из пяти дефектных образцов образование высокой сквозной пористости (8-16 %) случайное явление, связанное с дефектами исходной поверхности образцов. Так как у образцов, параллельно обрабатываемых с дефектными, сквозная пористость не превышает 2,5 %. У оставшихся двух дефектных образцов сквозная пористость не значительно превышает 5 % (5,18...5,87 %).

В целом, для 96 обработанных образцов показатели сквозной пористости находятся в диапазоне 1...4,5 % (рисунок 2.3), что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к МДО-покрытиям.

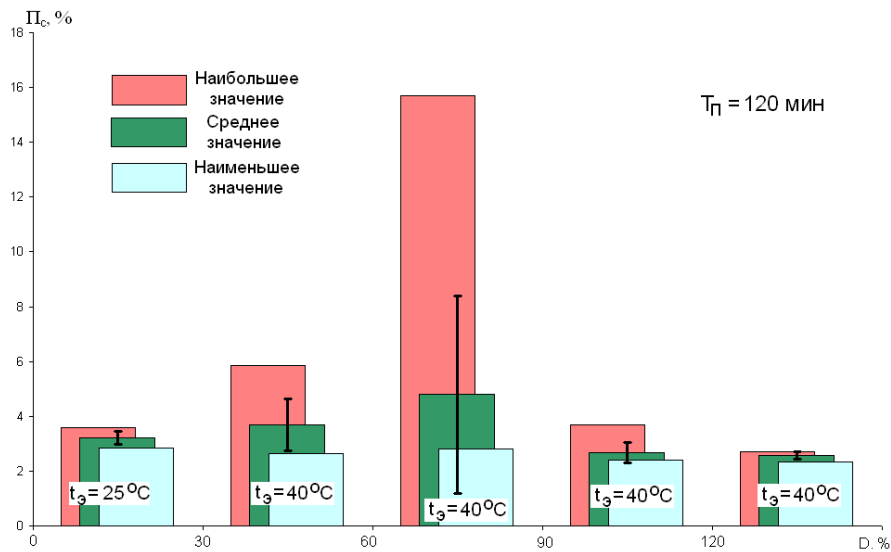
Вместе с тем, результаты эксперимента показывают существенные значения коэффициента вариации сквозной пористости покрытий (рисунок 2.4). Эти значения достигают 120 % в 15 мин режиме обработки (рисунок 2.4 а), 80 % в 60 мин режиме (рисунок 2.4 б) и 50 % в 120 мин режиме (рисунок 2.4 в). Уменьшение коэффициентов вариации сквозной пористости при увеличении продолжительности режима обработки образцов связано с повышением средних значений их сквозной пористости.



а)

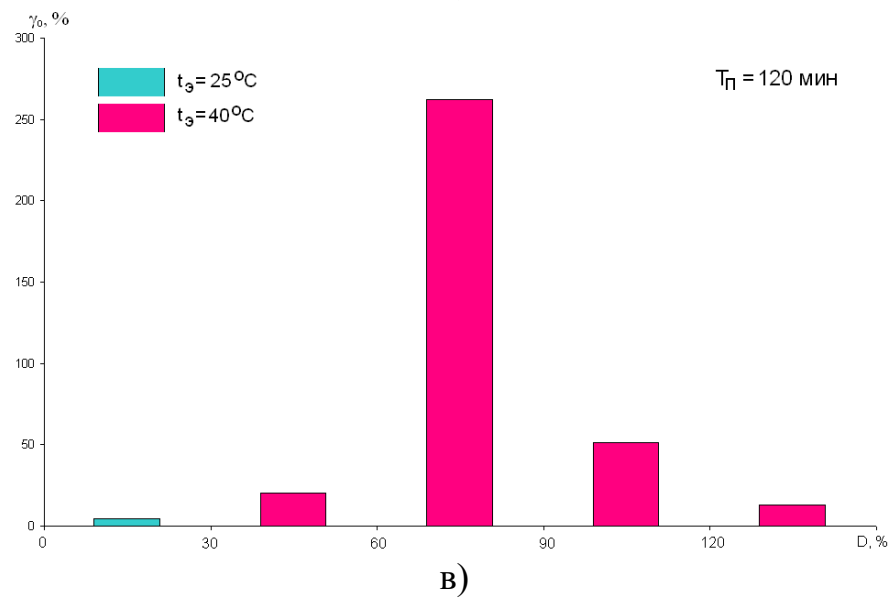
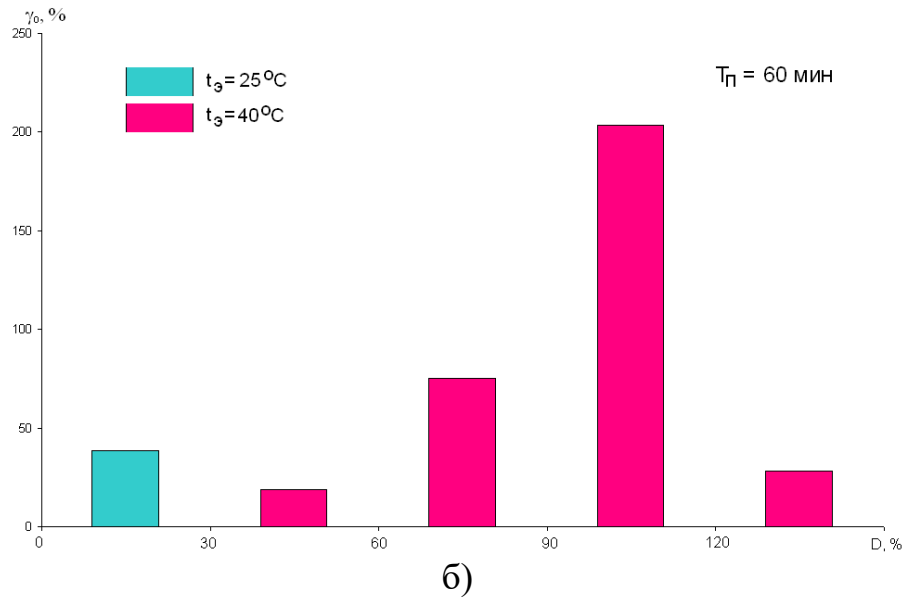
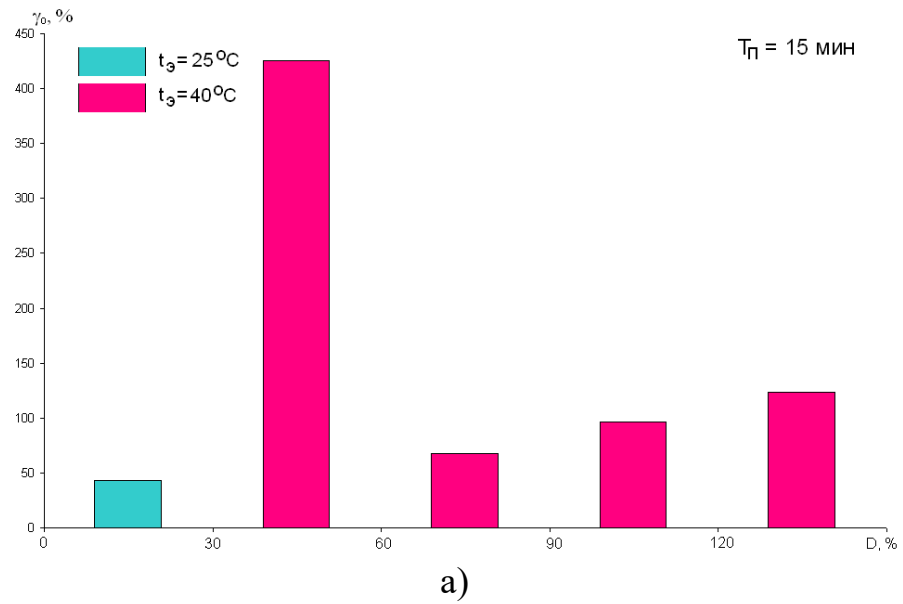


б)



в)

Рисунок 2.3 – Сквозная пористость МДО-покрытий, сформированных в течение 15 мин (а), 60 мин (б) и 120 мин (в).



**Рисунок 2.4 – Коэффициенты вариации сквозной пористости одновременно сформированных МДО-покрытий. Продолжительность формовки: 15 мин (а); 60 мин (б); 120 мин (в).**

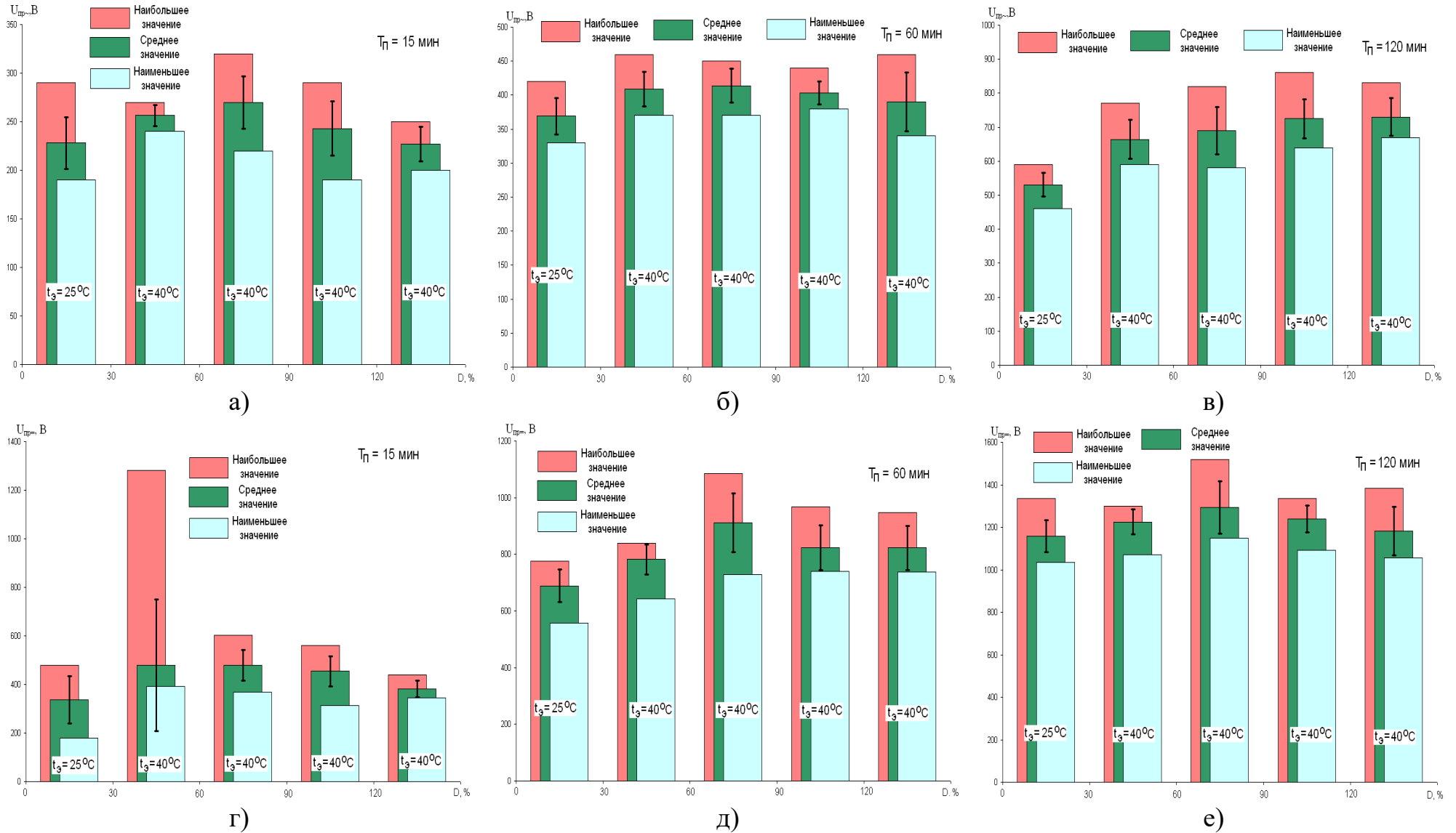
Для электроизоляционных покрытий необходимо обеспечивать их формирование таким образом, чтобы напряжение пробоя покрытия превышало его требуемое пороговое значение в любой точке рабочей поверхности покрытия. Электрическая прочность покрытия позволяет оценить свойства покрытия, как диэлектрика. В экспериментальных исследованиях определяли электроизоляционные свойства покрытий в статическом (постоянный ток) и динамическом (переменный ток) режимах пробоя.

В ходе экспериментальных исследований получены покрытия с напряжением пробоя на переменном (постоянном) токе не менее 190...240 В в 15 мин режиме (рисунок 2.5 а), 330...380 В в 60 мин режиме (рисунок 2.5 б) и 460...670 В в 120 мин режиме (рисунок 2.5 в). Для постоянного тока эти значения соответственно составляют 178...368 В (рисунок 2.5 г), 558...740 В (рисунок 2.5 д) и 1034...1150 В (рисунок 2.5 е). Следует отметить, что с повышением толщины покрытий относительный разброс рассматриваемых параметров уменьшается, и, их значения стабилизируются (рисунок 2.5).

Значения электрической прочности МДО-покрытий имеют меньший относительный разброс (рисунок 2.6), чем напряжение пробоя исследуемых образцов (рисунок 2.5). Следовательно, на разброс напряжения пробоя диэлектрика существенным образом, влияют изменения толщин сформированных покрытий (рисунок 2.2).

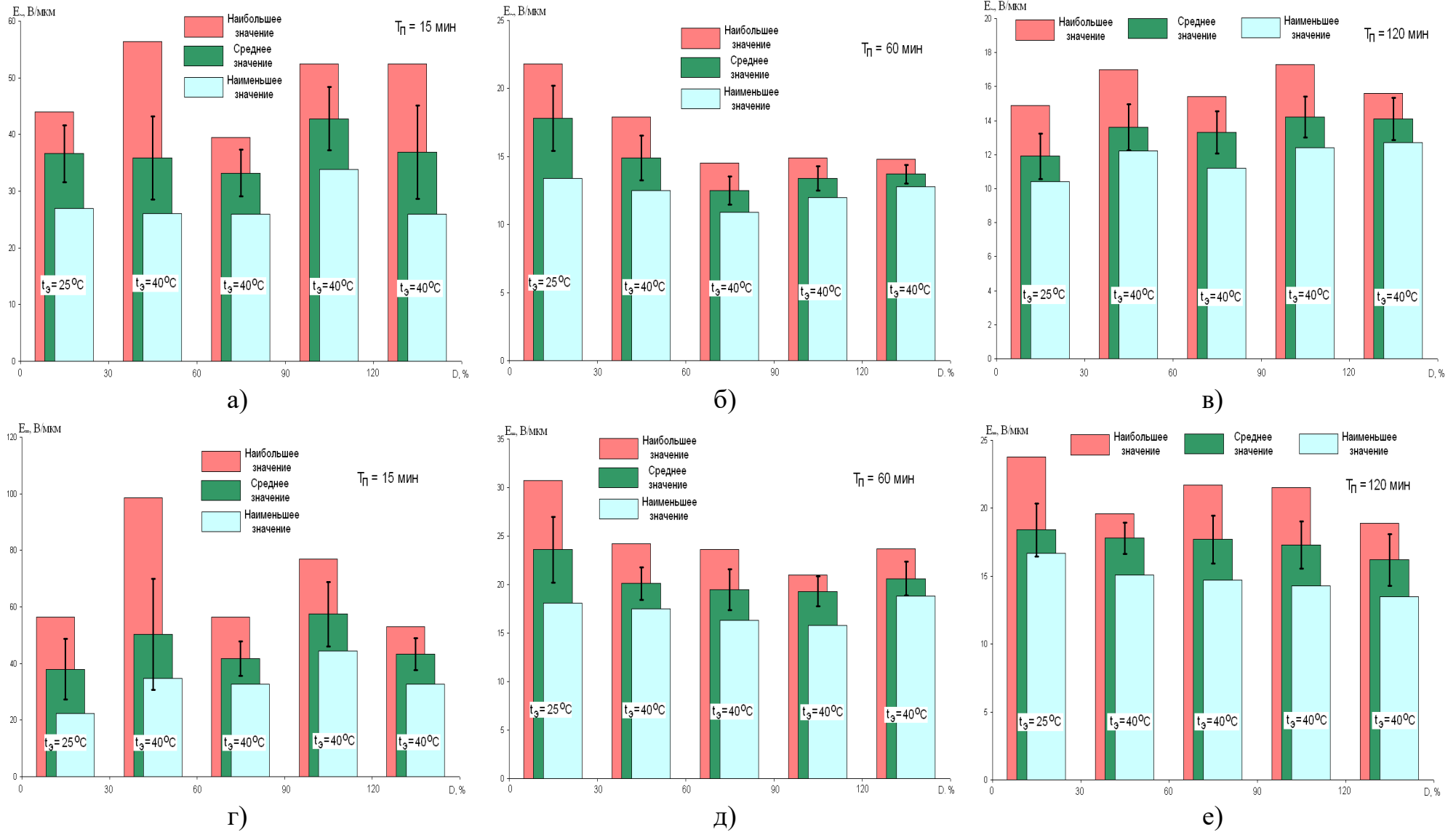
Вместе с тем, коэффициенты вариации электрической прочности у одновременно обрабатываемых образцов (рисунок 2.7) не коррелируют с отклонениями толщины покрытий этих образцов (рисунок 2.3).

Относительные отклонения электрической прочности на переменном токе для одновременно обработанных образцов составляют 30...60 % для 15 мин режима (рисунок 2.7 а), 14...26 % для 60 мин режима (рисунок 2.7 б) и 25...40 % для 120 мин режима (рисунок 2.7 в). Аналогичные показатели электрической прочности на постоянном токе соответственно составляют 25...130 % (рисунок 2.7 г), 12...38 % (рисунок 2.7 д) и 16...32 % (рисунок 2.7 е).

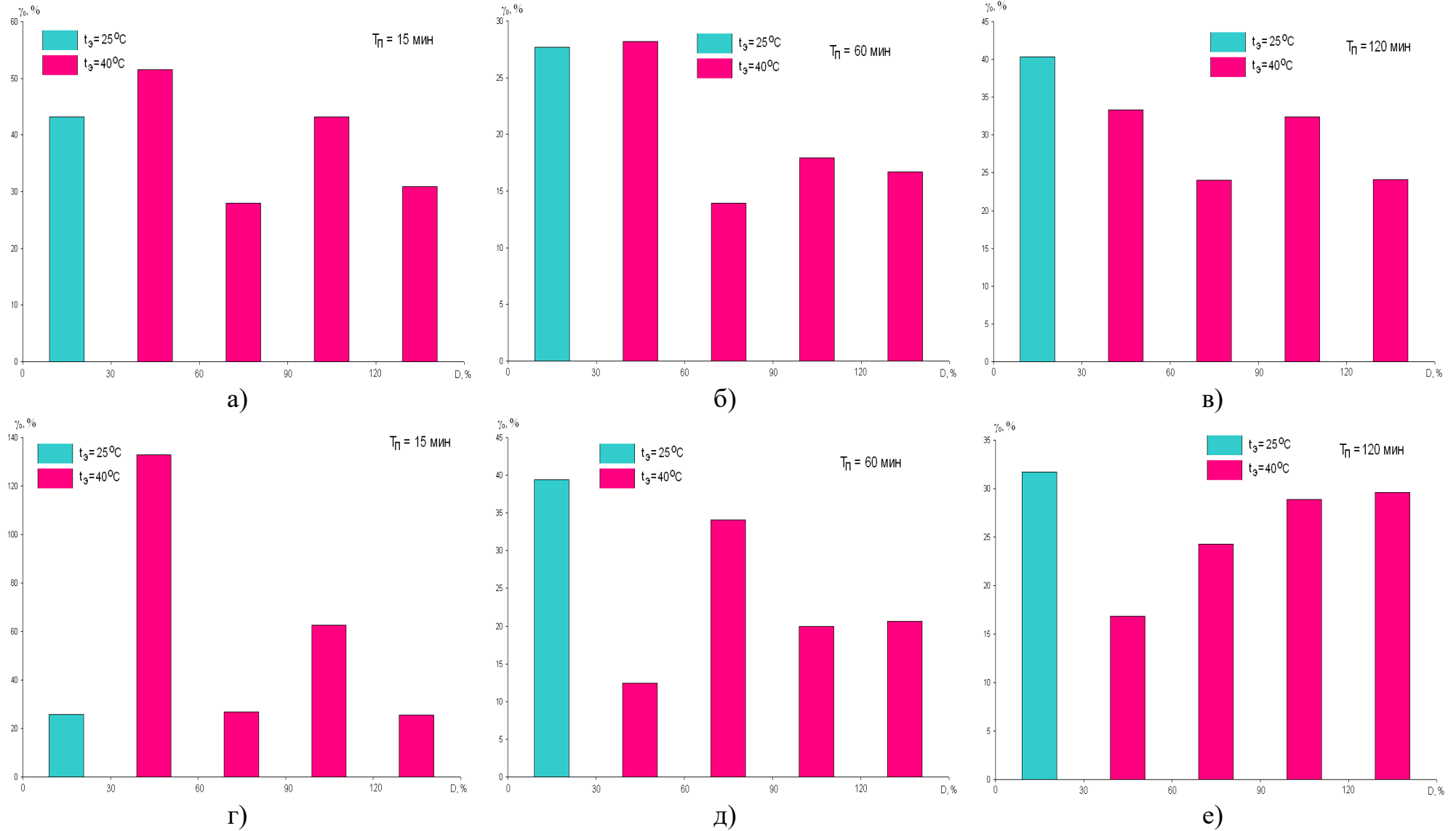


**Рисунок 2.5 – Пробойное напряжение на переменном (а-в) и постоянном (г-е) токах МДО-покрытий, сформированных в течение 15 мин (а, г), 60 мин (б, д) и 120 мин (в, е).**





**Рисунок 2.6 – Электрическая прочность на переменном (а-в) и постоянном (г-е) токах МДО-покрытий, сформированных в течение 15 мин (а, г), 60 мин (б, д) и 120 мин (в, е).**



**Рисунок 2.7 – Коэффициенты вариации электрических прочностей на переменном (а-в) и постоянном (г-е) токах МДО-покрытий, полученных при одновременной формовке в течение: 15 мин (а, г); 60 мин (б, д); 120 мин (в, е).**

В ходе экспериментальных исследований микротвердость измеряли на образцах, формовка которых осуществлялась в 60 и 120 мин режимах. Это связано с тем, что формирование твердого рабочего слоя начинается после 20-40 мин технологического процесса и, следовательно, этот слой при 15 мин обработке полностью отсутствует.

Измеренные значения микротвердости покрытий одновременно обработанных образцов варьируются в широких пределах (рисунок 2.8) от 500 до 2100 кг/мм<sup>2</sup>. Причем, продолжительность режима обработки 60 или 120 мин существенного влияния на микротвердость покрытия не оказывает. Наибольшие значения микротвердости покрытий получены при их формировании в свежее приготовленном электролите (нулевая частичная выработка) при температурах  $25\pm 5^\circ\text{C}$ . С повышением температуры электролита и увлечение его выработки микротвердость, формируемых покрытий, снижается 25...35 %.

Коэффициенты вариации микротвердости покрытий одновременно обработанных образцов составляют 42...65 % для 60 мин режима (рисунок 2.9 а) и 55...125 % для 120 мин режима (рисунок 2.9 б). Увеличение этих отклонений с ростом толщины твердого рабочего слоя, по-видимому, вызвано неравномерным распределением электрического тока между параллельно обрабатываемыми образцами.

На рисунках 2.10 и 2.11 представлены результирующие показатели исследуемых свойств покрытий образцов, сформированных в ходе эксперимента. В итоговых выборках не учитывалось 5 образцов, сквозная пористость которых превысила 5%.

На Рисунок 2.10 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.

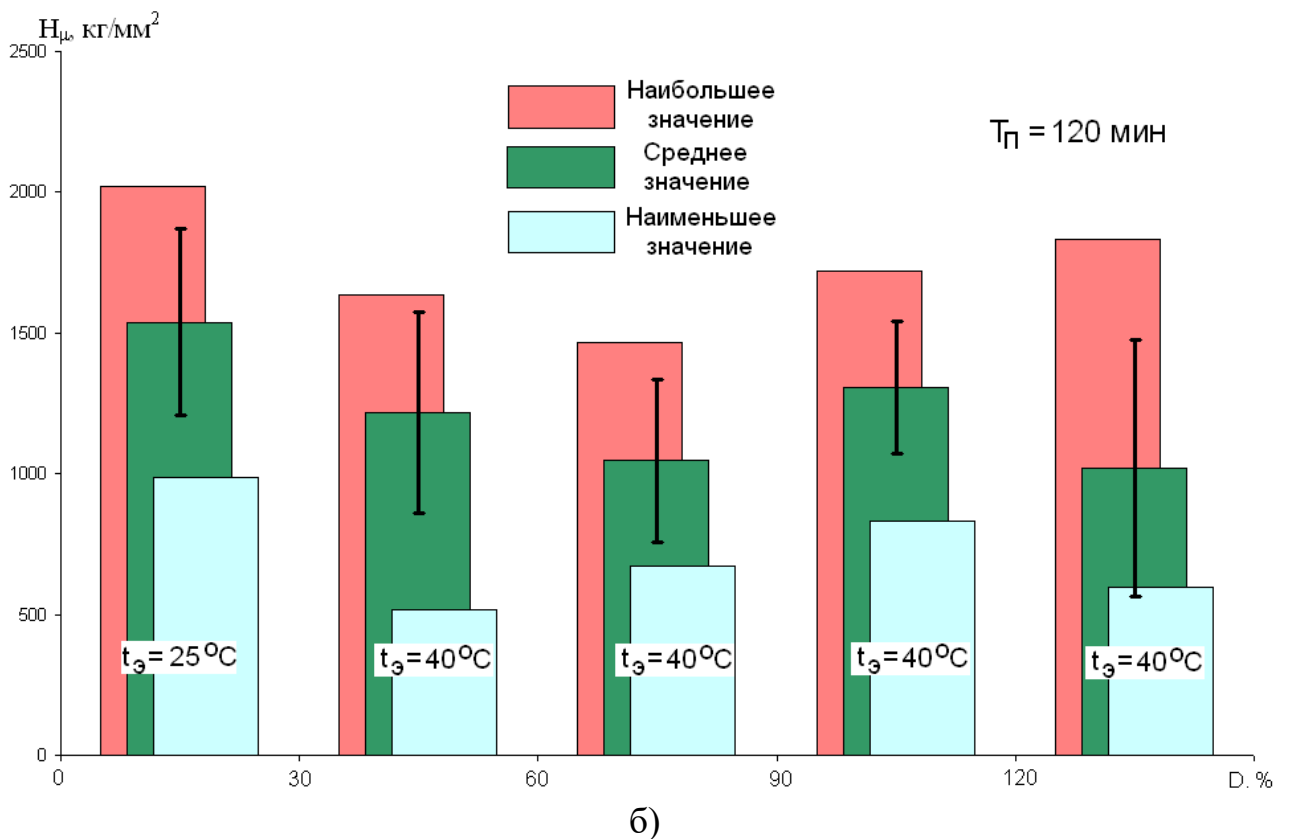
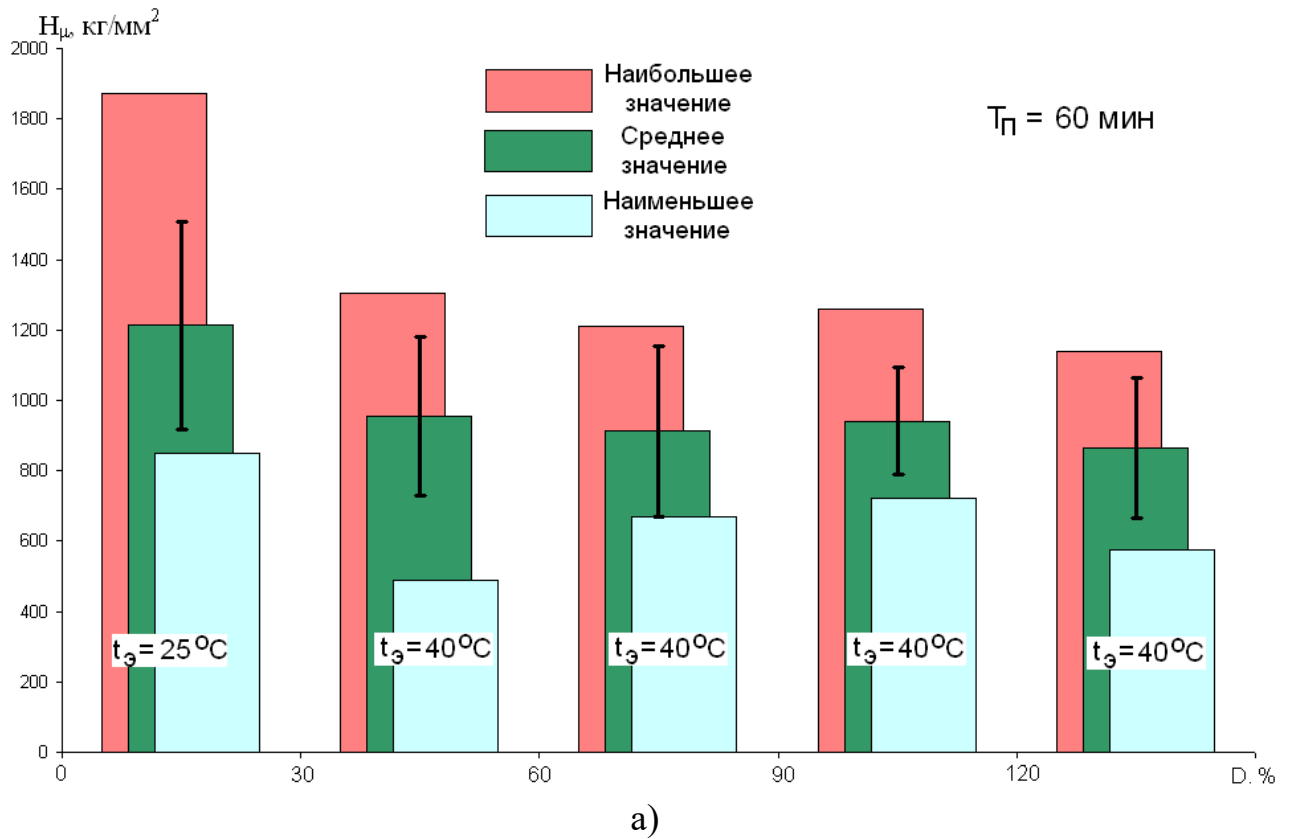
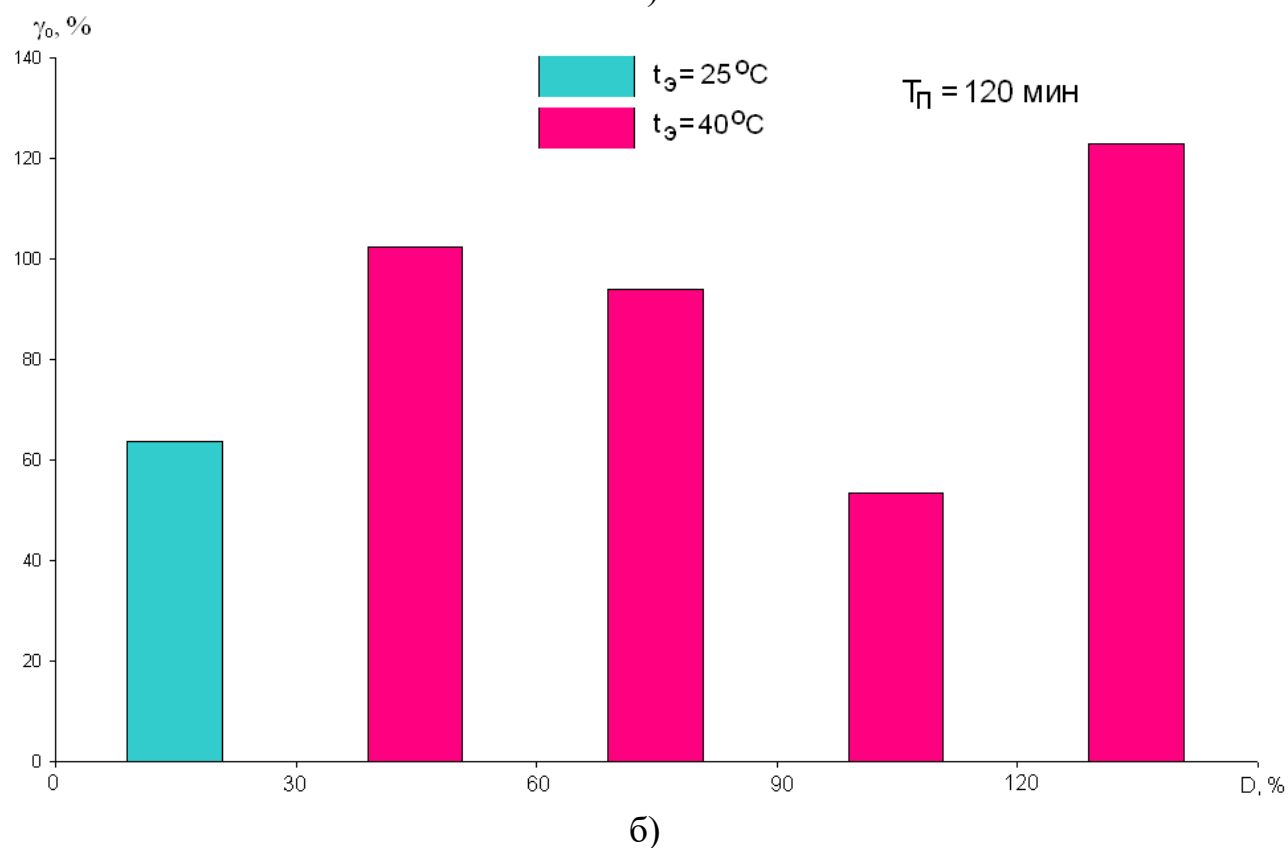
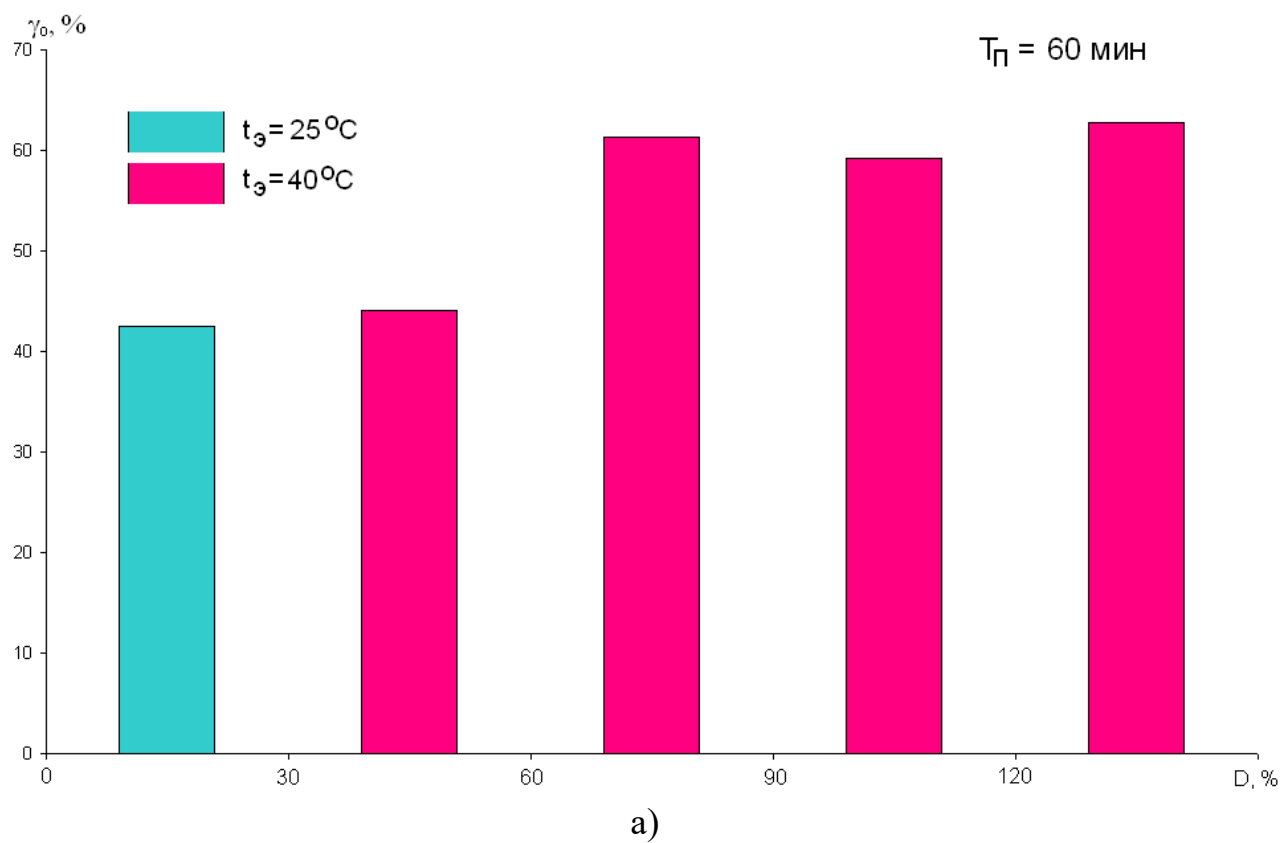
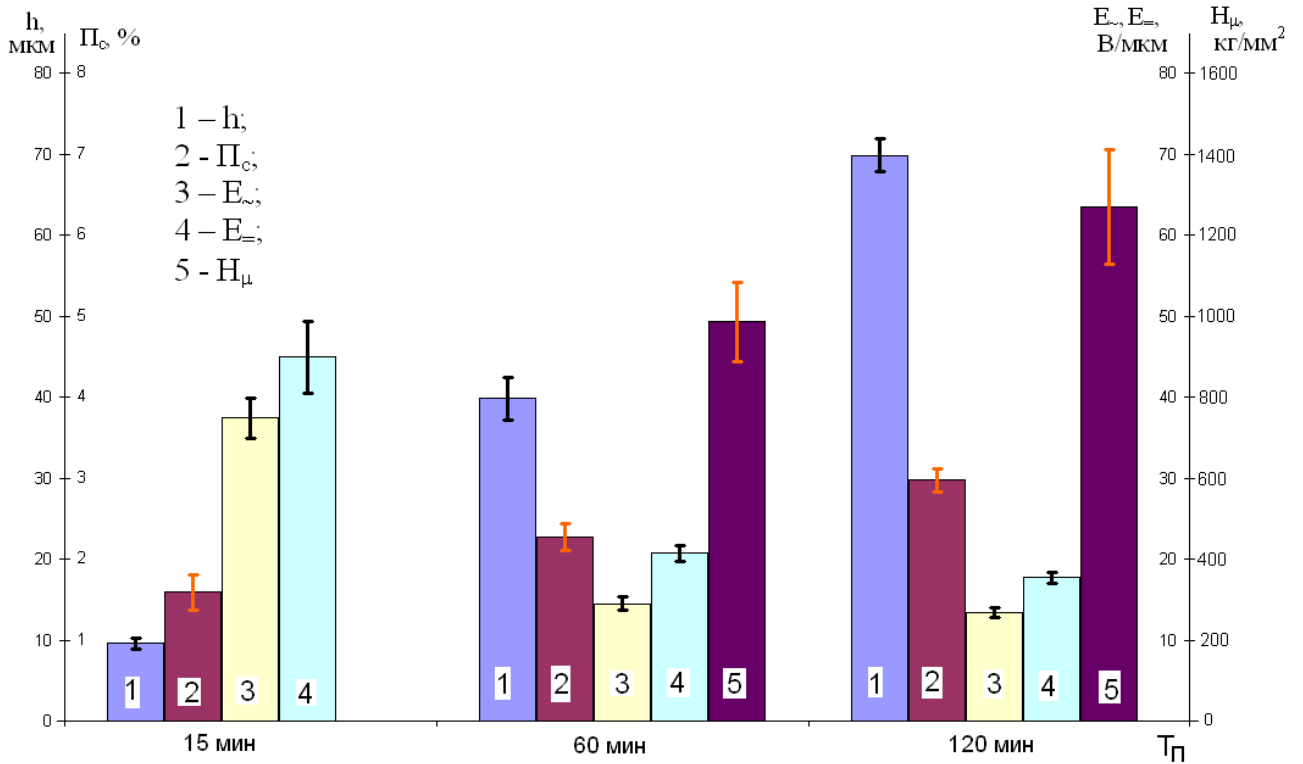


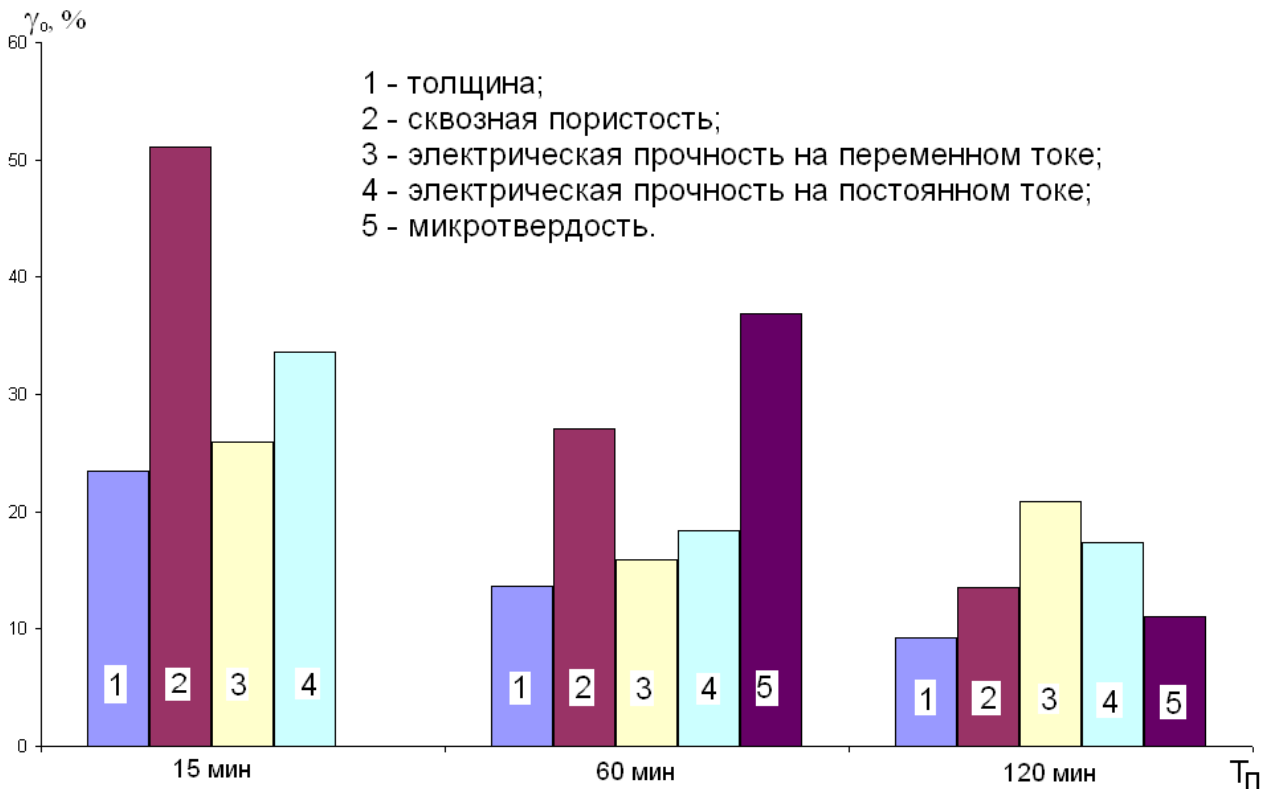
Рисунок 2.8 – Микротвердость МДО-покрытий, полученных при одновременной формовке в течение 60 мин (а) и 120 мин (б).



**Рисунок 2.9 – Коэффициенты вариации микротвердости МДО-покрытий, полученных при одновременной формовке в течение: 60 мин (а); 120 мин (б).**



**Рисунок 2.10 – Усредненные свойства МДО-покрытий, сформированных в исследуемых режимах.**



**Рисунок 2.11 – Коэффициенты вариации усредненных свойств одновременно сформированных МДО-покрытий.**

Это может быть объяснено тем, что состав электролита, используемый в экспериментальных исследованиях широко применяется при формировании коррозионностойких покрытий на широком спектре алюминиевых сплавов.

Вместе с тем, коэффициенты вариации показателей свойств покрытий одновременно обрабатываемых образцов (рисунок 2.11) в 15 и 60 мин режимах достигают существенных значений (выше 25 %), что свидетельствует о неравномерном распределении электрического тока между параллельно обрабатываемыми деталями.

Свойства покрытий, формируемых параллельно в одной электролитной ванне, могут существенно различаться из-за неравномерного распределения электрического тока через обрабатываемые образцы. Коэффициенты вариации толщин при этом могут достигать 25 %, сквозной пористости в 50 %, а микротвердости – 40%.

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

### 2.3. Физико-математическая модель процесса параллельной МДО-обработки

МДО относится к электрохимическим процессам, в которых, согласно закону Фарадея, масса вещества образующегося на электроде пропорциональна количеству электричества прошедшего через этот электрод [78]:

$$m = k \cdot Q_{эл} = k \int_0^{t_n} I dt, \quad (2.16)$$

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 деталей следует выяснить распределение электрического тока между отдельными деталями. Учитывая, что одновременно обрабатываемые детали электрически подключены параллельно, то между каждой деталью и ванной прикладывается одинаковое напряжение  $U$  (рисунок 2.12).

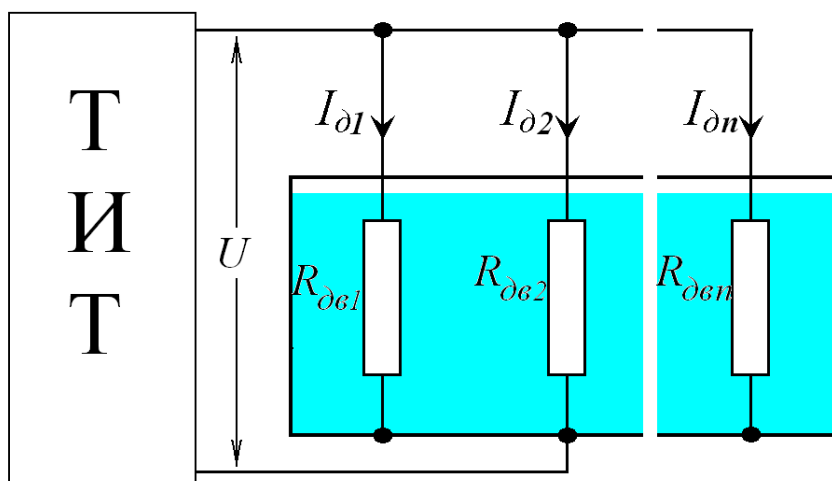


Рисунок 2.12 – Параллельная МДО-обработка деталей.

Согласно закону Ома [80] распределение токов между параллельно обрабатываемыми деталями:



$$I_{\partial 1} = \frac{U}{R_{\partial e 1}}; \quad I_{\partial 2} = \frac{U}{R_{\partial e 2}}; \quad \dots; \quad I_{\partial n} = \frac{U}{R_{\partial e n}} \quad (2.17)$$

где  $R_{\partial e 1}, R_{\partial e 2}, \dots, R_{\partial e n}$  – сопротивление цепи деталь-электролит-ванна соответственно для первой, второй, ..., n-ой параллельно обрабатываемой детали; Ом.

Большинство ТИТ формируют импульсы тока с частотой следования не выше 50 Гц, поэтому будем учитывать только активные составляющие этих сопротивлений. В цепи деталь-электролит-ванна не учтены поляризационные сопротивления электродов, так как при МДО падение напряжения на электролите существенно превышает поляризационные перенапряжения на границах раздела фаз [16,81]. Поэтому 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):

$$R_{\partial e} = R_d + R_n + R_{эл} + R_v, \quad (2.18)$$

Значения сопротивлений в выражении (2.18) могут быть определены из удельных электрических сопротивлений ( $\rho$ , Ом·м) их материалов [80]:

$$R = \rho \frac{l}{S_c}, \quad (2.19)$$

где  $l$  – длина проводящего слоя, м;  $S_c$  – поперечное сечение проводящего слоя, м<sup>2</sup>.

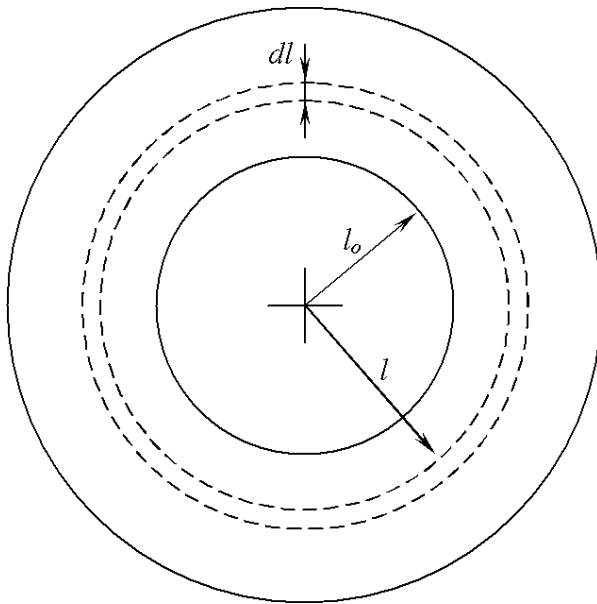
Выражение (2.19) получено для проводящего слоя, имеющего форму параллелепипеда, к торцам которого подключены электрические выводы. При МДО деталь полностью погружена в электролит, что обеспечивает электрический контакт по всей поверхности детали и делает невозможным расчет сопротивлений по формуле (2.19).

Вместе с тем, щелочные электролиты при МДО обладают высокой рассеивающей способностью электрического тока [45], что позволяет при анализе системы металл-электролит-ванна ограничиться рассмотрением сферической модели (рисунок 2.13). Электрическое сопротивление частично полой сферы может быть найдено следующим образом. Разделим сферу на проводящие слои

бесконечно малой толщины  $dl$ . Тогда выражение (2.19) для проводящего слоя принимает вид:

$$dR = \rho \frac{dl}{S_c} \text{ при } dl \rightarrow 0 \quad (2.20)$$

Площадь проводящего слоя в этом случае является площадью поверхности сферы радиуса  $l$  [82]:



**Рисунок 2.13 – К определению электрического сопротивления полый сферы**

$$S_c = 4 \cdot \pi \cdot l^2 \quad (2.21)$$

Подставляя (2.21) в (2.20) получаем однородное дифференциальное уравнение:

$$dR = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l^2} dl \quad (2.22)$$

Интегрируя (2.22) получаем:

$$R = \int \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l^2} dl = -\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l} + C \quad (2.23)$$

Постоянную интегрирования  $C$  определим из граничных условий  $R=R_0$ ,

$$l = l_0:$$

$$R_0 = -\frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l_0} + C,$$

$$C = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l_0} + R_0 \quad (2.24)$$

Подставив (2.24) в (2.23) получаем:

$$R - R_0 = \frac{\rho}{4 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l} \right) = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l_0} \cdot \left( 1 - \frac{l_0}{l} \right) \quad (2.25)$$

Учитывая, что площадь обрабатываемой поверхности существенно меньше площади поверхности электролитной ванны, для сферической модели системы деталь-электролит ванна (рисунок 2.14) справедливы следующие выражения:

$$R_{\partial} = \frac{\rho_{\partial}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\partial}} = \frac{\rho_{\partial}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}}, \quad (2.26)$$

$$R_n \approx \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\partial}^2} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{S_n}, \quad (2.27)$$

$$R_{\text{эл}} = \frac{\rho_{\text{эл}}}{4 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r_{\partial}} - \frac{1}{r_{\text{в}}} \right) = \frac{\rho_{\text{эл}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\partial}} \cdot \left( 1 - \frac{r_{\partial}}{r_{\text{в}}} \right) \approx \frac{\rho_{\text{эл}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\partial}} = \frac{\rho_{\text{эл}}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}}, \quad (2.28)$$

$$R_{\text{в}} \approx \frac{\rho_{\text{в}} \cdot d_{\text{в}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{\text{в}}^2} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot d_{\text{в}}}{S_{\text{в}}}, \quad (2.29)$$

где  $\rho_{\text{д}}$ ,  $\rho_{\text{нк}}$ ,  $\rho_{\text{эл}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – удельные сопротивления металла детали, МДО-покрытия, электролита и металла ванны, Ом·м;  $r_{\text{д}}$ ,  $r_{\text{в}}$  – радиусы детали и внутренней полости ванны, м;  $S_{\text{в}}$  – площадь поверхности внутренней полости ванны;  $S_n$  – площадь поверхности покрытия;  $h_{\text{нк}}$  – толщина МДО-покрытия;  $d_{\text{в}}$  – толщина стенки ванны.

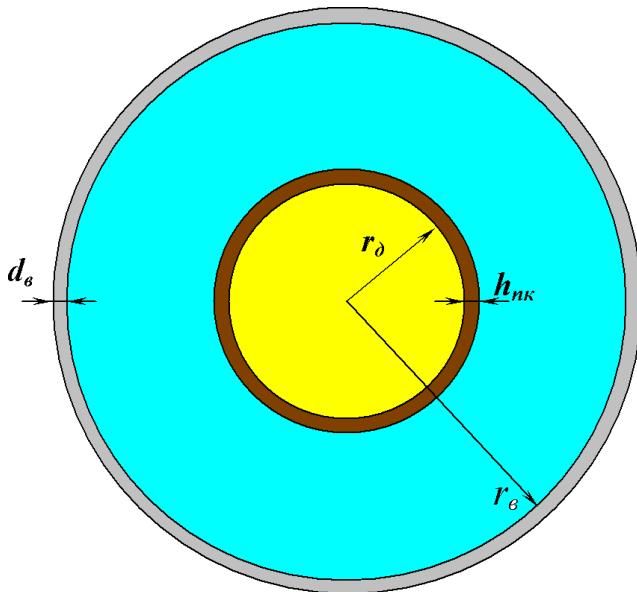


Рисунок 2.14 – Модель системы деталь-электролит-ванна

Сопоставим сопротивление детали и ванны с сопротивлением электролита:

$$\frac{R_{\partial}}{R_{\text{эл}}} = \frac{\rho_{\partial}}{\rho_{\text{эл}}} \quad (2.30)$$

$$\frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{эл}}} = 2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{эл}}} \cdot \frac{d_{\text{в}}}{\sqrt{S_{\text{в}}}} \cdot \sqrt{\frac{S_{\partial}}{S_{\text{в}}}} \quad (2.31)$$

Значения удельных сопротивлений для материалов применяемых при МДО алюминиевого сплава АМГб приведены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1 – Удельные электрические сопротивления материалов, используемых при МДО алюминиевого сплава АМг6 [83]**

| № п/п | Материал            | Применение в МДО   | Удельное сопротивление Ом·м |
|-------|---------------------|--------------------|-----------------------------|
| 1     | Алюминий            | Материал детали    | $2,6...2,9 \cdot 10^{-9}$   |
| 2     | Оксид алюминия      | Основа покрытия    | $5,3...9,4 \cdot 10^{10}$   |
| 3     | Сталь               | Металл ванны       | $1...17 \cdot 10^{-7}$      |
| 4     | Раствор NaOH (10 %) | Основа электролита | $\approx 32 \cdot 10^{-3}$  |

Из (2.30) и (2.31) и таблицы 2.1 можно определить предельные значения сопротивлений  $R_d$  и  $R_b$ :

$$\frac{R_d}{R_b} \leq 6 \cdot 10^{-5}, \quad (2.32)$$

$$\frac{R_e}{R_{эл}} \leq 1,9 \cdot 10^{-4}, \quad (2.33)$$

Можно пренебречь сопротивлениями  $R_d$  и  $R_b$  из-за их незначительного влияния на сопротивление системы деталь-электролит ванна.

Следовательно:

$$R_{ог} = R_n + R_{эл} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{S_n} + \frac{\rho_{эл}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}}, \quad (2.34)$$

Перед началом МДО-процесса сопротивлением  $R_n$  можно пренебречь:

$$R_{ог} \approx \frac{\rho_{эл}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}}, \quad (2.35)$$

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 2.15).

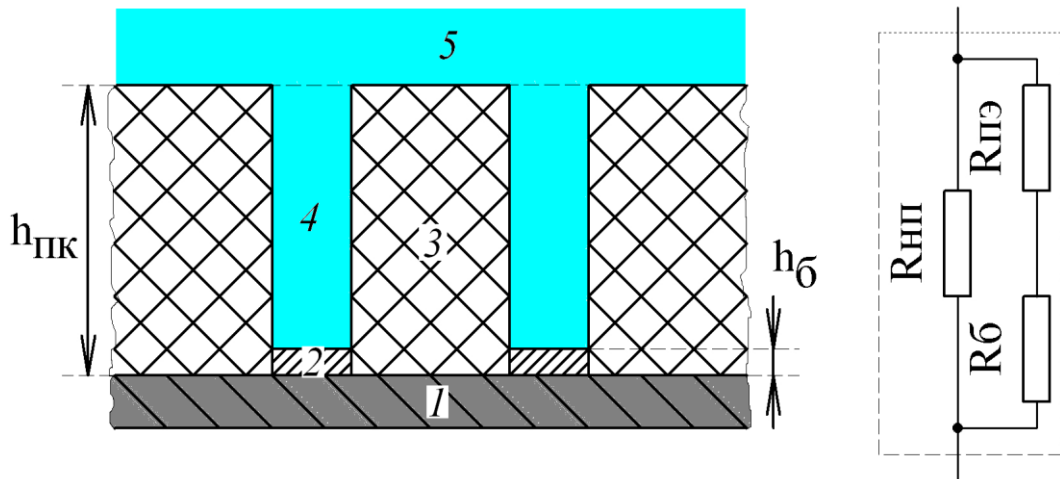


Рисунок 2.15 – Цепь замещения МДО-покрытия: 1 – обрабатываемый сплав, 2 – барьерный слой, 3 – наружный пористый слой, 4 – столб электролита в поре, 5 – электролит снаружи покрытия,  $R_{нп}$  – сопротивление наружного пористого слоя,  $R_{б}$  – сопротивление барьерного слоя,  $R_{пэ}$  – сопротивление электролита в порах.

С учетом этого  $R_{п}$  можно представить в виде цепи замещения (рисунок 2.15). Поверхность покрытия, образованного относительно толстым наружным пористым слоем в рассматриваемой цепи представлена сопротивлением наружного пористого слоя  $R_{нп}$  (Ом):

$$R_{нп} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{S_{нп}} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{S_n - S_{он}}, \quad (2.36)$$

где  $S_{нп}$  – площадь обрабатываемой поверхности, образованная наружным пористым слоем,  $m^2$ ;  $S_{он}$  – суммарная площадь открытых пор на обрабатываемой поверхности,  $m^2$ .

Учитывая коэффициент сквозной пористости  $K_{п}$ :

$$K_n = \frac{S_{он}}{S_n} \quad (2.37)$$

Получаем:

$$R_{нп} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{нк}}{(1 - K_n) \cdot S_n}, \quad (2.38)$$

Процессы, протекающие в порах покрытия, представлены в цепи замещения (рисунок 2.15) двумя последовательно включенными

сопротивлениями - сопротивлением барьерного слоя на дне пор  $R_{\bar{o}}$  (Ом) и сопротивлением столба электролита в порах  $R_{пэ}$  (Ом):

$$R_{\bar{o}} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{\bar{o}}}{K_n \cdot S_n} \quad (2.39)$$

$$R_{пэ} = \frac{\rho_{эл} \cdot (h_{нк} - h_{\bar{o}})}{K_n \cdot S_n}, \quad (2.40)$$

где  $h_{\bar{o}}$  – толщина барьерного слоя, м.

Сопоставим эти сопротивления для данных приведенных в таблице 2.1, толщине барьерного слоя 150 нм и толщине покрытия 400 мкм [18]:

$$\frac{R_{\bar{o}}}{R_{пэ}} = \frac{\rho_{нк}}{\rho_{эл}} \cdot \frac{1}{\frac{h_{нк}}{h_{\bar{o}}} - 1} \quad (2.41)$$

$$\frac{R_{\bar{o}}}{R_{пэ}} \geq 2 \cdot 10^{10}$$

Таким образом, сопротивлением столба электролита в порах можно пренебречь. Следовательно, сопротивление покрытия определяется выражением:

$$R_n = (R_{пн}^{-1} + R_{\bar{o}}^{-1})^{-1}, \quad (2.42)$$

Сопоставим сопротивления наружного пористого и барьерного слоев:

$$\frac{R_{пн}}{R_{\bar{o}}} = \frac{h_{нк}}{h_{\bar{o}}} \cdot \frac{1}{K_n^{-1} - 1}, \quad (2.43)$$

Для типовой сквозной пористости МДО-покрытий 0,05 [18] и толщине МДО покрытия 30 мкм:

$$\frac{R_{пн}}{R_{\bar{o}}} \geq 10$$

Следовательно, если при расчете сопротивления покрытия не учитывать  $R_{пн}$  то это приведет к допустимой 10% погрешности в расчетах. В этом случае сопротивление покрытия определяется выражением (2.39), а выражение (2.34) принимает вид:

$$R_{об} = R_n + R_{эл} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{\delta}}{K_n \cdot S_n} + \frac{\rho_{эл}}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_n}} \quad (2.44)$$

Сопоставим сопротивления  $R_n$  и  $R_{эл}$  на стадии существования МДР:

$$\frac{R_n}{R_{эл}} = 2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{\rho_{нк}}{\rho_{эл}} \cdot \frac{h_{\delta}}{K_n \cdot \sqrt{S_n}} \quad (2.45)$$

Для наибольшей обрабатываемой при МДО площади детали 10 дм<sup>2</sup>:

$$\frac{R_n}{R_{эл}} \geq 5,5 \cdot 10^6$$

Следовательно, на стадиях существования МДР сопротивление деталь-ванны определяется выражением:

$$R_{об} = \frac{\rho_{нк} \cdot h_{\delta}}{K_n \cdot S_n} \quad (2.46)$$

Используем полученную модель для обоснования способа определения тока обработки для деталей сложной формы.

При МДО деталей сложной формы и пористых материалов не всегда возможно определить площадь обрабатываемой поверхности с достаточной точностью. В этом случае необходимо определить требуемый для технологического режима электрический ток.

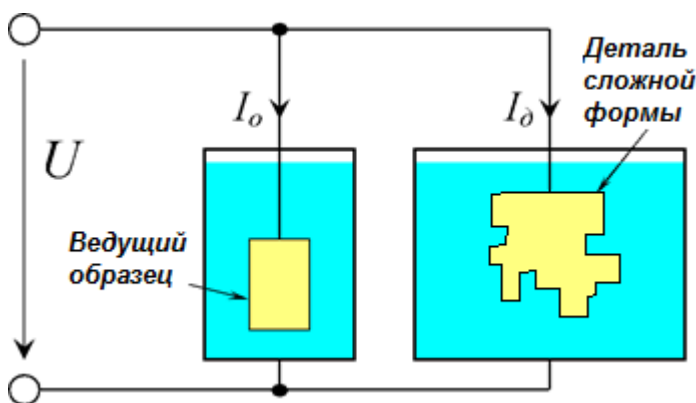


Рисунок 2.16 – Параллельная обработка детали сложной формы и ведущего образца.

Если вместе с обрабатываемой деталью с неизвестной площадью подключить образец из одинакового с деталью материала и известной площадью, поместить его в ванну с аналогичным электролитом, а также обеспечить независимое измерение токов через деталь и образец

(рисунок 2.16), то в этом случае токи через деталь и образец распределяться следующим образом:

$$I_{\partial} = \frac{U}{R_{\partial\partial 1}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot U \cdot \sqrt{S_{n\partial}}}{\rho_{\text{эл}}}, \quad (2.47)$$

$$I_o = \frac{U}{R_{\partial\partial 2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot U \cdot \sqrt{S_{no}}}{\rho_{\text{эл}}}, \quad (2.48)$$

где  $S_{\text{пд}}$  – площадь поверхности детали,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{по}}$  – площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ .

Отношение токов через деталь и образец:

$$\frac{I_{\partial}}{I_o} = \sqrt{\frac{S_{n\partial}}{S_{no}}} \quad (2.49)$$

Площадь детали можно определить из (2.38):

$$S_{n\partial} = S_{no} \cdot \left( \frac{I_{\partial}}{I_o} \right)^2 \quad (2.50)$$

Таким образом, если известно распределение токов между образцом и деталью, а так же площадь образца, то по формуле (2.50) можно рассчитать неизвестную площадь детали.

При параллельной обработке деталей (рисунок 2.13) на их поверхностях выделяется согласно закону Фарадея (2.16) вещество покрытия:

$$m_{\partial 1} = k \int_0^{t_{\text{п}}} I_{\partial 1} dt; \quad \dots; \quad m_{\partial i} = k \int_0^{t_{\text{п}}} I_{\partial} dt; \quad \dots; \quad m_{\partial n} = k \int_0^{t_{\text{п}}} I_{\partial n} dt, \quad (2.51)$$

где  $m_{\partial 1}$ ,  $m_{\partial i}$ ,  $m_{\partial n}$  – масса вещества покрытия, выделившееся, соответственно на поверхности первой,  $i$ -ой,  $n$ -ой параллельно обрабатываемой детали; Ом.

Для стадии существования МДР подстановкой (2.46) и (2.17) в (2.51) получаем:

$$m_{\partial i} = k \int_0^{t_{\text{п}}} \frac{U}{R_{\partial\partial i}} dt = k \int_0^{t_{\text{п}}} \frac{U \cdot K_{ni} \cdot S_{mi}}{\rho_{\text{нк}} \cdot h_{\partial}} dt, \quad (2.52)$$

где  $i$  – номер детали.

В выражении (2.52) для параллельно обрабатываемых деталей значения величин  $U$ ,  $\rho_{\text{нк}}$ ,  $h_{\partial}$  одинаковы для всех деталей и не влияют на отклонения



формируемых толщин покрытий на этих деталях. Площади обрабатываемых поверхностей деталей в МДО процессе также не изменяются, что также позволяет исключить их из влияния на отклонения толщин покрытий.

Вместе с тем, коэффициент открытой 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 не одинаковом количестве прошедшего через них электричества. Следовательно, необходимо предусмотреть в автоматизированной системе управления технологическим процессом выравнивание количества электричества, прошедшего через поверхности деталей.

## 2.4. Выводы

1. Свойства покрытий, формируемых параллельно в одной электролитной ванне, могут существенно различаться из-за неравномерного распределения электрического тока через поверхности обрабатываемых образцов. Коэффициенты вариации толщин при этом могут достигать 25 %, сквозной пористости в 50 %, а микротвердости – 40 %.
2. Увеличение выработки электролита приводит к росту коэффициентов вариации свойств МДО-покрытий.
3. Предложена физико-математическая модель процесса параллельной обработки, позволяющая рассчитать электрическое сопротивление системы деталь-покрытие-электролит-ванна на стадиях анодирования и существования разрядов МДО.

### **3. АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ МДО-ОБРАБОТКИ**

#### **3.1. Функциональная схема автоматизированной системы управления**

Для реализации автоматизированного процесса микродугового оксидирования для параллельной обработки деталей была разработана автоматизированная система управления (АСУ), включающая интегрированные устройства параллельной обработки деталей (УПО).

Функциональная схема АСУ представлена на рисунке 3.1. В этой системе функции управления распределены между центральным компьютером А9 и системами управления технологическим оборудованием ТИТ А1.

Общие функции мониторинга и управления ТП обеспечиваются с помощью компьютера А9 модуля мониторинга и управления. Этот компьютер с помощью сетевого интерфейса А5 интегрирован в информационную сеть АСУ А13. К этой же сети через соответствующие сетевые интерфейсы (А2, А6, А12) подключены системы управления технологического оборудования. Доступ к технологическому оборудованию организован по одноуровневой архитектуре "клиент-сервер", причем роль клиента выполняет компьютер А9, а роли серверов - системы управления технологическим оборудованием.

На систему управления ТИТ А1 возлагаются функции измерения и управления электрическими параметрами тока и напряжения на МДО-нагрузке, контроля состояния МДР.

На систему управления УПО А7 возлагаются функции измерения тока и расчета количества электричества через каждую обрабатываемую деталь (Z1-Zn), а также коррекции режима обработки деталей согласно алгоритмам, представленным на рисунке 4.11. Разработанное УПО позволяет обслуживать до 5 деталей в группе, если же требуется обслуживание большего количества деталей, то возможно дополнительное подключение требуемого количества УПО.



На систему управления чиллера А11 возлагаются функции регулирования температуры воды в рубашке охлаждения электролитной ванны. Требуемое значение этой температуры задает компьютер модуля управления и мониторинга А9.

Контроль функционирования вспомогательного оборудования установки МДО осуществляется с помощью датчиков (рисунок 3.1) измерения температуры электролита В2, расхода воздуха в барботере В4 и вытяжной вентиляции В3, а также давления воды В5 в системе охлаждения электролитной ванны. Первичная обработка и оцифровка сигналов датчиков осуществляется в блоке А10 модуля мониторинга. В зависимости от показаний этих датчиков компьютер А9 запрещает (или разрешает) проведение процесса МДО, а также корректирует его ход (раздел 2.3).

Для визуального контроля ТП процесса АСУ оснащена электронной видеокамерой В1, которая подключена к компьютеру А9 по индивидуальному скоростному каналу связи.

В АСУ ТП МДО может быть интегрирована база данных МДО, в состав каждой записи этой базы входят описание технологического режима модификации и применяемого электролита [16,18,79].

Аппаратный интерфейс удаленного доступа А4 модуля мониторинга и управления позволяют организовать обмен информацией с внешними источниками по сети Интернет или корпоративным сетевым каналам.

Наличие каналов связи с внешними источниками обеспечивает интеграцию АСУ ТП МДО в единую систему управления производством продукции, а так же доступ к базе данных научно-консультационных центров и/или проведение в режиме реального времени удаленных консультаций со специалистами этих центров.

### 3.2. Средства управления и мониторинга системы

В модуль управления и мониторинга (рисунок 3.1) входят: компьютер А9, блок обработки сигналов датчиков А10, сетевой интерфейс А5 и интерфейс удаленного доступа А4.

В модуле управления и мониторинга целесообразно использовать промышленные панельный компьютер, так как отличительными особенностями подобных компьютеров являются моноблочное исполнение, наличие емкостного или резистивного сенсорного экрана, защита от IP54 до IP67 по передней панели, либо по всему корпусу, а также небольшая глубина до 110-120 мм.

Исходя из требуемой функциональности и надежности функционирования АСУ ТП был выбран панельный компьютер NEXCOM KPPC 1812. Этот компьютера оснащен 18,5” TFT LCD дисплеем и сенсорной панелью. Компьютер разработан на базе процессора Intel Celeron J19000 2.0 ГГц и имеет один 204-контактный слот для оперативной памяти DDR3L 1333 формата SO-DIMM, с максимально поддерживаемым объемом 8 Гб.

Панельный компьютер KPPC 1812 представляют собой полнофункциональные компьютеры с возможностями расширения своего функционала, включая набор необходимых портов ввода-вывода, один Full size Mini-Card слот (mini-PCIe/USB/3G SIM), один Half-size Mini Card (mini-PCIe/USB) слот и один отсек для 2,5” HDD с установленным жестким диском на 320 Гб. Панель оснащена следующими коммуникационными портами: 4 COM порта (3 RS-232 (RJ50), 1 RS- 232/422/485 (RJ50)), 2 порта USB 2.0 и 2 порта USB 3.0, один параллельный порт, один Gigabit Ethernet порт (RJ45), VGA разъем для подключения второго дисплея и один Cash Drawer порт (RJ11).

Таким образом, в компьютер А9 интегрирован Gigabit Ethernet интерфейс удаленного доступа А4.

Информационную сеть А13 (рисунок 3.1) в АСУ ТП предлагается организовать согласно стандарту ZigBee [86]. Эти беспроводные сети отличаются

высокой надежностью передачи данных, что обусловлено:

- самовосстановление и гарантированной доставкой пакетов данных в случаях обрыва связи между отдельными узлами (появления препятствия), перегрузки или отказа какого-то элемента сети;
- криптографической защитой данных, передаваемых по беспроводным каналам, и гибкой политикой безопасности;
- простотой развертывания и легкой масштабируемостью путем простого присоединения дополнительных устройств.

Связь в сети ZigBee осуществляется путем последовательной ретрансляции пакетов от узла источника до узла адресата. В сети ZigBee предусмотрено несколько альтернативных алгоритмов маршрутизации, выбор которых происходит автоматически.

Стандарт предусматривает возможность использования каналов в нескольких частотных диапазонах. Наибольшая скорость передачи и наилучшая помехоустойчивость достигается в диапазоне от 2,4 до 2,48 ГГц. В этом диапазоне предусмотрено 16 каналов по 5 МГц.

Расстояние между рабочими станциями сети составляет десятки метров внутри помещений и сотни метров на открытом воздухе. За счет ретрансляций покрываемая сетью зона может быть весьма значительной: до нескольких тысяч квадратных метров в помещении. Более того, сеть ZigBee в любой момент может быть расширена добавлением новых элементов или наоборот разбита на несколько зон простым назначением соответствующего числа новых конфигураторов сети. Это бывает полезно для снижения нагрузки и соответственно повышения скорости передачи данных.

Недостатком сети является низкая скорость передачи данных 5...250 кбит/с. Вместе с тем эти скорости удовлетворяют требованиям обмена данными между компьютером А9 и системами управления технологическим оборудованием.

Для организации ZigBee-сети в АСУ ТП (рисунок 3.1) в качестве сетевых интерфейсов А2, А5, А6, А12 использованы модули ETRX357 [87]. ETRX357 содержат встроенное программное обеспечение, реализующее все основные

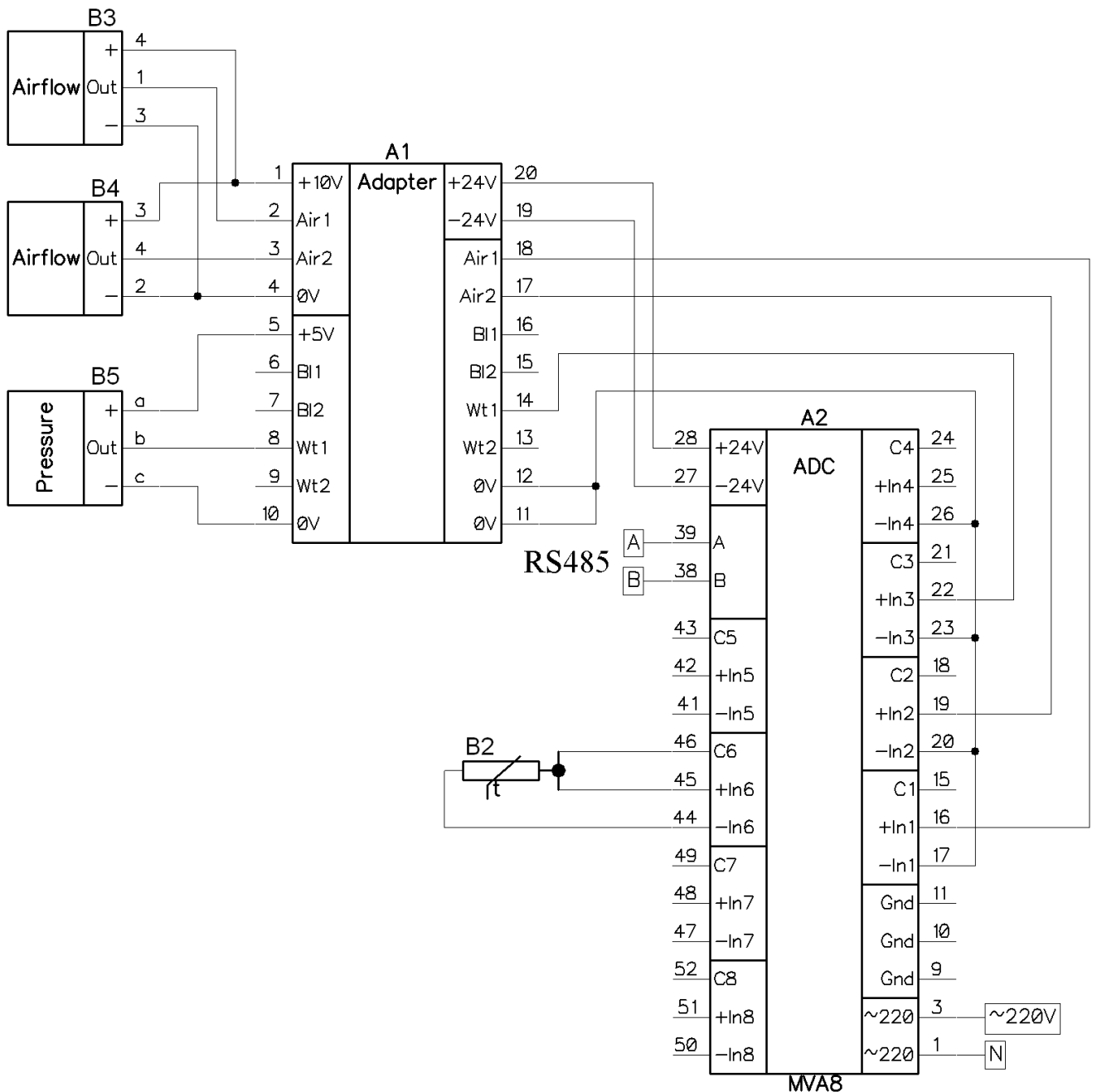
операции в сети ZigBee PRO, такие как образование сети, присоединение к сети, ретрансляция данных и автоматическое восстановление сети. Имеется также возможность управления модулями путем чтения и записи энергонезависимых конфигурационных S-регистров, доступ к которым осуществляется по радиоканалу и по последовательному каналу при помощи AT-команд. Для связи с обслуживаемым устройством модули ETRX357 имеют встроенный интерфейс RS-232.

Медленно меняющиеся параметры МДО-процесса, такие как температура электролита в технологической ванне, расход газа в барботере и вытяжной вентиляции, давление воды в рубашке охлаждения, не требуют высоких скоростей обработки сигналов с датчиков и могут быть оцифрованы при низких частотах дискретизации. Это позволяет производить обработку сигналов с данной группы датчиков с помощью не дорогого модуля аналогового ввода МВА-8 [88].

В блоке обработки сигналов датчиков (рисунок 3.2) к модулю ввода аналоговых сигналов МВА-8 А2 непосредственно подключен датчик температуры В2. Датчики расхода газа в вытяжной вентиляции В3, расхода газа в барботере В4 и давления воды в рубашке охлаждения В5 подключаются к А2 через устройство сопряжения А1, обеспечивающее сопряжение уровней сигналов датчиков с входами МВА-8.

Для передачи обработанных данных в МВА-8 имеется интерфейс последовательного порта RS485. МВА-8 поддерживает сетевой протокол стандарта MODBUS RTU [89]. Этот протокол должен поддерживаться и всеми остальными программно-аппаратными устройствами, подключенными к информационной сети ТИТ (рисунок 3.2).





**Рисунок 3.2. –Принципиальная электрическая схема блока обработки сигналов датчиков.**

В АСУ ТП (рисунок 3.1) используются датчики для измерения тока и напряжения в цепи обрабатываемая деталь – электролитная ванна, температуры электролита, контроля работоспособности барботера, систем вытяжной вентиляции и охлаждения рубашки электролитной ванны.

В качестве датчика тока могут быть использованы измерительный шунт, трансформатор тока и полупроводниковый датчик Холла. Недостатком измерительного шунта является наличие гальванической связи между измеряемой и выходной цепями. Трансформатор тока измеряет исключительно значения

переменного тока, что в дальнейшем затруднит возможность совместного использования конденсаторного ТИТ с блоком смещения выходного тока. Датчик тока на эффекте Холла свободен от указанных недостатков и поэтому был выбран этот тип датчика.

Фирма Honeywell производит широкий ассортимент датчиков тока на эффекте Холла с аналоговым выходом напряжения. Предпочтительной является датчики серии CLSA2, исходя из следующих соображений: высокая чувствительность и широкий диапазон измеряемых токов (1:1000), малые погрешность, температурная нестабильность передаточной характеристики, широкий диапазон изменения напряжения питания и относительно низкая цена [90].

Для измерения напряжения в системе управления ТИТ использован дифференциальный УПТ с входными делителями напряжения и поэтому специальных датчиков не требуется.

Диапазон изменения температуры электролита при МДО-обработке составляет от +5 °С до +50 °С, а допустимая нестабильность температуры электролита может составлять от ±2 °С до ±15 °С [16,18]. В указанном диапазоне температур широко используются медные и платиновые термопреобразователи сопротивления. Эти датчики можно подключать по трехпроводной схеме к входам модуля МВА-8, а алгоритм и параметры обработки результатов измерений этих датчиков обеспечивается непосредственно микроконтроллером модуля МВА-8.

Погрешность измерительных датчиков должна была как минимум в три раза меньше минимально-допустимых отклонений технологических параметров. Следовательно, допустимая погрешность измерения температуры должна удовлетворять условию:

$$\Delta T_{\text{д}} \leq \frac{\Delta T_{\text{ТП}}}{3}, \quad (3.1)$$

$$\Delta T_{\text{д}} \leq \frac{\pm 2}{3} \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta T_{\text{д}} \leq \pm 0,67^\circ\text{C},$$

где  $\Delta T_d$  – допустимая абсолютная погрешность измерения температуры, °С;  
 $\Delta T_{\text{тп}}$  – минимально-допустимые отклонения температуры электролита в ходе технологического процесса, °С.

Таким образом, для измерения температуры электролита может использоваться медный датчик с номинальной статической характеристикой 50М и классом допуска В (абсолютная погрешность при температуре 50 °С не превышает  $\pm 0,43$  °С). По конструктивному исполнению эти датчики можно подключать с помощью кабеля (ДТСХХ4) или коммутационной головки (ДТСХХ5). Для удобства обслуживания и замены датчиков выбран датчик с коммутационной головкой.

Датчики ДТСХХ5 изготавливаются в защитной арматуре, выполненной из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, что обеспечивает коррозионную стойкость датчика в применяемых при МДО электролитах.

Сопротивление электрической изоляции ( $R_{\text{из}}$ ) чувствительного элемента рассматриваемого датчика от его защитной арматуры превышает 500 МОм. Принимая во внимание, что корпус электролитической ванны и, следовательно, защитная арматура закрепленного на этой ванне датчика температуры, находятся относительно заземления ТИТ под фазным напряжением ( $U_{\text{пф}}$ ) сети электропитания ТИТ, должна быть выполнена проверка влияния тока утечки изоляции датчика на процесс измерения температуры. Для этого определено наибольшее значение тока утечки изоляции ( $I_{\text{му}}$ , А) датчика температуры:

$$I_{\text{му}} = \frac{\sqrt{2} \cdot K_{\text{оп}} U_n}{R_{\text{из}}} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ А} \quad (3.2)$$

где  $K_{\text{оп}}=1,05$  - поправочный коэффициент, учитывающий допустимые отклонения напряжение в сети электропитания -10...+5 %.

Далее определено относительное нормируемое отклонение измеренной температуры ( $\delta T_{\text{уд}}$ ) из-за влияния тока утечки изоляции на рабочий ток датчика ( $I_{\text{рд}}$ , для модуля МВА-8 составляет 2,5 мА) :

$$\delta T_{y\partial} = \frac{I_{my}}{I_{p\partial}} \cdot 100\% = 1,32 \cdot 10^{-3} \quad (3.3)$$

Абсолютное отклонение температуры ( $\Delta T_{y\partial}$ , °C), вызванное током утечки изоляции датчика:

$$\Delta T_{y\partial} = T_{нд} \cdot \delta T_{y\partial} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

где  $T_{нд}$  – нормирующая температура датчика, равная верхнему пределу измерения температуры, °C.

Таким образом, общая абсолютная погрешность измерения температуры датчиком не превышает  $\pm 0,63$  °C, что удовлетворяет условию (3.1).

Наиболее удобное крепление на электролитическую ванну обеспечено для датчика с конструктивным исполнением ДТС095. Этот датчик можно закрепить на ванне с помощью стальной пластины, имеющей отверстие с резьбой М20х1,5, и упорной пластины с отверстием диаметром 12 мм.

Чувствительный элемент, расположенный в конце монтажной части датчика, должен находиться в электролите. Учитывая длину этого элемента ( $L_{чэ} = 80$  мм), глубину электролитной ванны ( $h_{в} = 1000$  мм) и возможное заполнение ванны электролитом на треть глубины, получаем диапазон допустимых длин монтажной части датчика ( $L$ , мм):

$$L \leq h_{в} - L_{чэ}, \quad (3.5)$$

$$L \leq 920 \text{ мм}$$

$$L \geq 0,67 \cdot h_{в} + L_{чэ}, \quad (3.6)$$

$$L \geq 750 \text{ мм}$$

Исходя из полученных данных следует выбрать длину монтажной части датчика 800 мм. Согласно с маркировкой датчиков ДТС выбран датчик ДТС095-50М.В3.800 [91].

Далее осуществлен выбор датчика контроля работоспособности системы вытяжной вентиляции. Требуемая производительность этой системы для установок МДО составляет  $Q_{в} = 500$  м<sup>3</sup>/ч [16,18]. При этом скорость движения

воздуха ( $v_B$ , м/с) в воздуховоде сечением  $S_B = 20 \times 20$  см<sup>2</sup> составляет:

$$g_e = \frac{Q_e}{S_e} = 3,5 \text{ м/с} \quad (3.7)$$

Фирма Honeywell выпускает датчики расхода газа работающих в диапазоне 0,1 мл/мин – 200 л/мин. Из них только датчик АWM720P1 способен измерять расход газа выше 20 л/мин [92].

Датчик АWM720P1 имеет воздуховод круглого сечения с внутренним диаметром ( $d$ , м) 20 мм. При равномерном распределении воздушного потока рассчитаем расход воздуха ( $Q_d$ , м<sup>3</sup>/с), проходящего через датчик АWM720P1:

$$Q_d = g_e S_e = \frac{\pi}{4} g_e \cdot d^2 = 66 \text{ л/мин} \quad (3.8)$$

Результат этого расчета подтверждает правильность выбора датчика модели АWM720P1.

Для выбора датчика расхода газа в барботере следует определить давление воздуха [93]:

$$P_6 = 1,2 \cdot \rho_3 g h_3 + P_0 = 1,13 \text{ Бар} \quad (3.9)$$

где  $P_6$  – давление газа в барботере, Па;  $\rho_3$  – плотность электролита, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_3$  – высота столба электролита в ванне, м;  $P_0$  – давление воздуха над электролитом, Па. Учитывая, что электролит при МДО не менее чем на 90% состоит из воды, плотность электролита при расчетах принята равной плотности воды, а высота электролита – равной высоте электролитной ванны.

Определим диапазон возможного расхода воздуха в барботере [93]:

$$Q_6 = K_n S_{пэ} P_6 = 270 \dots 680 \text{ л/мин}, \quad (3.10)$$

где  $Q_6$  – расход воздуха в барботере, л/мин;  $K_n$  – коэффициент интенсивности перемешивания, при слабом - 240...300, среднем – 350...500, интенсивном 450...600;  $S_{пэ}$  – площадь поверхности электролита (без барботажа), м<sup>2</sup>, для рассчитываемой ванны составляет 1 м<sup>2</sup>;  $P_6$  – давление воздуха в барботере, Бар.

Выбираем датчик АWM720P1, но так как наибольший измеряемый расход

воздуха этим датчиком составляет 200 л/мин, то его следует шунтировать воздуховодом. Выберем максимальный измеряемый в системе расход газа – 800 л/мин. При этом расход воздуха в воздуховоде датчика должен составлять 200 л/мин, а в шунте ( $Q_{ш}$ ) 600 л/мин ( $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ ). При параллельном подключении шунта к воздуховоду датчика падение давлений на них равны и составят  $\Delta P_{д}=274 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ .

Исходя из особенностей конструкции измерительной системы выберем длину шунта ( $L_{ш}$ ) равной длине датчика, составляющей 70 мм. Диаметр же воздушного шунта 15 мм был подобран итерационным способом из расчетов потерь давления на участке трубы.

Далее согласно с методикой изложенной [94] выполним проверку правильности выбора диаметра шунта. Для этого рассчитаем скорость движения воздуха через шунт ( $v_{ш}$ , м/с):

$$v_{ш} = \frac{Q_{ш}}{S_{ш}} = \frac{4Q_{ш}}{\pi d_{ш}^2} = 56,6 \text{ м/с}, \quad (3.11)$$

где  $Q_{ш}$  – расход воздуха через шунт,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $d_{ш}$  – диаметр шунта, м.

Далее определим число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v_{ш} d_{ш} \rho_{в}}{\mu_{л}} = 5,628 \cdot 10^5, \quad (3.12)$$

где  $\rho_{в}$  – плотность воздуха  $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu_{л}$  – коэффициент абсолютной вязкости воздуха  $1,81 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

Затем найдем коэффициент сопротивления трения воздуха ( $\lambda$ ) в шунте:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{K_{э}}{d_{ш}} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 3,5 \cdot 10^{-2}, \quad (3.13)$$

где  $K_{э}$  – абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности, для стальных воздуховодов  $K_{э} = (1 \dots 1,5) \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

После этого найдем динамическое давление воздуха ( $P_{дв}$ , Па) в шунте:

$$P_{\partial\delta} = \frac{\rho_{\partial} \mathcal{Q}_{ш}^2}{2} = 1,921 \cdot 10^3 \text{ Па} \quad (3.14)$$

Затем получим падение давления воздуха ( $\Delta P_{ш}$ , Па) в шунте:

$$\Delta P_{ш} = \frac{L_{ш} \cdot \lambda}{d_{ш}} P_{\partial\delta} = 313 \text{ Па} \quad (3.15)$$

Таким образом, среднее значение падения давления воздуха на шунте и датчике ( $\Delta P_c$ , Па) при наибольшем измеряемом расходе воздуха:

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P_{ш} + \Delta P_{\partial}}{2} = 293,5 \text{ Па} \quad (3.16)$$

В результате получено относительное отклонение ( $\gamma_{ш}$ , %) падения давления воздуха на шунте от среднего значения  $\Delta P_c$ :

$$\gamma_{ш} = \frac{\Delta P_{ш} - \Delta P_c}{\Delta P_c} \cdot 100\% = 6,6 \text{ \%} \quad (3.17)$$

Полученная погрешность не превышает 10% и поэтому ее можно скомпенсировать изменением масштаба (0,9...1,1) преобразования в соответствующем канале модуля МВА-8. В целом полученный результат подтверждает правильность выбора модели АWM720P1 датчика расхода газа в барботере и расчета геометрических размеров воздуховода для шунтирования этого датчика.

Для выбора датчика давления воды в системе охлаждения электролитной ванны определим наименьшее избыточное давление ( $P_{мин}$ , Па) в рубашке охлаждения этой ванны, определяемое высотой столба воды:

$$P_{мин} = \rho_{\partial} g h_{\partial} = 0,1 \text{ Бар} \quad (3.18)$$

где  $\rho_{\partial}$  – плотность электролита, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_{\partial}$  – высота столба воды в рубашке охлаждения ванны, м.

Наибольшее избыточное давление ( $P_{мак}$ ) в рубашке охлаждения не должно превышать избыточного давления в водопроводе 2-4 Бар. Таким образом, диапазон измерения избыточного давления воды датчиком системы охлаждения, составляет  $P_{н}=0,1...4$  Бар. По этому параметру следует выбрать датчик

MLH50PSB16A (Honeywell) из серии MLH недорогих датчиков давления воды в корпусе из нержавеющей стали [95]. Разрешающая способность измерения избыточного давления ( $\Delta P_d$ , фунт/дюйм<sup>2</sup>) этим датчиком составляет:

$$\Delta P_d = P_{нд} \frac{\gamma_d}{100\%} = 50 \frac{2\%}{100\%} = 1 \text{ фунт/дюйм}^2, \quad (3.19)$$

где  $P_{нд}$  - номинальное давление датчика, фунт/дюйм<sup>2</sup>;  $\gamma_d$  - нормированная относительная погрешность датчика, %.

Минимально допустимое контролируемое значение избыточного давления несколько превышает разрешающую способность датчика MLH50PSB16A, что позволяет обеспечить требуемый диапазон измерения избыточного давления в рубашке охлаждения электролитной ванны.

Часть функций АСУ ТП выполняют системы управления технологического оборудования – технологического источника тока и устройство параллельной обработки и обработки изделий сложной формы.

Для использования в составе АСУ ТП система управления (СУ) ТИТ должна быть выполнена согласно функциональной схеме, представленной на Рисунок состоит из (рисунок 3.3). В состав этой СУ входят следующие блоки: программируемого логического контроллера (ПЛК) А1, панели интерфейса оператора А2, блока управления силовыми полупроводниковыми ключами (СПК) преобразователя (БУТ) А4, контроллера А5 мониторинга электрических параметров (КМП) технологического процесса.



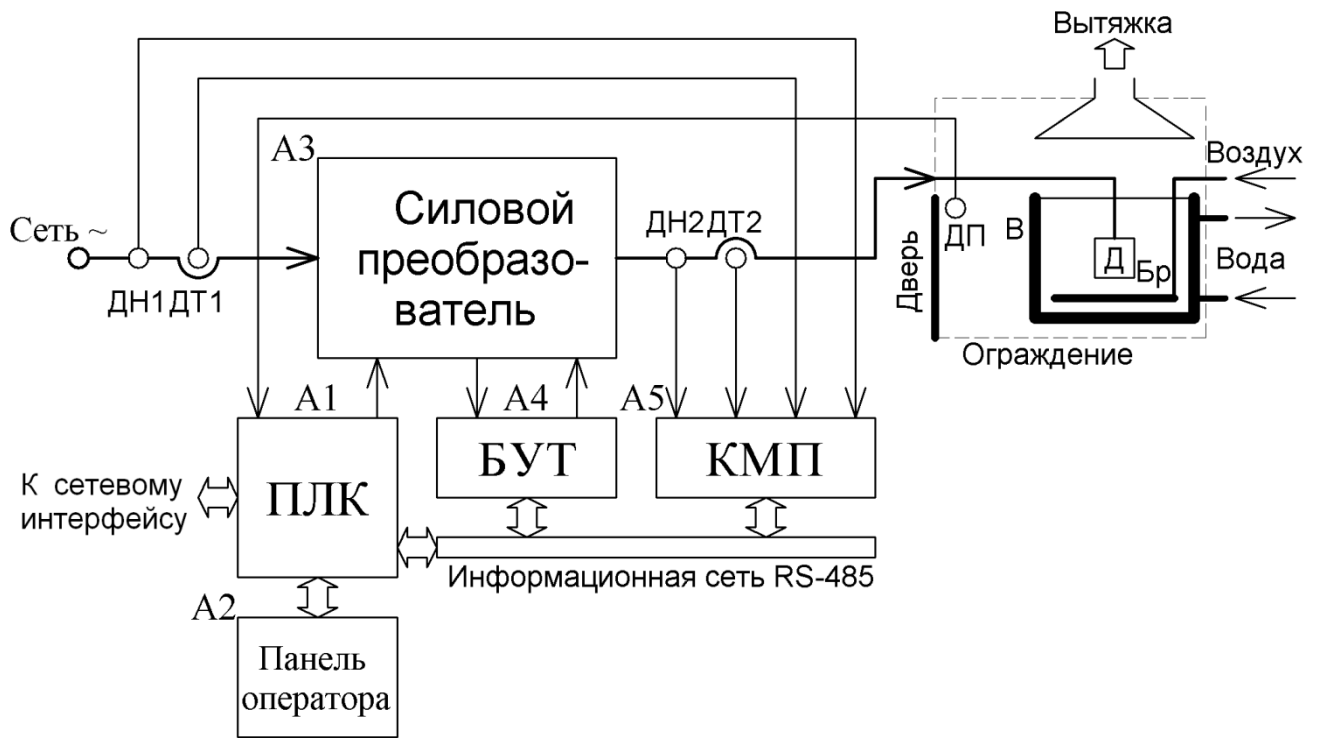


Рисунок 3.3 – Функциональная схема системы управления ТИТ

### 3.3. Устройство параллельной обработки для технологий МДО

Разработанное устройство параллельной обработки реализует разработанные алгоритмы коррекции режима при параллельной обработке деталей по количеству электричества, прошедшему через каждую деталь, и коррекции режима при обработке деталей сложной формы и пористых субстратов. В этом УПО реализовано управление группой от двух до пяти деталей.

На Рисунок 3.4 представлена функциональная схема системы управления УПО. В этом устройстве для измерения токов через детали Z1-Z5 и используются датчики тока А1-А5. Сигналы с выходов этих датчиков поступают на усилители А7-А10. Эти усилители обеспечивают предварительное масштабирование и фильтрацию от импульсных помех сигналов датчиков тока. С выходов А7-А10 сигналы подаются на входы АЦП микроконтроллера DD1, который обеспечивает оцифровку и программную обработку этих сигналов.

В микроконтроллере DD1 (рисунок 3.4) реализован алгоритм функционирования УПО (рисунок 4.7). Это алгоритм предусматривает синхронизацию работы УПО и системы управления ТИТ. В УПО для этого предусмотрено два промежуточных реле К6 и К7. Если проводится технологический процесс МДО, то на катушку реле К6 со стороны ТИТ подается напряжение и замыкается контакт К6.1. Этот контакт подключен к цифровому входу микроконтроллера DD1, и, следовательно, замыкание контакта К7.1 оповещает микроконтроллер об исполнении технологического процесса.

Микроконтроллер DD1 через выходной формирователь А16 управляет катушкой промежуточного реле К7. Контакт К7.1 этого реле подключается к системе управления ТИТ и если он замкнут, то исполнение технологического режима МДО-обработки для ТИТ разрешено.

Коммутация деталей Z1-Z5 в УПО (рисунок 3.4) обеспечивается с помощью

силовых контактов реле К1-К5. Управление этими реле осуществляется микроконтроллером DD1, для согласования выходных сигналов микроконтроллера с сигналами коммутации катушек реле К1-К5 используются выходные формирователи А11-А16.

УПО может функционировать самостоятельно или под управлением компьютера модуля управления и мониторинга АСУ, а также СУ ТИТ. Клавиатура S1 и элементы индикации А8 и сигнализации ВА1 являются узлами пользовательского интерфейса, необходимого при самостоятельном функционировании УПО.

Для обеспечения канала связи с компьютером или ТИТ в УПО (рисунок 3.4) предусмотрен последовательный порт RS-232. Работа этого порта обеспечивается с помощью интегрированного в DD1 контроллера последовательного порта. Для формирования сигналов стандарта RS-232 к выводам последовательного порта DD1 подключен драйвер А8.

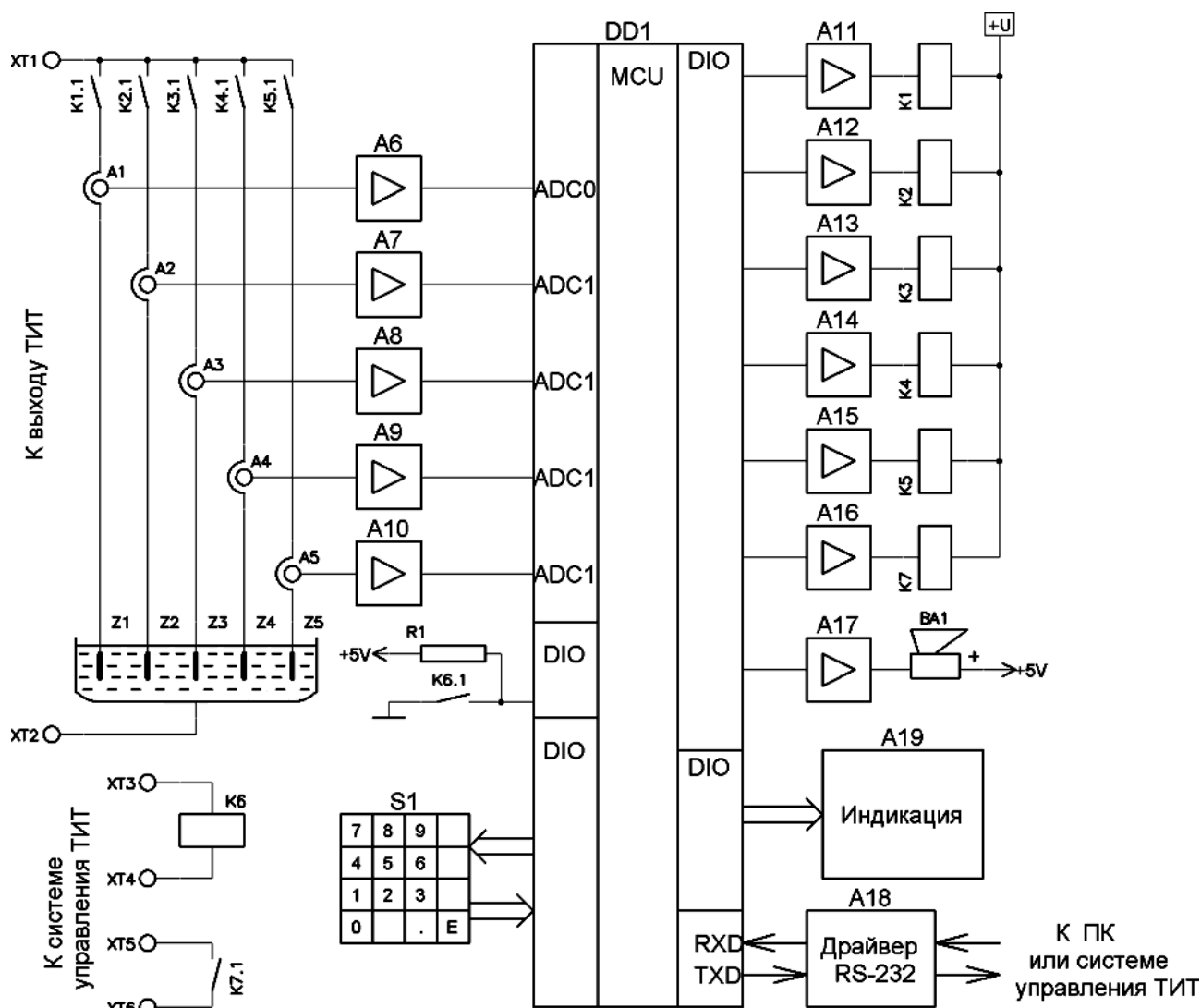


Рисунок 3.4 – Функциональная схема системы управления УПО

На основании функциональной схемы была разработана принципиальная электрическая схема системы управления УПО (рисунок 3.5). В качестве микроконтроллера для УПО был выбран надежный высокопроизводительный микроконтроллер с развитой периферией STM32F415RG [96]. В этом микроконтроллере предусмотрено двенадцатиразрядное АЦП. Приведенная погрешность преобразования этого АЦП не превышает  $6,5 \cdot 10^{-3}$  в диапазоне рабочих температур 10-80 °С. Входные усилители в УПО выполнены на микросхемах DA7, DA8 AD8604 [97]. Для обеспечения устойчивого функционирования микроконтроллера интервал дискретизации АЦП выбран равным 20 мкс.

Для упрощения разводки печатной платы УПО микроконтроллер

STM32F415RG размещен в отладочном модуле MINI M4 for STM32 (A2 на Рисунок 3.5) форм-фактора DIL-40.

MINI-M4 for STM32 – миниатюрная отладочная плата от Mikroelektronika на базе микроконтроллера STM32F415RG. На плату установлены 16 МГц и 32,768 кГц SMD кварцы, кнопка сброса и три сигнальных светодиода. Питание платы осуществляется напряжением 3,3 В. Благодаря встроенному стабилизатору напряжения питание можно осуществлять от USB порта [98].

MINI-M4 for STM32 поставляется с предустановленным скоростным USB HID загрузчиком, поэтому для работы с ней не потребуется внешний программатор-отладчик – файл прошивки загружается непосредственно по USB кабелю.

Датчиками тока DA1-DA5 (рисунок 3.5) в УПО являются бесконтактные датчики CSLA1CD фирмы Honeywell [90]. К выходам этих датчиков подключены инвертирующие усилительные каскады, выполненные на операционных усилителях (ОУ) DA7.1- DA7.4, DA8.1. Напряжение смещения напряжения "нуля" этих усилителей формируется делителем напряжения R12, R13, к которому подключен буферный усилитель DA8.2. Напряжение питания датчиков -5 В обеспечивает преобразователь постоянного тока (DA6) ADM660AR [99].

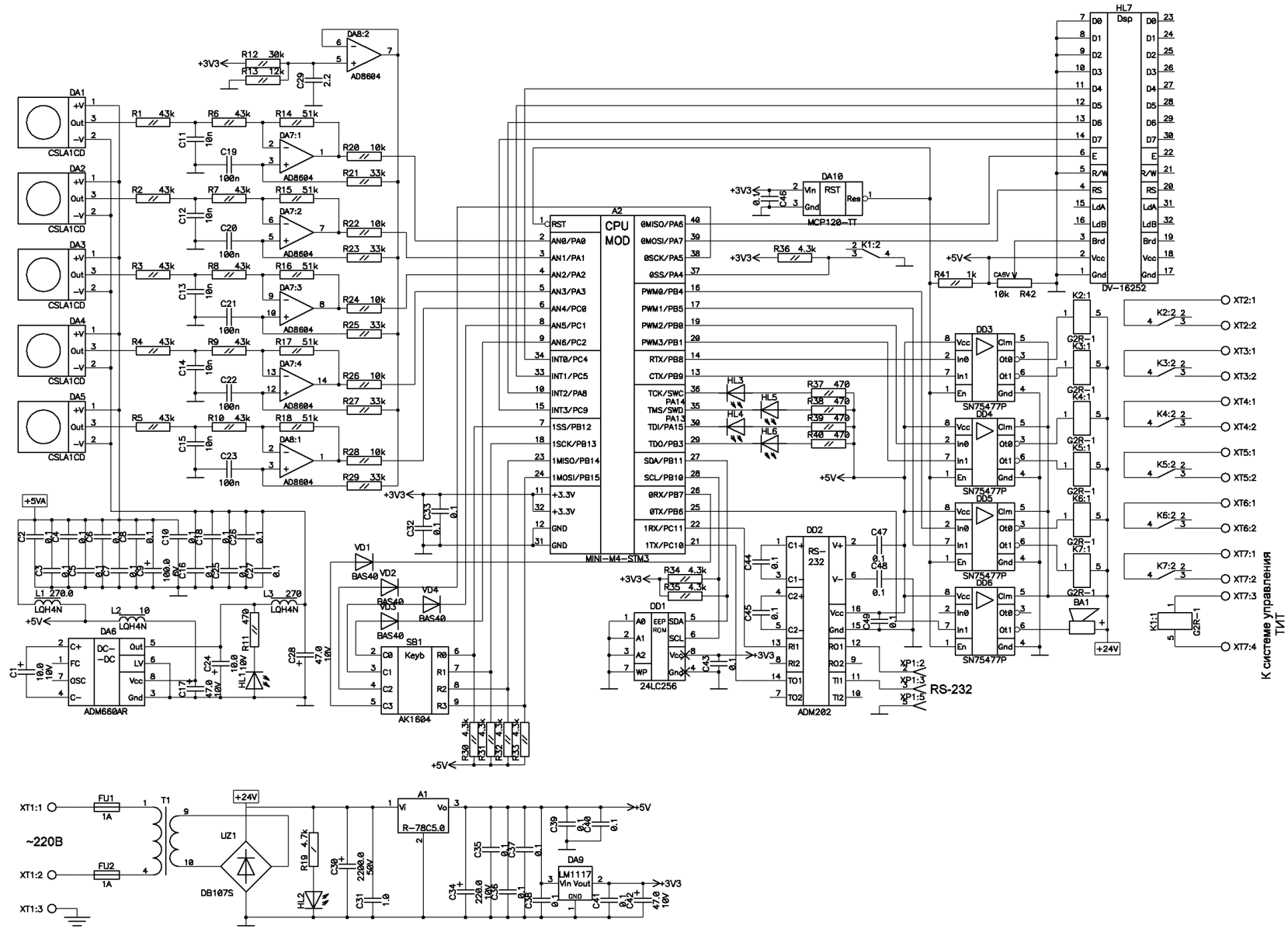


Рисунок 3.5 – Принципиальная электрическая схема системы управления УПО

Реле К1 и К7 (рисунок 3.5) используются для синхронизации работы УПО и ТИТ, а реле К2-К6 - для коммутации электрических цепей обрабатываемых УПО деталей.

Выходные формирователи сигналов управления электромагнитными реле К2-К7 выполнены на микросхемах DD3-DD5 SN75477 [100]. Аналогичным образом выполнен формирователь (DD6) сигнала звукового излучателя ВА1.

В УПО (рисунок 3.5) для ввода данных используется телефонная клавиатура SB1 с расширенным набором клавиш АК1604, для индикации данных и состояния устройства применен двухстрочный жидкокристаллический дисплей HL7 DV-16252 [101] и четыре светодиода HL3-HL6.

В канале связи устройства и ПК используется драйвер последовательного интерфейса RS-232, выполненный на микросхеме DD2 ADM202 [102]. Сброс микроконтроллера при низком напряжении питания осуществляется с помощью супервизора питания DA10. Для хранения данных и настроек в УПО используется энергонезависимая память на микросхеме DD1 24LC256 [103]. Управление этой микросхемой осуществляется микроконтроллером по интерфейсу I2C.

Питание устройства осуществляется от трансформаторного сетевого блока питания (рисунок 3.5), содержащего: понижающий трансформатор Т1, выпрямительный мост UZ1, конденсатор фильтра С30, модуль А1 импульсного стабилизатора напряжения +5В и интегральный стабилизатор DA9 напряжения +3,3В.

Разработанное УПО через внешний сетевой интерфейс подключается к АСУ ТП.

### **3.4. Выводы**

1. Разработана функциональная схема автоматизированной системы управления, в которую включены системы управления ТИТ и УПО, используемых в технологическом процессе МДО.

2. Функции мониторинга и управления АСУ ТП распределены между компьютером модуля мониторинга и управления и системами управления ТИТ и УПО.

3. Разработана программно-аппаратная система управления для устройства параллельной обработки.



## **4. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

### **4.1. Алгоритм функционирования автоматизированной системы управления**

Автоматизированная система управления технологического процесса должна обеспечивать решение следующих задач мониторинга и автоматизации процесса МДО [71,79,84]:

1. Измерения контролируемых параметров;
2. Детектирования и сигнализации аномальных событий по ходу технологического процесса, вызванных:
  - нарушением режима электробезопасности;
  - перегревом электролита;
  - срывом детали;
  - частичной или полной выработками электролита;
  - не зажиганием или преждевременным угасанием МДР;
  - растравливанием покрытия;
  - сбоями в работе систем охлаждения, барботажа и вентиляции.
3. Коррекция технологического режима по следующим параметрам:
  - плотности электрического тока через обрабатываемую поверхность;
  - прошедшему через обрабатываемую поверхность количеству электричества;
  - температуре электролита;
  - выработке электролита;
4. Создания архива технологических параметров.

Для решения задач автоматизации технологического процесса МДО был предложен алгоритм (рисунок 4.1). На начальном этапе работы алгоритма происходит проверка готовности к проведению процесса, состоящая

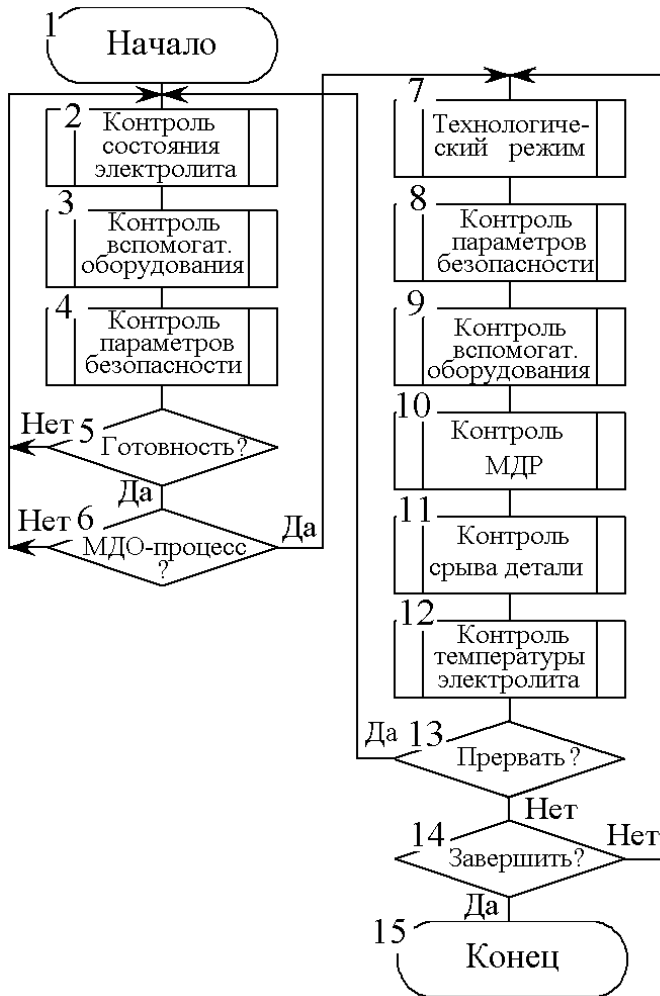


Рисунок 4.1 – Алгоритм автоматизации МДО-процесса.

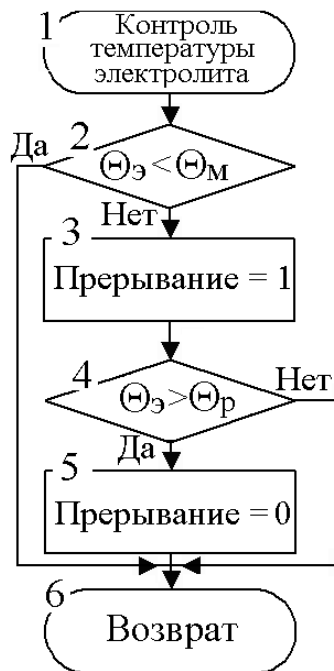


Рисунок 4.2 – Подпрограмма контроля температуры электролита

из: контроля состояния выработки электролита (блок 2), контроля сбоев вспомогательного оборудования (блок 3), и контроля соблюдения условий безопасности проведения технологического процесса (блок 4). При успешном прохождении подпрограмм контроля (блоки 2-4) устанавливается готовность к началу (блок 5) и ожидается запуск технологического процесса (блок 6).

После запуска МДО-процесса (блок 6) начинается выполнение подпрограммы обеспечивающей заданный технологический режим (блок 7). Далее повторно выполняется контроль условий безопасности процесса (блок 8) и состояния вспомогательного оборудования (блок 9). После чего происходят проверки состояния МДР (блок 10), срыва детали (блок 11) и температуры электролита (блок 12). При обнаружении в подпрограммах контроля

условия, при котором процесс не может быть продолжен, устанавливается флаг досрочного прекращения процесса, а также сбрасываются флаги готовности и запуска МДО-процесса. Повторный запуск процесса возможен только после повторного достижения условия готовности к запуску (блок 5). Если во время проведения МДО-процесса не выявлены условия досрочного прекращения, то завершения технологического процесса осуществляется по истечении заданного времени.

Подпрограмма контроля температуры электролита (рисунок 4.2) осуществляет сравнение текущей температуры электролита  $\Theta_s$  со значением максимально допустимой температуры  $\Theta_m$  и, в случае ее превышения устанавливает флаг прерывания технологического процесса (блоки 2, 3). Сбрасывание флага прерывания происходит после охлаждения электролита до рабочей температуры  $\Theta_p$  (блоки 4, 5) [71, 84].

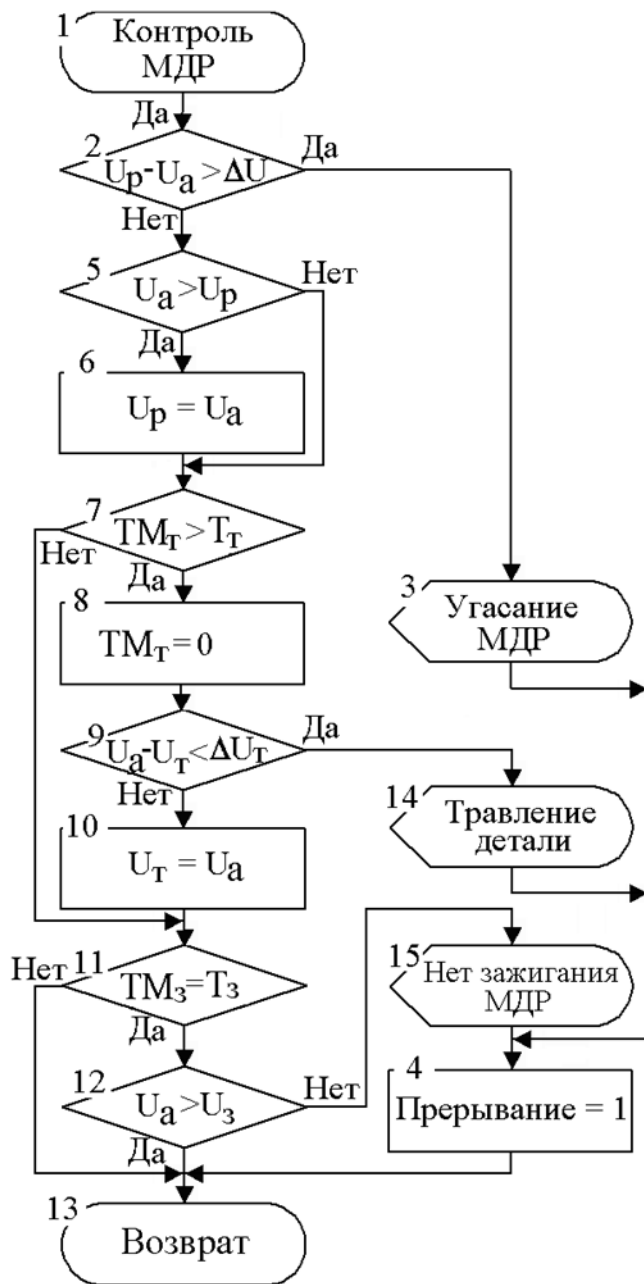


Рисунок 4.3 – Подпрограмма контроля МДР

обработываемой поверхности осуществляется по снижению темпа роста амплитудного напряжения ( $\Delta U_T$ , В, рисунок 4.4 б) на МДО-нагрузке ниже допустимого предела (блок 9, рисунок 4.2):

$$U_a - U_T < \Delta U_T, \quad (4.1)$$

где  $U_a$  – амплитудное анодное напряжение в начале интервала детектирования, В;  $U_T$  – амплитудное анодное напряжение в конце интервала детектирования, В.

Для контроля зажигания МДР (рисунок 4.4 в) при старте, перезапуске или изменении этапа МДО-процесса осуществляется сброс таймера  $T_{M_3}$  интервала

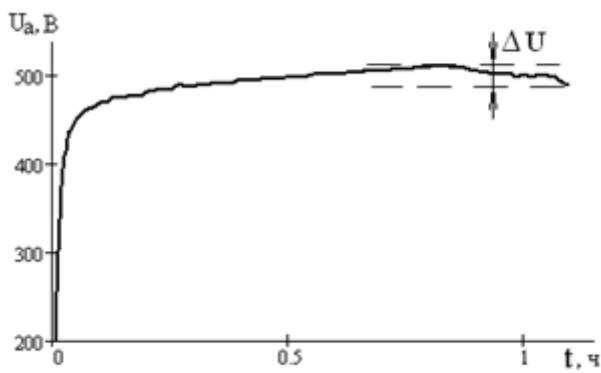
Подпрограмма контроля состояния МДР (рисунок 4.3) выполняет анализ электрических параметров процесса и детектирует такие нежелательные явления как: угасание МДР (блоки 2, 3, 5, 6), начало процессов растравливания обрабатываемой поверхности (блоки 8-10, 14), отсутствия зажигания МДР (блоки 11, 12, 15). В случае обнаружения любого из вышеперечисленных явлений устанавливается флаг прерывания МДО-процесса (блок 4) [71, 80].

Процесс угасания МДР (рисунок 4.4 а) может быть обнаружен по снижению амплитудного значения напряжения анодной составляющей  $U_a$  ниже допустимого отклонения  $\Delta U$  (блок 2, Рисунок 4.2) относительно наибольшего значения этого параметра зафиксированного за время проведения процесса (блоки 5, 6).

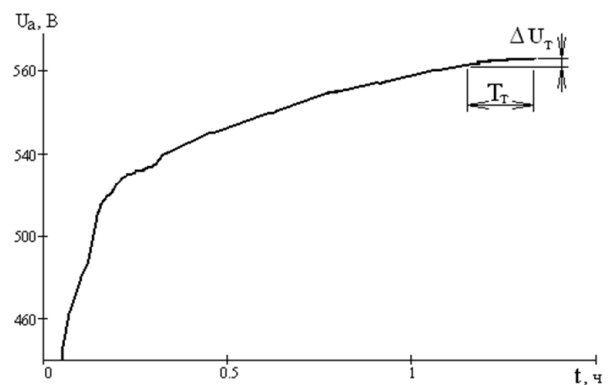
Выявление процесса травления

контроля. Если по истечению этого интервала  $T_3$  (блок 11, рисунок 4.3) амплитудное анодное напряжение на МДО-нагрузке меньше допустимого значения  $U_3$  (блок 12), то детектируется отсутствие разряда и МДО-процесс прерывается (блоки 4, 13, 15).

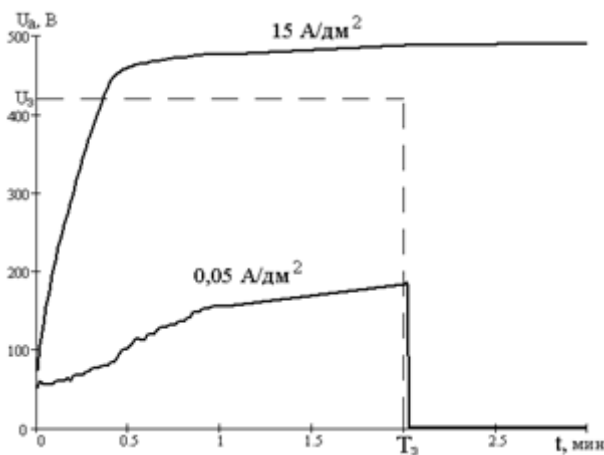
Контроль срыва детали позволяет прекратить процесс МДО, в случае если обрабатываемая деталь сорвется с крепления и упадет в электролит. Детектировать это событие можно по прерыванию электрического тока через электролитную ванну или по его резкому снижению в случае параллельной обработки нескольких деталей.



а)



б)



в)

**Рисунок 4.4 – Детектирование процессов угасания (а) МДР, растравливания поверхности (б), не зажигания МДР (в).**

## 4.2. Интерфейс удаленного доступа к технологическому оборудованию

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. Последнее требует высоконадежных способов защиты информации, используемой для управления процессом, так как не санкционированное вмешательство в технологический процесс может привести не только к браку, но и к нарушению функционирования оборудования.

Для предотвращения несанкционированного доступа к информации в АСУ предусмотрены как общепринятые, так и уникальные меры:

- идентификация пользователей по логину и паролю;
- разграничение уровня доступа к оборудованию для пользователей;
- использование стандартных алгоритмов для организации защищенного VPN-канала связи в сети Интернет;
- применение аппаратного AES-шифрования в специально разработанном контроллере удаленного доступа;
- автоматическая смена AES-ключа шифрования через фиксированные интервалы времени по специальному алгоритму.

Аппаратно контроллер удаленного доступа представляет собой USB Ethernet мост, выполненный на 32 разрядном Cortex M4 ARM-контроллере STM32F407VCT, в котором предусмотрены USB и Ethernet контроллеры, а также аппаратный AES контроллер криптографии. На физическом уровне Ethernet интерфейс обеспечивает микросхема DP83848CVV-35.

Для удаленного доступа к технологическому оборудованию в компьютере модуля мониторинга организован стандартный http сервер Apache

и разработан web-интерфейс. На Рисунках 4.5, 4.6 представлены примеры html-страниц этого интерфейса, для доступа к данным использовались post и get запросы, cgi сценарии и xml.

## Выравниватель количества электричества

### Общие параметры управления

|                                      |  |                                      |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Рассогласование, %                   | Пауза, с                                       | Время коррекции, с                   |
| 1,0                                  | 5,0  | 100,0                                |
| <input type="button" value="Новый"/> | Управление <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="button" value="Сброс"/> |

### Индивидуальные параметры управления

|                 |  |                               |                               |  |  |
|-----------------|--|-------------------------------|-------------------------------|--|--|
| Контроль детали | №1 <input checked="" type="checkbox"/> | №2 <input type="checkbox"/>   | №3 <input type="checkbox"/>   | №4 <input checked="" type="checkbox"/> | №5 <input checked="" type="checkbox"/> |
| Площадь, кв.дм. | 10,000                                 | 10,000                        | 10,000                        | 10,000                                 | 10,000                                 |
|                 | Откл <input type="checkbox"/>          | Откл <input type="checkbox"/> | Откл <input type="checkbox"/> | Откл <input type="checkbox"/>          | Откл <input type="checkbox"/>          |

Copyright © 2015 Лаборатория МДО.

Рисунок 4.5 – HTML страница web-интерфейса, для управления процедурой выравнивания количества электричества между обрабатываемыми деталями

## Выравниватель количества электричества

16:03:53    Мониторинг    технологического    процесса    18/10/15

|        |         |        |      |        |               |
|--------|---------|--------|------|--------|---------------|
| Работа | Площадь | Утечка | Срыв | Запись | 46229:18:01.1 |
|--------|---------|--------|------|--------|---------------|

| Параметр | Дет. №1 | Дет. №2 | Дет. №3 | Дет. №4 | Дет. №5 | Среднее |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ia ср, А | 0,00    | 0,00    | -194,52 | 0,00    | 0,00    | -       |
| Iк ср, А | 0,00    | 0,00    | 0,00    | 0,00    | -48,20  | -       |
| Ua ам, В | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,2     | -       |
| Uк ам, В | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | -       |
| Qa, А*ч  | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   |
| Qк, А*ч  | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   |
| dQa, А*ч | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | -       |
| dQa, %   | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | -       |
| dQк, А*ч | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   | -       |
| dQк, %   | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | 0,0     | -       |

Copyright © 2015 Лаборатория МДО.

Рисунок 4.6 – HTML страница web-интерфейса, для мониторинга технологического процесса.

### 4.3. Алгоритмы устройства параллельной обработки

В устройстве параллельной обработки деталей методом МДО реализован способ коррекции технологического процесса по количествам электричества прошедшим, через каждую деталь группы. Согласно этому способу УПО [85] обнаруживает детали с наибольшим и наименьше значениями количества электричества, и, если разница между этими значениями превышает заданный порог, то в течение заданного интервала времени происходит отключение детали с наибольшим значением количества электричества. 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.

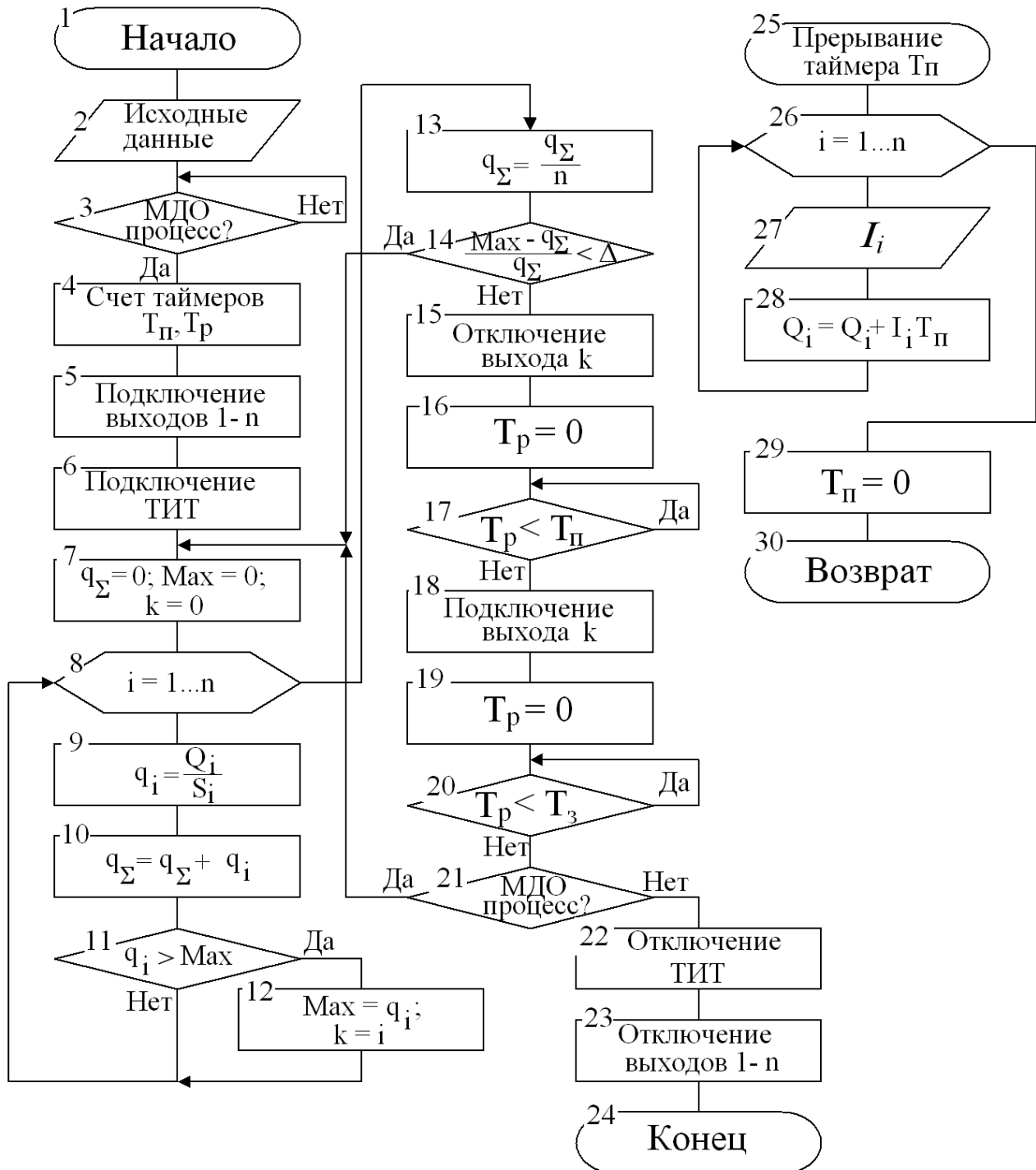
На основании рассмотренного выше способа коррекции режима был разработан алгоритм (рисунок 4.7) функционирования устройства параллельной обработки (УПО). Согласно этому алгоритму оператор перед началом процесса должен задать (блок 2) исходные параметры процесса: количество деталей ( $n$ ) в группе и площади обрабатываемой поверхности для этих деталей. При необходимости задаются уставки работы УПО: порог относительного отклонения количества электричества  $\Delta$  и длительности интервала коррекции режима  $T_n$  и защитного интервала  $T_z$ . Далее выполняется цикл ожидания начала технологического процесса (блок 3).

После начала технологического процесса разрешается счет таймеров  $T_n$  и  $T_p$  (блок 4), подключаются к выходу ТИТ обрабатываемые детали (блок 5) и разрешается работа ТИТ (блок 6), то есть через детали начинает протекать электрический ток.

Таймер  $T_n$  через заданные интервалы инициализирует прерывание (блоки 25-30), в котором для каждой  $i$ -ой детали (блок 26) осуществляется измерение тока (блок 27) и подсчет количества прошедшего через них



электричества (блок 28). В завершении прерывания осуществляется перезапуск таймера  $T_{\Pi}$  (блок 29).



**Рисунок 4.7** – Блок-схема алгоритма коррекции режима при параллельной обработке деталей по количеству электричества, прошедшему через каждую деталь

После фактического начала технологического процесса параллельной МДО-обработки, и вплоть до ее окончания периодически выполняется основной цикл управления (блоки 7-21). Каждый такой цикл начинается с

поиска детали с наибольшим количеством электричества, прошедшего через единицу обрабатываемой поверхности ( $q_i$ , А·ч/дм<sup>2</sup>; блоки 7-11).

Этот поиск выполняется во встроенном цикле (блоки 8-11), в котором для каждой  $i$ -ой обрабатываемой детали осуществляется расчет удельного количества электричества (блок 9) прошедшего от начала процесса, рассчитывается сумма ( $q_{\Sigma}$ , А·ч/дм<sup>2</sup>) удельного количества электричества для всех деталей (блок 10) и определяется деталь ( $k$ ) с наибольшим значением удельного количества электричества ( $Max$ ; блоки 11, 12). Использование удельных параметров позволяет обрабатывать на УПО в одной группе детали различной площади. Для корректности поиска перед началом вложенного цикла обнуляются переменные поиска и накопления данных (блок 7).

По завершению вложенного цикла осуществляется для обрабатываемой группы расчет среднего значения удельного количества электричества ( $q_{\Sigma}$ ; блок 13), затем определяется относительное отклонение наибольшего значения удельного количества электричества ( $Max$ ) от среднего и результат сопоставляется с уставкой допустимого порога  $\Delta$  (блок 14). Если эта уставка не достигнута, то блоки 7-14 повторяются. В противном случае от ТИТ отключается деталь с наибольшим удельным количеством электричества ( $k$ ; блок 15) и перезапускается таймер  $T_p$  (блок 16). По истечению интервала времени  $T_{\Pi}$  (блок 17) эта деталь вновь подключается к ТИТ (блок 18) и перезапускается таймер  $T_p$  (блок 19). По истечению защитного интервала времени  $T_z$  (блок 20) и продолжающемся МДО -процессе (блок 21) основной цикл управления повторяется (блоки 7-21).

Если МДО-процесс завершен (блок 21), то осуществляется отключение ТИТ (блок 22) и отключение всех деталей от выхода ТИТ (блок 23).

Таким образом, в УПО должны определяться средние значения токов через детали, абсолютные и удельные значения количества электричества, прошедшего через каждую из этих деталей. Все эти параметры рассчитываются по мгновенным значениям электрического тока через детали, которые должны

быть измерены датчиками тока и оцифрованы в аппаратных средствах УПО.

На основании выражений (2.35) и (2.50) был разработан алгоритм (рисунок 4.8) коррекции тока через поверхность обрабатываемой детали по току через контрольный (ведущий образец), который реализован в УПО. Согласно этому алгоритму оператор перед началом процесса должен задать (блок 2) исходные данные: плотность тока, продолжительность, площадь контрольного (ведущего) образца. Далее выполняется цикл ожидания начала технологического процесса (блок 3).

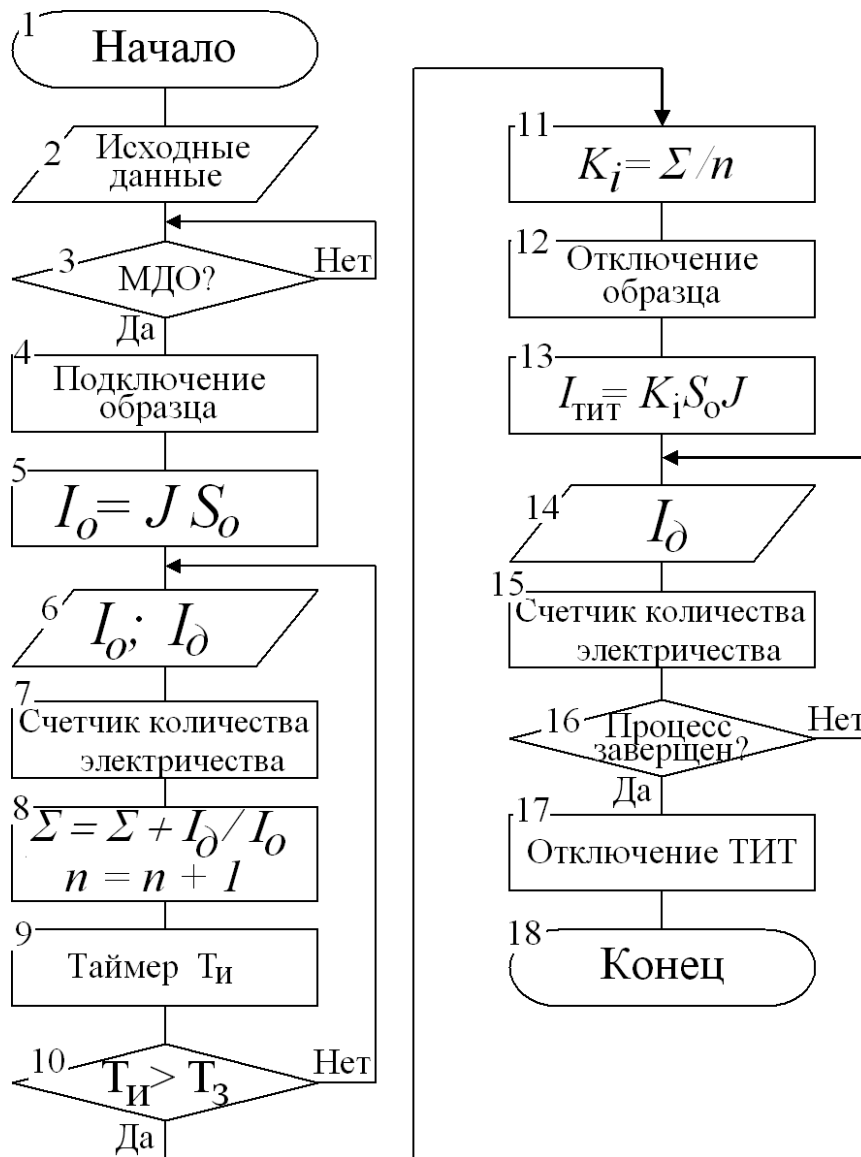


Рисунок 4.8 – Блок-схема алгоритма коррекции тока через обрабатываемую деталь по току через контрольный образец УПО

После начала процесса УПО подключает параллельно ведомой детали ведущий образец (блок 4) и с помощью ТИТ устанавливает через этот образец требуемый ток (блок 5). Затем в течение интервала времени  $T_3$  выполняются циклические действия (блоки 6-10): измерение токов через деталь  $I_d$  и образец  $I_o$ ; подсчет количества электричества прошедшего через деталь (блок 7); расчет отношения этих токов, суммы этих отношений и подсчет количества измерений (блок 8); отсчет длительности интервала  $T_3$  (блок 9). В завершении цикла проверяется условие завершения этого интервала.

После истечения интервала времени  $T_3$  осуществляется расчет усредненного отношения  $K_i$  токов детали и образца (блок 11). Затем отключается от ТИТ ведущий образец (блок 12), рассчитывается и устанавливается ТИТ требуемый для обработки детали ток (блок 13). Далее до завершения процесса обработки осуществляется измерение тока через деталь (блок 14) и подсчет количества прошедшего через нее электричества (блок 15). По завершению процесса (контролируется блоком 16) осуществляется отключение ТИТ (блок 17).

#### **4.4. Выводы**

1. На базе алгоритма автоматизации технологического процесса микродугового оксидирования разработан алгоритм функционирования автоматизированной системы управления.

2. Разработан интерфейс удаленного доступа к технологическому оборудованию по сети Интернет.

3. Разработаны алгоритмы функционирования устройства параллельной обработки деталей.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

### 5.1. Методика экспериментальной апробации

Целью лабораторных испытаний являлась оценка работоспособности системы автоматизированного управления технологическим процессом.

На первой стадии оценивались возможности применения

Испытания проводились в три 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;
- 3). МДО-обработка с применением УПО и исследование свойств образцов кратной площади.

На первом и втором этапах исследования проводились на таблеткообразных образцах, изготовленных из алюминиевого сплава АМг6, площадью 0,1 дм<sup>2</sup>. В каждой группе было по три таких образца.

На третьем этапе использовались два прямоугольных образца из сплава АМг6 площадью 0,1 и 0,5 дм<sup>2</sup>.

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 (2 г/л – КОН и 9 г/л – жидкого стекла). 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 проводятся 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 производилась при помощи статистических методов на основе контрольных карт Шухарта [104].

На третьем этапе была обработана группа из двух образцов разной площади при значении порога относительного отклонения количества электричества определенного на втором этапе испытаний.

Целью лабораторных испытаний являлась оценка работоспособности УПО и технологических ограничений его применения в процессе МДО.

Испытания проводились в три этапа:

- 1). МДО-обработка и исследование свойств контрольной группы образцов без применения устройства УПО;
- 2). Оценка влияния размещения ведущего и ведомого образцов на результаты выбора УПО режима МДО-обработки ведомого образца;
- 3). МДО-обработка с применением УПО и исследование свойств образцов.

Исследования проводились на прямоугольных образцах, изготовленных из алюминиевого сплава АМг6. Площадь ведущих образцов составляла 0,1 дм<sup>2</sup>, а ведомых – 0,1, 0,2, 0,5, 1 и 2 дм<sup>2</sup>. МДО-обработка выполнялась на конденсаторном ТИТ в анодно-катодном режиме при равенстве анодного и

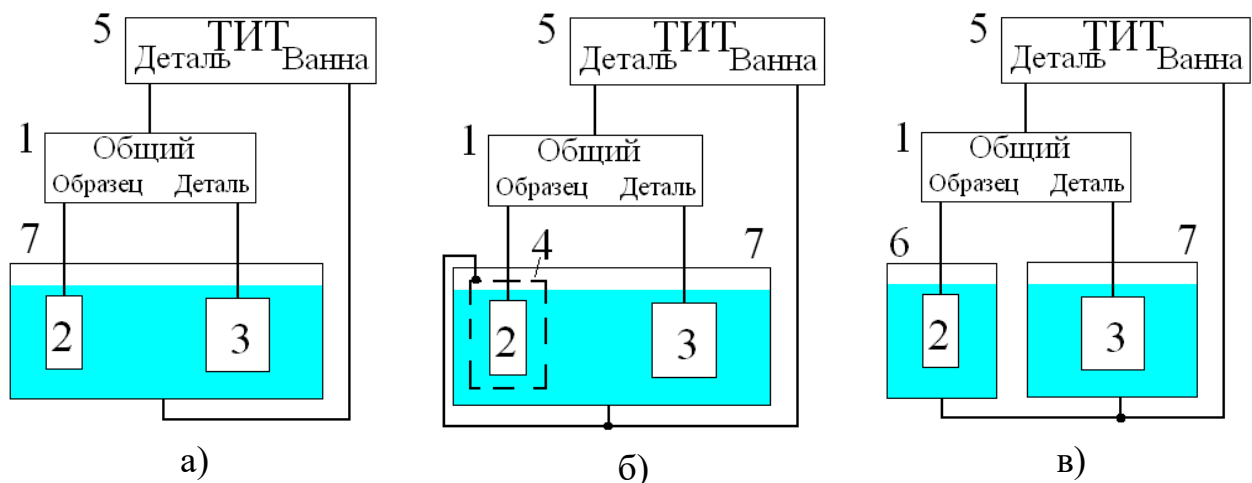
катодного токов и суммарной плотности тока  $10 \text{ А/дм}^2$  в силикатно-щелочном электролите (2 г/л – КОН и 9 г/л – жидкого стекла). В зависимости эксперимента продолжительность обработки составляла 60 или 120 мин. Каждый эксперимент повторялся 3 раза.

На первом и третьем этапах исследований после каждой МДО-обработки на образцах измеряли толщину, сквозную пористость и микротвердость сформированных покрытий. Последний параметр измерялся на покрытиях, сформированных в течение 120 мин.

На первом этапе испытаний была выполнена индивидуальная МДО-обработка образцов площадью 0,1, 0,2, 0,5, 1 и 2  $\text{дм}^2$  в течение 60 и 120 мин.

На втором этапе испытаний выясняли рекомендуемое размещение ведомого и ведущего образцов. На этом этапе оценивали выбранную для обработки ведомого образца с помощью УПО емкость балластного конденсатора ТИТ. Оценка проводилась для трех вариантов размещения ведущего и ведомого образцов (рисунок 5.1). В ходе каждой МДО-обработки выполняли следующую последовательность действий:

- 1). Запускали процесс МДО-обработки;
- 2). По показаниям УПО устанавливали ток через ведомый образец 1 А;
- 3). Обработку проводили до выбора УПО требуемого значения тока через ведомый образец.



**Рисунок 5.1 – Варианты размещения и подключение образцов к ТИТ: а) образцы размещались в одной ванне; б) образцы размещались в одной ванне с электрическим экраном; в) в разных ваннах; 1 – устройство УПО; 2- ведущий образец; 3 – ведомый образец; 4 – экран; 5 – ТИТ; 6 – малая ванна; 7 – большая ванна;**



На третьем этапе испытаний ведомый и ведущий образцы размещали способом (рисунок 5.1), показавшем лучший результат выбора емкости ТИТ для обработки ведомого образца на втором этапе испытаний. Обработку выполняли в автоматическом режиме работы устройства УПО.

После этого проводили измерение свойств покрытий и сопоставляли результаты с покрытиями контрольной группы и делали вывод о работоспособности УПО.

По окончании испытаний даны методические рекомендации по проведению технологического процесса с использованием УПО.

Лабораторная установка состоит из разработанной системы автоматизированного управления технологическим процессом, ТИТ мощностью 100 кВА, устройств параллельной обработки деталей и обработки изделий сложной формы и пористых субстратов, электролитной ванны емкостью 80 л, компьютера системы мониторинга и средств измерения. Ванна помещена в вытяжной шкаф, оборудована электро механической мешалкой и рубашкой охлаждения.

Температура электролита в ванне поддерживалась в интервале 25-30 °С. Коррекция электролита осуществлялась после прохождения 800 А·ч электричества, а полная замена - после 2000 А·ч. После приготовления или коррекции электролита, осуществлялась его проработка в течение одного часа при токе 10 А на образце исследуемого сплава, площадью 1 дм<sup>2</sup>.

У сформированных покрытий выполняли измерение толщины, сквозной пористости, напряжения электрического пробоя на переменном и постоянном токах. Методики измерения этих свойств соответствовали [14,16,].

## 5.2. Результаты экспериментальной апробации

В ходе первого этапа лабораторных испытаний было выполнено МДО контрольных групп образцов без применения УПО, проведены измерения свойств сформированных на образцах МДО-покрытий и осуществлена статистическая обработка данных. Результаты этих измерений представлены в таблицах 5.1, 5.2.

**Таблица 5.1 – Свойства МДО-покрытий, сформированных на образцах сплава АМгб в течение 60 мин.**

| № группы | № образца в группе | Толщина h, мкм | Сквозная пористость Пс, % | Напряжение электрического пробоя U, В |     |
|----------|--------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|-----|
|          |                    |                |                           | =                                     | ~   |
| 1        | 1                  | 24,8           | 2,4                       | 790                                   | 250 |
|          | 2                  | 29,6           | 2,2                       | 670                                   | 230 |
|          | 3                  | 31,4           | 2,5                       | 620                                   | 210 |
| 2        | 1                  | 27,2           | 3,0                       | 650                                   | 175 |
|          | 2                  | 43             | 2,7                       | 620                                   | 190 |
|          | 3                  | 37,8           | 1,8                       | 630                                   | 185 |
| 3        | 1                  | 29,6           | 3,6                       | 710                                   | 180 |
|          | 2                  | 27,6           | 2,8                       | 700                                   | 190 |
|          | 3                  | 35,6           | 3,3                       | 760                                   | 200 |
| 4        | 1                  | 32,6           | 1,6                       | 740                                   | 195 |
|          | 2                  | 28,6           | 1,7                       | 670                                   | 200 |
|          | 3                  | 26,4           | 1,8                       | 680                                   | 200 |
| 5        | 1                  | 18,2           | 1,8                       | 660                                   | 175 |
|          | 2                  | 24,6           | 1,9                       | 780                                   | 195 |
|          | 3                  | 26             | 2,0                       | 810                                   | 185 |

В ходе второй стадии лабораторных испытаний было выполнено МДО групп образцов с УПО при разных порогах относительного отклонения количества электричества  $\Delta_{пк}$ , проведены измерения свойств сформированных на образцах МДО-покрытий и осуществлена статистическая обработка данных. Результаты этих измерений представлены в таблицах 5.3, 5.4.

**Таблица 5.2 – Свойства МДО-покрытий, сформированных на образцах сплава АМгб в течение 180 мин.**

| № группы | № образца в группе | Толщина h, мкм | Сквозная пористость Пс, % | Напряжение электрического пробоя U, В |      | Микротвердость, Нц кг/мм <sup>2</sup> |
|----------|--------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|
|          |                    |                |                           | =                                     | ~    |                                       |
| 1        | 1                  | 91,3           | 2,4                       | 1390                                  | 850  | 1151                                  |
|          | 2                  | 82,8           | 2,8                       | 1490                                  | 950  | 1113                                  |
|          | 3                  | 97,6           | 3,3                       | 1550                                  | 1000 | 1208                                  |
| 2        | 1                  | 95             | 2,6                       | 1420                                  | 700  | 1398                                  |
|          | 2                  | 83,4           | 3,0                       | 1510                                  | 870  | 1132                                  |
|          | 3                  | 86,2           | 3,1                       | 1740                                  | 850  | 1173                                  |
| 3        | 1                  | 78,1           | 3,6                       | 1210                                  | 500  | 1321                                  |
|          | 2                  | 81,6           | 3,3                       | 1020                                  | 600  | 1374                                  |
|          | 3                  | 85             | 4,0                       | 1730                                  | 800  | 1341                                  |
| 4        | 1                  | 92,4           | 3,8                       | 1350                                  | 1100 | 1187                                  |
|          | 2                  | 93,4           | 3,4                       | 1330                                  | 900  | 1307                                  |
|          | 3                  | 81,8           | 2,9                       | 1290                                  | 850  | 1396                                  |
| 5        | 1                  | 88,8           | 3,7                       | 940                                   | 750  | 1345                                  |
|          | 2                  | 77,8           | 2,1                       | 1640                                  | 750  | 1034                                  |
|          | 3                  | 74,6           | 3,4                       | 1450                                  | 740  | 1539                                  |

**Таблица 5.3 – Свойства МДО-покрытий, сформированных с применением УПО на образцах сплава АМгб в течение 60 мин.**

| Уставка Δ <sub>пс</sub> , % | № группы | № образца в группе | Толщина h, мкм | Сквозная пористость Пс, % | Напряжение электрического пробоя U В |          |
|-----------------------------|----------|--------------------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|----------|
|                             |          |                    |                |                           | =                                    | ~        |
| <b>1</b>                    | <b>2</b> | <b>3</b>           | <b>4</b>       | <b>5</b>                  | <b>6</b>                             | <b>7</b> |
| 1,5                         | 1        | 1                  | 28,4           | 2,30                      | 750                                  | 350      |
|                             |          | 2                  | 27             | 1,60                      | 640                                  | 350      |
|                             |          | 3                  | 27,6           | 1,60                      | 630                                  | 350      |
|                             | 2        | 1                  | 27,8           | 2,30                      | 615                                  | 400      |
|                             |          | 2                  | 30,2           | 1,90                      | 665                                  | 400      |
|                             |          | 3                  | 28,4           | 2,20                      | 645                                  | 400      |
|                             | 3        | 1                  | 28,8           | 2,20                      | 715                                  | 350      |
|                             |          | 2                  | 28,6           | 2,40                      | 690                                  | 400      |
|                             |          | 3                  | 29             | 2,50                      | 665                                  | 380      |
|                             | 4        | 1                  | 29             | 2,00                      | 750                                  | 400      |
|                             |          | 2                  | 28,6           | 1,80                      | 715                                  | 400      |
|                             |          | 3                  | 28,8           | 1,80                      | 715                                  | 400      |

Продолжение таблица 5.3

|     |   |      |      |      |     |     |
|-----|---|------|------|------|-----|-----|
|     | 5 | 1    | 28,4 | 1,80 | 675 | 350 |
|     |   | 2    | 29   | 1,90 | 730 | 350 |
|     |   | 3    | 28,6 | 1,80 | 680 | 350 |
| 2,5 | 1 | 1    | 28   | 1,80 | 670 | 330 |
|     |   | 2    | 31   | 1,50 | 680 | 350 |
|     |   | 3    | 30,8 | 1,50 | 710 | 350 |
|     | 2 | 1    | 32,2 | 1,80 | 730 | 350 |
|     |   | 2    | 31,6 | 2,80 | 720 | 380 |
|     |   | 3    | 32   | 1,80 | 690 | 350 |
|     | 3 | 1    | 30,2 | 2,90 | 660 | 380 |
|     |   | 2    | 31,6 | 1,70 | 680 | 350 |
|     |   | 3    | 31,6 | 2,90 | 700 | 350 |
|     | 4 | 1    | 32,8 | 3,2  | 690 | 320 |
|     |   | 2    | 31,2 | 1,7  | 680 | 350 |
|     |   | 3    | 31,2 | 2    | 730 | 350 |
|     | 5 | 1    | 35,8 | 2,5  | 710 | 400 |
|     |   | 2    | 30,4 | 2,2  | 730 | 320 |
|     |   | 3    | 30   | 2,5  | 690 | 320 |
| 5   | 1 | 1    | 30   | 2,5  | 660 | 310 |
|     |   | 2    | 29   | 2,6  | 690 | 330 |
|     |   | 3    | 29,4 | 2,3  | 670 | 350 |
|     | 2 | 1    | 28,2 | 1,9  | 650 | 350 |
|     |   | 2    | 28,6 | 2,2  | 640 | 350 |
|     |   | 3    | 28,8 | 1,9  | 670 | 380 |
|     | 3 | 1    | 25,8 | 2,4  | 640 | 350 |
|     |   | 2    | 27,6 | 2,6  | 600 | 350 |
|     |   | 3    | 25,2 | 2,2  | 670 | 350 |
|     | 4 | 1    | 30,8 | 2,3  | 700 | 380 |
|     |   | 2    | 30   | 2,3  | 650 | 350 |
|     |   | 3    | 31,2 | 2,3  | 620 | 350 |
|     | 5 | 1    | 31   | 2    | 620 | 320 |
|     |   | 2    | 29,6 | 2,6  | 660 | 350 |
|     |   | 3    | 29,8 | 2,8  | 890 | 350 |
| 7,5 | 1 | 1    | 27,6 | 3,1  | 670 | 400 |
|     |   | 2    | 33,8 | 2,8  | 640 | 320 |
|     |   | 3    | 28,2 | 3,2  | 660 | 350 |
|     | 2 | 1    | 35,8 | 2,9  | 620 | 310 |
|     |   | 2    | 39,4 | 3    | 640 | 340 |
|     |   | 3    | 48,6 | 3,3  | 630 | 320 |
|     | 3 | 1    | 33   | 3,4  | 890 | 380 |
| 2   |   | 31,4 | 3,7  | 810  | 320 |     |

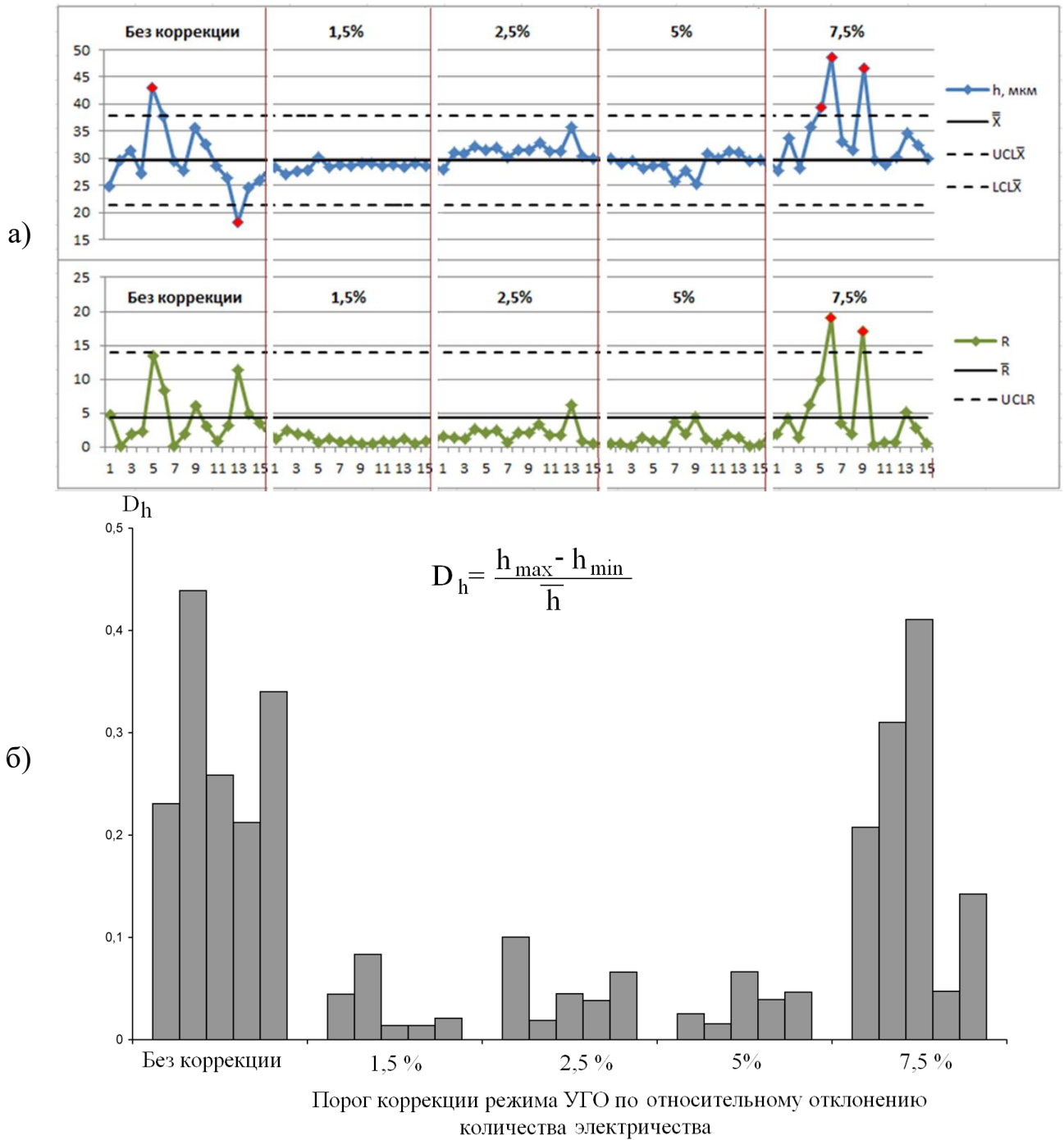
Продолжение таблица 5.3

|  |   |   |      |     |     |     |     |
|--|---|---|------|-----|-----|-----|-----|
|  | 4 | 3 | 46,6 | 2,7 | 620 | 350 |     |
|  |   | 1 | 29,8 | 3,1 | 630 | 350 |     |
|  |   | 2 | 28,8 | 2,7 | 680 | 380 |     |
|  | 5 | 3 | 30,2 | 2,7 | 660 | 320 |     |
|  |   | 1 | 34,6 | 3,8 | 640 | 350 |     |
|  |   | 2 | 32,4 | 3   | 660 | 320 |     |
|  |   |   | 3    | 30  | 3,2 | 660 | 320 |

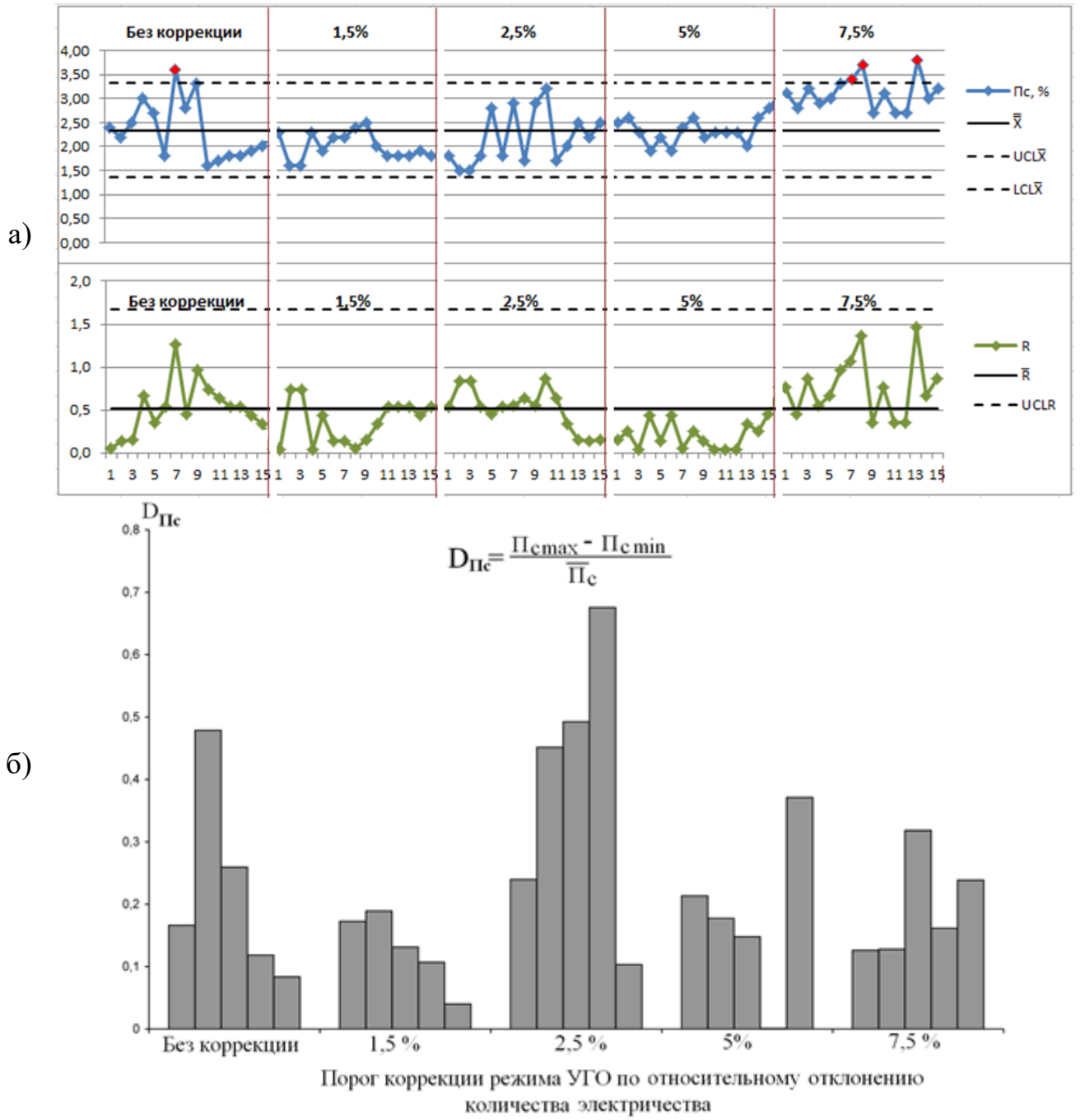
**Таблица 5.4 – Свойства МДО-покрытий, сформированных с применением УПО ( $\Delta_{пг} = 1,5\%$ ) на образцах сплава АМгб в течение 180 мин.**

| № группы | № образца в группе | Толщина h, мкм | Сквозная пористость Пс, % | Напряжение электрического пробоя U, В |     | Микротвердость, Нц кг/мм <sup>2</sup> |
|----------|--------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|
|          |                    |                |                           | =                                     | ~   |                                       |
| 1        | 1                  | 85             | 2,90                      | 1290                                  | 750 | 1171                                  |
|          | 2                  | 80             | 2,90                      | 1220                                  | 750 | 1096                                  |
|          | 3                  | 83             | 2,90                      | 1290                                  | 850 | 1170                                  |
| 2        | 1                  | 85             | 2,80                      | 1630                                  | 820 | 1262                                  |
|          | 2                  | 90             | 3,50                      | 1440                                  | 800 | 1384                                  |
|          | 3                  | 89             | 3,00                      | 1210                                  | 800 | 1337                                  |
| 3        | 1                  | 88             | 2,90                      | 1500                                  | 750 | 1401                                  |
|          | 2                  | 85             | 2,60                      | 1460                                  | 800 | 1282                                  |
|          | 3                  | 84             | 3,30                      | 1280                                  | 780 | 1335                                  |
| 4        | 1                  | 87             | 3,20                      | 1610                                  | 800 | 1288                                  |
|          | 2                  | 82             | 3,20                      | 1540                                  | 800 | 1179                                  |
|          | 3                  | 81             | 3,30                      | 1610                                  | 850 | 1242                                  |
| 5        | 1                  | 86             | 2,60                      | 1540                                  | 720 | 1278                                  |
|          | 2                  | 92             | 3,10                      | 1670                                  | 750 | 1384                                  |
|          | 3                  | 87             | 3,10                      | 1570                                  | 750 | 1367                                  |

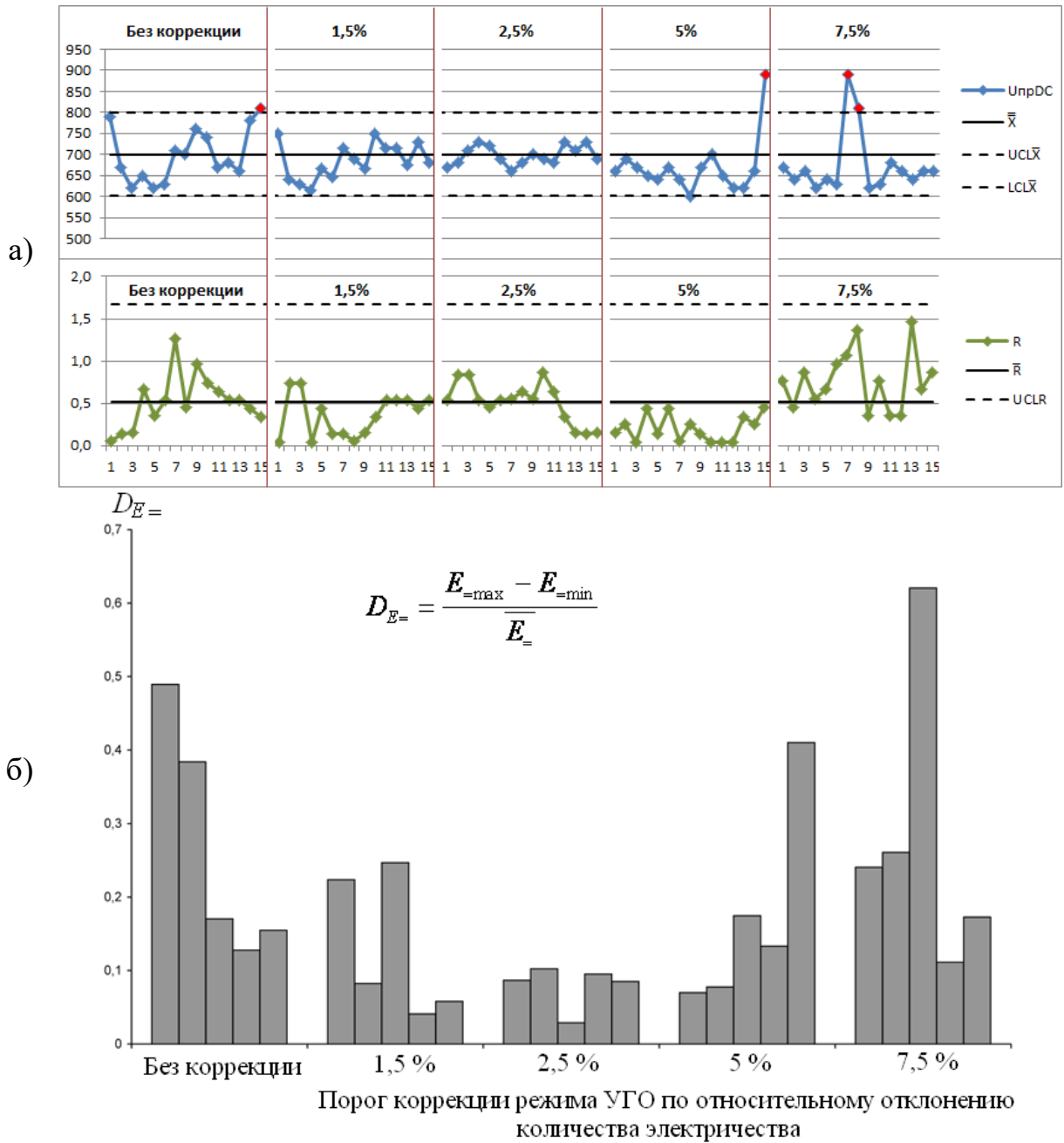
Далее были проведены сопоставление и анализ данных, полученных на первом и втором этапах лабораторных испытаний, результаты которых представлены на рисунках 5.2-5.10.



**Рисунок 5.2 – Контрольные карты (а) и вариативность (б) толщины МДО-покрытий на образцах сплава АМг6, сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин**

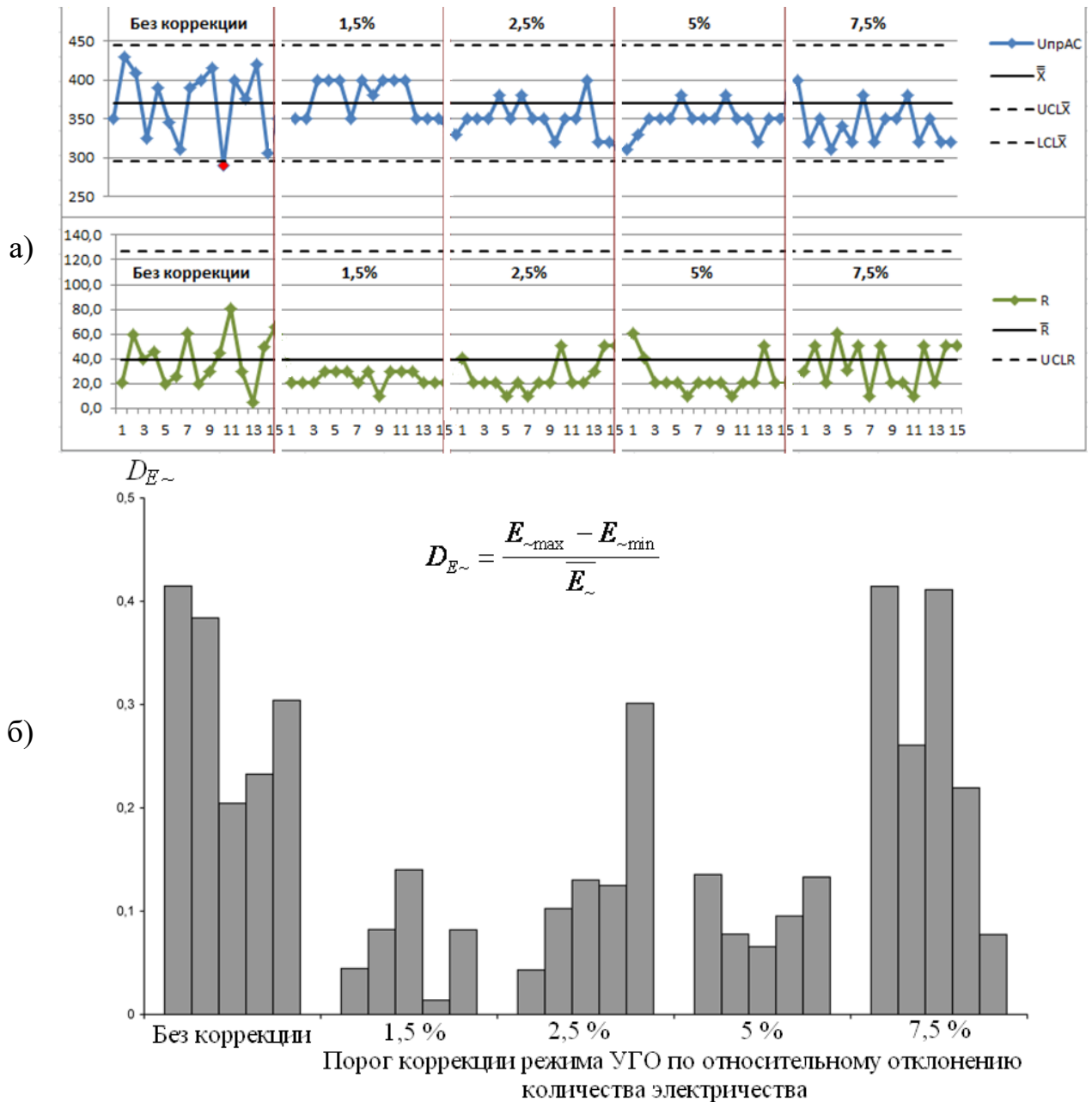


**Рисунок 5.3 – Контрольные карты (а) и вариативность (б) сквозной пористости МДО-покрытий на образцах сплава АМг6, сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин**



**Рисунок 5.4 – Контрольные карты (а) и вариативность (б) электрической прочности на постоянном токе МДО-покрытий на образцах сплава АМгб, сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин**





**Рисунок 5.5 – Контрольные карты (а) и вариативность (б) электрической прочности на переменном токе МДО-покрытий на образцах сплава АМгб, сформированных при параллельной обработке в течение 60 мин**

Результаты исследований толщин МДО-покрытий, сформированных на группах образцов сплава АМгб в течение 60 мин, позволяют сделать вывод (рисунок 5.2), что лучшей повторяемостью (наименьшим размахом и вариативностью в пределах группы) обладают МДО-покрытия, сформированные с использованием УПО при 1,5% пороге коррекции режима по относительному отклонению количества электричества  $\Delta_{\text{пк}}$ .

Сквозная пористость покрытий у всех образцов, обработанных на первом и втором этапах испытаний, не превысила порог в 5% (таблицы 5.1-5.3), что

позволяет отнести эти покрытия к коррозионностойким. Вместе с тем, наименьшие значения сквозной пористости 1,8% достигнуты при применении УПО с  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ . Показатели повторяемости покрытия при этой коррекции более высокие, чем без коррекции режима (МДО без использования УПО), однако, несколько лучшими показателями обладают покрытия, сформированные при  $\Delta_{пқ} = 7,5\%$ . Последнее связано с более высокой 3,2 % сквозной пористостью. Поэтому можно утверждать, что лучшим для минимизации показателя сквозной пористости при параллельной обработки деталей является коррекция режима при  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ .

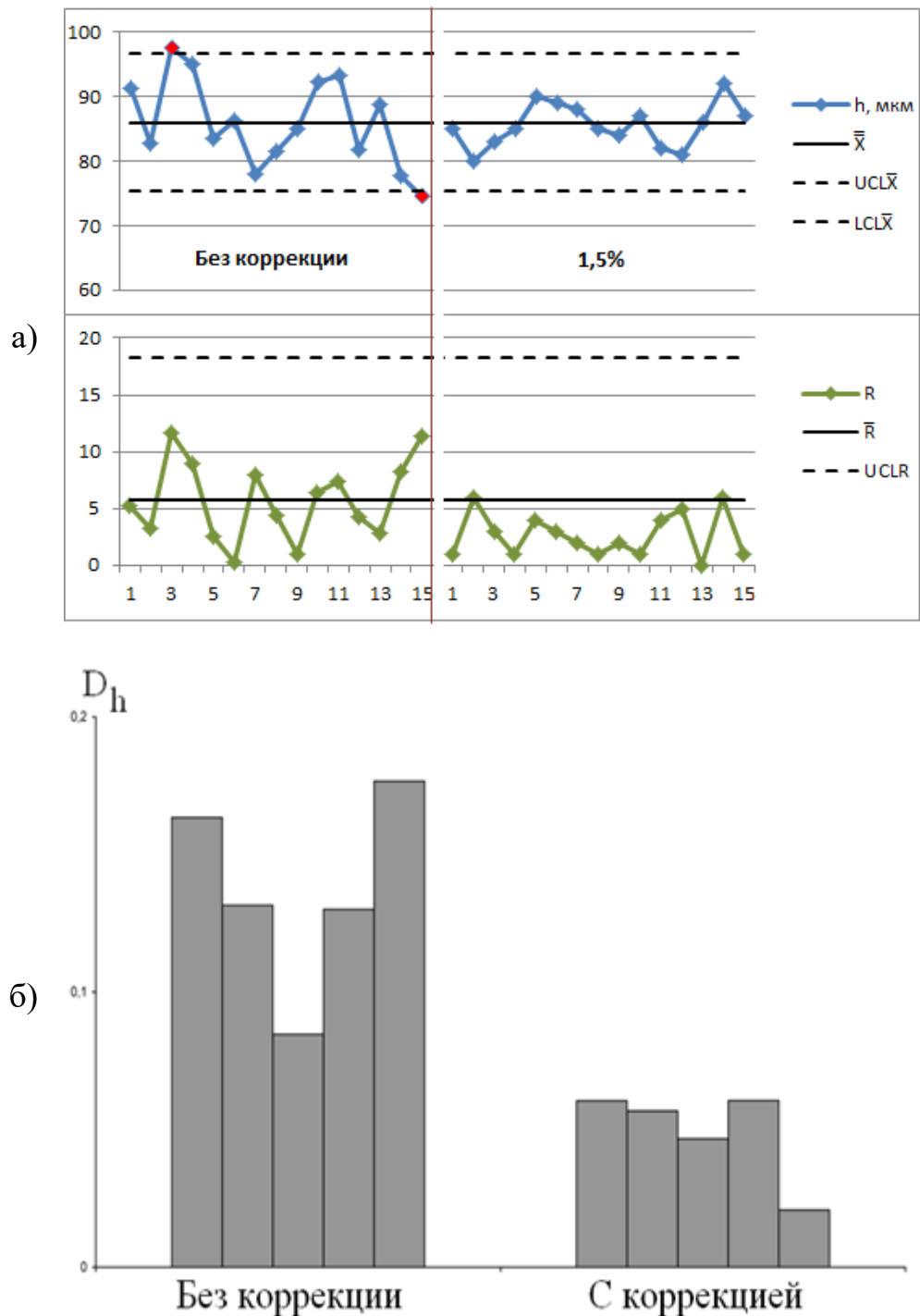
При исследованиях электрической прочности МДО-покрытий (рисунок 5.4, 5.5) наилучшим показателями повторяемости обладают покрытия сформированные при коррекции режима с помощью УПО при  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ .

Из анализа полученных результатов видно, что наилучшие показатели стабильности свойств покрытий наблюдается при коррекции режима их формирования с помощью УПО и наименьшем заданном пороге коррекции режима по относительному отклонению количества электричества  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ . Наименьшие показатели стабильности наблюдается при отсутствии коррекции режима обработки.

Таким образом, применение разработанного устройства позволяет повысить повторяемость результатов МДО при параллельной обработки. Лучшая повторяемость результатов достигается при наименьшем значении порога коррекции режима по относительному отклонению количества электричества  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$ .

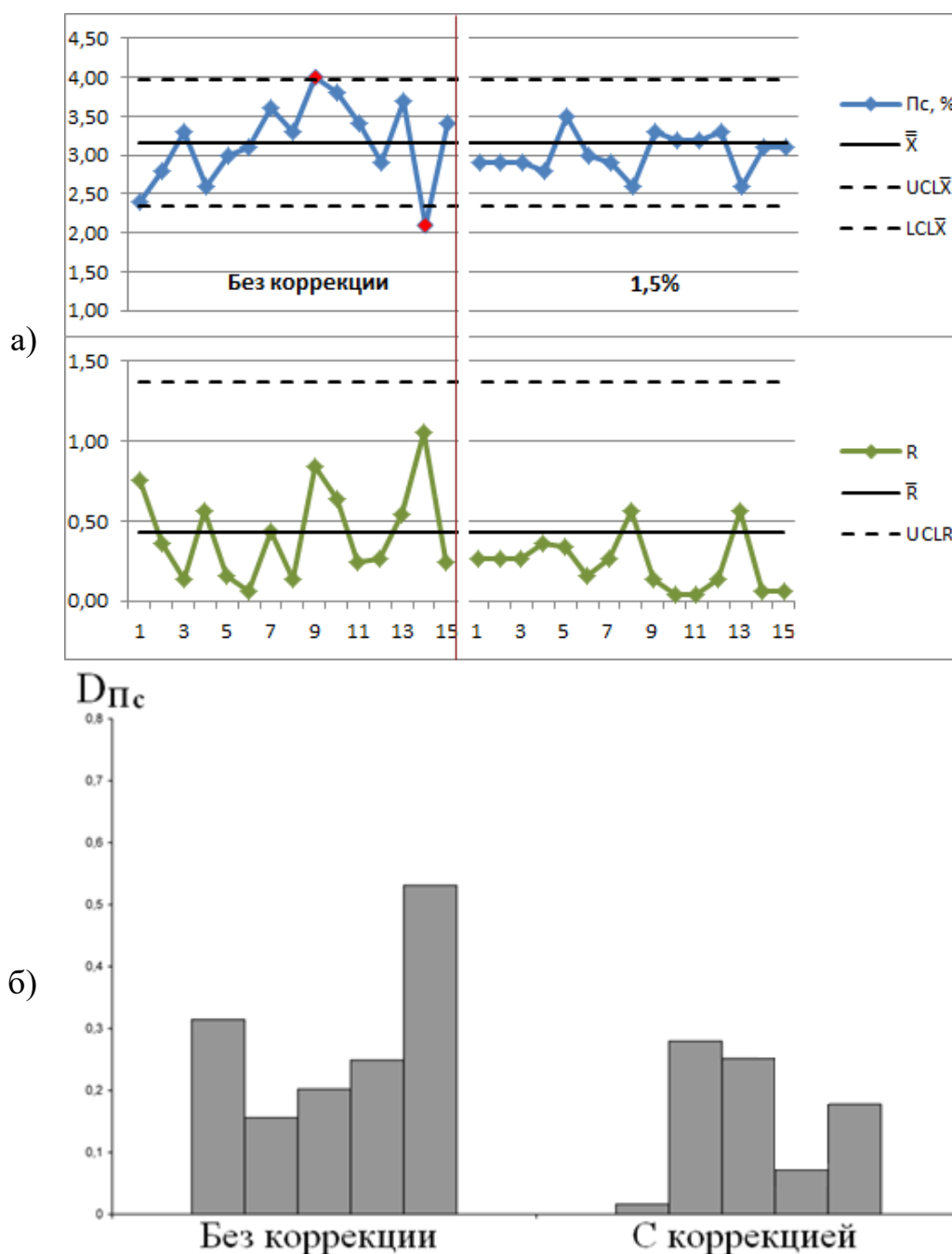
Значение  $\Delta_{пқ} = 1,5\%$  являлось уставкой режима коррекции при проведении дальнейших испытаний.

Результаты исследований толщин МДО-покрытий, сформированных на группах образцов сплава АМг6 в течение 180 мин (рисунок 5.6), показали, что при применении УПО уменьшается в среднем в два раза коэффициент вариативности этих толщин в пределах обрабатываемой группы.



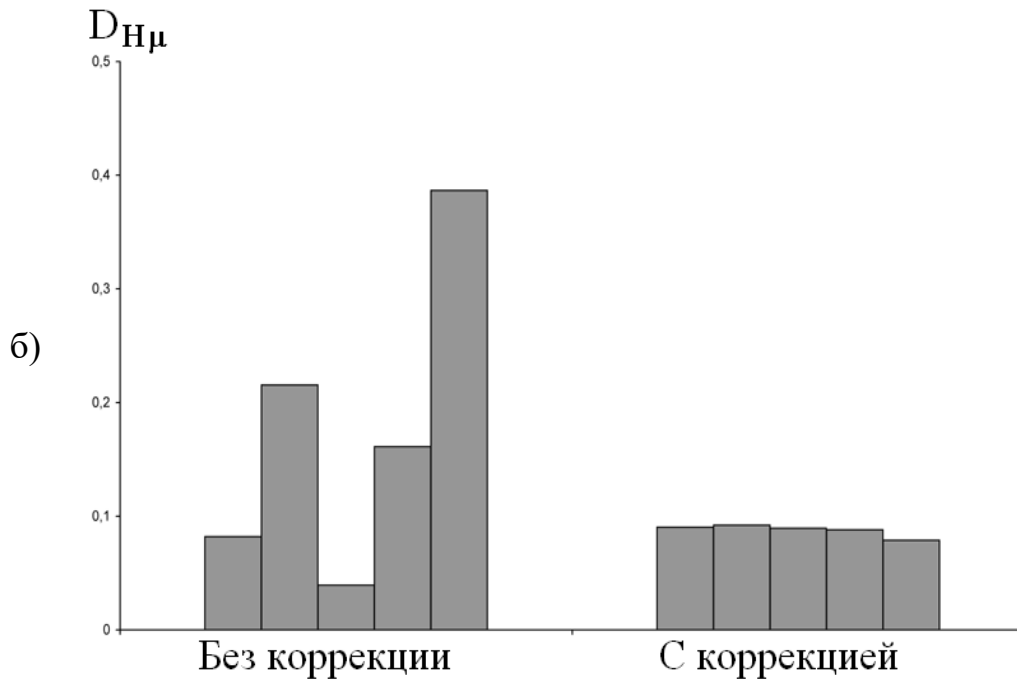
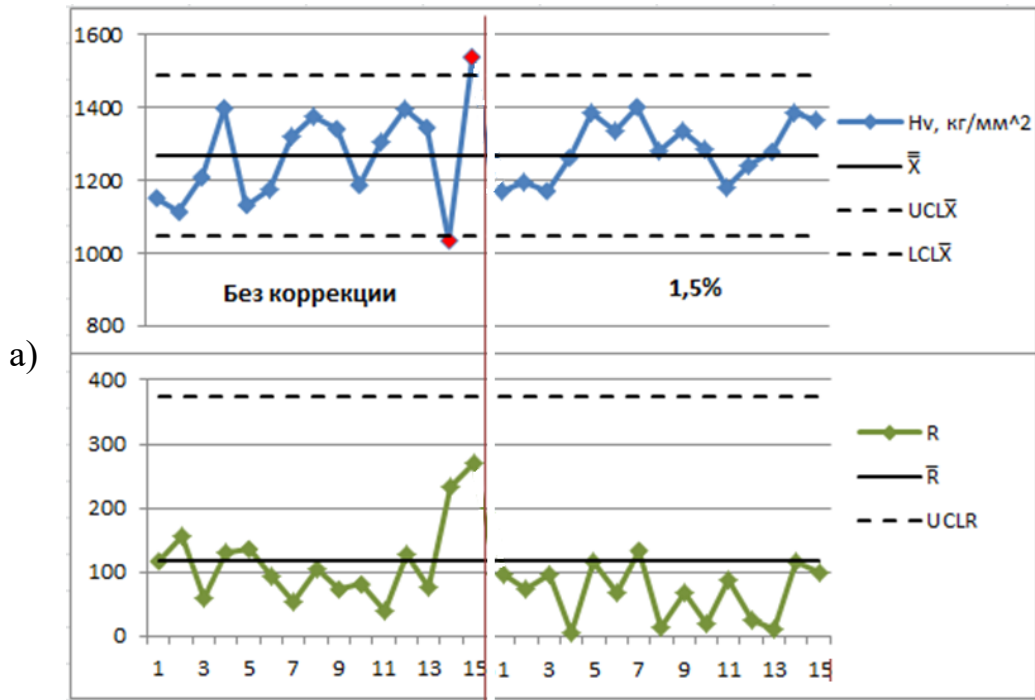
**Рисунок 5.6 – Среднее значение (а) и вариативность (б) толщины МДО-покрытий на образцах сплава АМгб, сформированных при параллельной обработке в течение 180 мин**

На стабильность значений сквозной пористости (рисунок 5.7 а) и её вариативность (рисунок 5.7 б) применение УПО также оказывает положительное влияние. На контрольной карте наблюдается в 1,4 раза меньшее значение разброса сквозной пористости покрытий (рисунок 5.7 а), получаемых с использованием УПО.



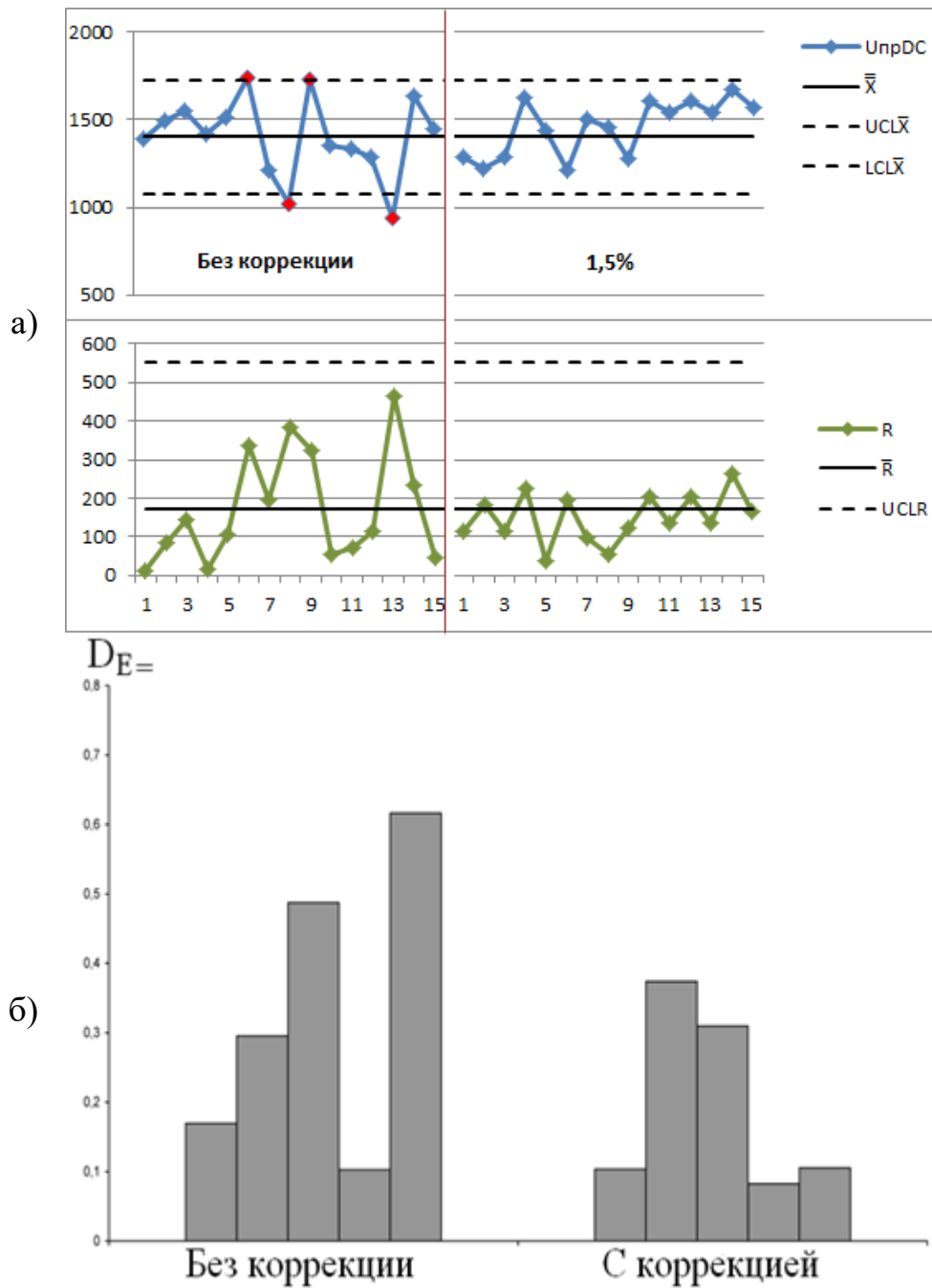
**Рисунок 5.7 – Среднее значение (а) и вариативность (б) сквозной пористости МДО-покрытий на образцах сплава АМгб, сформированных при параллельной обработке в течение 180 мин**

Результаты исследования микротвердости МДО-покрытий, полученных с использованием УПО (рисунок 5.8) показали, что примерно в 3 раза уменьшается коэффициента вариативности микротвердости (рисунок 5.8 б) в пределах группы обработки, что, несомненно, является положительным фактором характеризующим повторяемость покрытий.

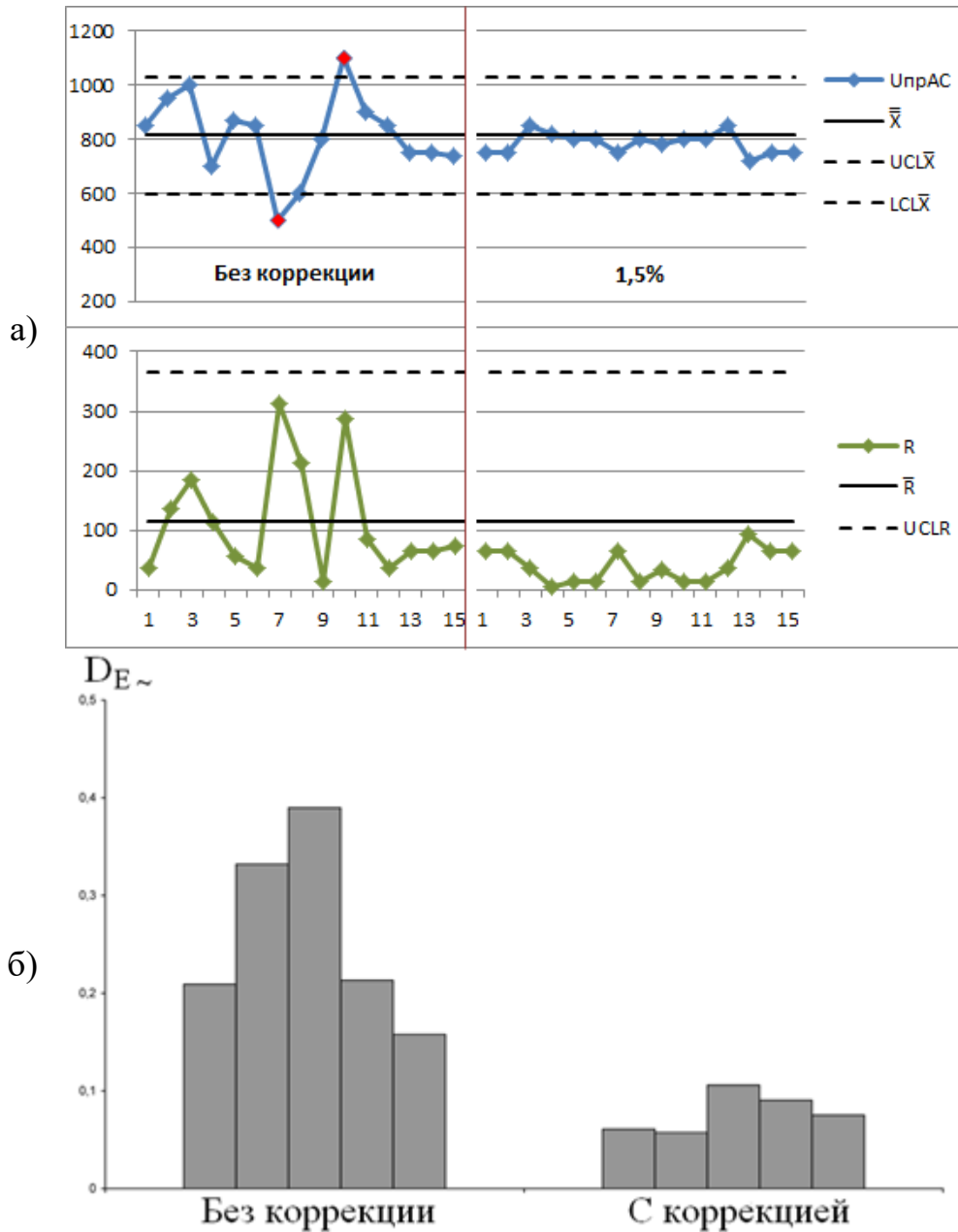


**Рисунок 5.8 – Контрольные карты (а) и вариативность (б) микротвердости МДО-покрытий на образцах сплава АМг6, сформированных при параллельной обработке в течение 180 мин**

При исследованиях электрической прочности МДО-покрытий (рисунок 5.9 - 5.10), установлено, что применение УПО не оказывает существенного влияния на параметры повторяемости электрической прочности покрытия на постоянном токе.



**Рисунок 5.9 – Среднее значение (а) и вариативность (б) электрической прочности на постоянном токе МДО-покрытий на образцах сплава АМгб, сформированных при параллельной обработке в течение 180 мин**



**Рисунок 5.10 – Среднее значение (а) и вариативность (б) электрической прочности на переменном токе МДО-покрытий на образцах сплава АМг6, сформированных при параллельной обработке в течение 180 мин**

Для электрической прочности покрытия на переменном токе применении УПО при формовке этого покрытия приводит к снижению, примерно, в два раза коэффициента вариативности этого свойства.

Вместе с тем, применение УПО существенно снижает интервалы изменения большинства исследованных свойств покрытий (рисунок 5.7, 5.8, 5.10). Следовательно, применение разработанного устройства позволяет повысить повторяемость результатов МДО при параллельной обработке в течение 180 мин.

На третьем этапе проверялась возможность использования УПО при МДО-обработке в одной ванне группы изделий различной площади. Результаты этого этапа испытаний представлены в таблице 5.5.

**Таблица 5.5 – Свойства МДО-покрытий, сформированных с применением УПО ( $\Delta_{пч}$ , = 1,5 %) на образцах сплава АМгб в течение 120 мин.**

| Площадь<br>S, дм <sup>2</sup> | Количество электричества |                              | Толщина<br>h, мкм | Сквозная пористость<br>Ps, % | Напряжение электрического пробоя U, В |     | Электрическая прочность E, В/мкм |      | Микротвердость<br>H <sub>ц</sub> , кг/мм <sup>2</sup> |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------------------------|-----|----------------------------------|------|---|
|                               | Q, А·ч                   | удел. q, А·ч/дм <sup>2</sup> |                   |                              | =                                     | ~   |                                  |      |   |
| 0,1                           | 1,81                     | 18,1                         | 51                | 8,2                          | 810                                   | 390 | 15,9                             | 10,8 | 1052  |
| 0,5                           | 8,88                     | 17,8                         | 59                | 10                           | 1100                                  | 390 | 18,6                             | 9,3  | 1084  |
| Среднее значение              |                          | 17,9                         | 55                | 9,1                          | -                                     | -   | 17,3                             | 10,1 | 1068  |
| Относительное отклонение      |                          | 0,02                         | 0,15              | 0,2                          | -                                     | -   | 0,16                             | 0,15 | 0,03  |

Относительные отклонения между показателями однотипных свойств покрытий на образцах неравной площади (таблица 5.4) составили от 3 % (микротвердость) до 20% (сквозная пористость). Полученные отклонения не существенно отличаются от аналогичных у контрольной группы образцов. Такой результат позволяет признать перспективным использование разработанного устройства при параллельном МДО изделий с неравной обрабатываемой площадью.

Положительные результаты проведенных экспериментов позволяют сделать заключение об успешном прохождении лабораторных испытаний разработанным устройством параллельной обработки деталей.

В ходе первого этапа лабораторных испытаний было выполнено МДО контрольных групп образцов без применения УПО, проведены измерения свойств сформированных МДО-покрытий и осуществлена статистическая обработка данных. Результаты этих измерений и обработки представлены в таблицах 5.6, 5.7.



**Таблица 5.6 – Свойства МДО-покрытий, сформированных на образцах сплава АМгб в течение 60 мин.**

| Образец                |                          | Балластная емкость ТИТ, мкФ | Толщина h, мкм |         | Сквозная пористость Пс, % |           |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|---------|---------------------------|-----------|
| №                      | площадь, дм <sup>2</sup> |                             | индивид.       | средняя | индивид.                  | средняя   |
| 1                      | 0,1                      | 10                          | 21             | 22 ± 2  | 2,85                      | 2,8 ± 0,5 |
| 2                      | 0,1                      | 10                          | 23,5           |         | 3,02                      |           |
| 3                      | 0,1                      | 10                          | 22             |         | 2,52                      |           |
| 4                      | 0,2                      | 20                          | 19             | 19 ± 2  | 2,2                       | 2,5 ± 1   |
| 5                      | 0,2                      | 20                          | 18,5           |         | 3,2                       |           |
| 6                      | 0,2                      | 20                          | 21             |         | 1,9                       |           |
| 7                      | 0,5                      | 50                          | 18,3           | 20 ± 3  | 3,45                      | 3,5 ± 1   |
| 8                      | 0,5                      | 50                          | 21,6           |         | 4,02                      |           |
| 9                      | 0,5                      | 50                          | 19,4           |         | 2,75                      |           |
| 10                     | 1                        | 100                         | 25,2           | 24 ± 6  | 7,82                      | 6 ± 3     |
| 11                     | 1                        | 100                         | 20,5           |         | 4,8                       |           |
| 12                     | 1                        | 100                         | 27,1           |         | 6,55                      |           |
| 13                     | 2                        | 200                         | 31,2           | 27 ± 7  | 5,3                       | 6 ± 2     |
| 14                     | 2                        | 200                         | 25,6           |         | 6,2                       |           |
| 15                     | 2                        | 200                         | 24,4           |         | 7,5                       |           |
| <b>Общее значение:</b> |                          |                             |                | 23 ± 2  |                           | 4 ± 1     |

На втором этапе испытаний были выяснены допустимые варианты размещения ведомого и ведущего образцов при МДО-обработке с использованием УПО:

а). Вариант I – ведущий и ведомый образцы обрабатываются общей электролитной ванне;

б). Вариант II – ведущий и ведомый образцы обрабатываются общей электролитной ванне, причем ведущий образец размещается в электрическом водонепроницаемом экране;

в). Вариант III – ведущий и ведомый образцы обрабатываются в отдельных электролитных ваннах.

**Таблица 5.7 – Свойства МДО-покрытий, сформированных на образцах сплава АМгб в течение 120 мин.**

| Образец                |                          | Балластная емкость ТИТ, мкФ | Толщина h, мкм |         | Сквозная пористость Пс, % |           | Микротвердость Н <sub>μ</sub> , кг/мм <sup>2</sup> |            |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|---------|---------------------------|-----------|--|------------|
| №                      | площадь, дм <sup>2</sup> |                             | инд.           | средняя | инд.                      | средняя   | инд.   | средняя    |
| 16                     | 0,1                      | 10                          | 43             | 40 ± 7  | 2,0                       | 2,1 ± 0,4 | 1067   | 1100 ± 150 |
| 17                     | 0,1                      | 10                          | 36             |         | 1,9                       |           | 1180   |            |
| 18                     | 0,1                      | 10                          | 41             |         | 2,35                      |           | 1003   |            |
| 19                     | 0,2                      | 20                          | 34             | 36 ± 6  | 1,9                       | 2,1 ± 0,4 | 1086   | 1000 ± 300 |
| 20                     | 0,2                      | 20                          | 35             |         | 2,33                      |           | 1170   |            |
| 21                     | 0,2                      | 20                          | 40             |         | 2,11                      |           | 838  |            |
| 22                     | 0,5                      | 50                          | 36             | 40 ± 6  | 3,45                      | 3 ± 1,2   | 1048   | 1100 ± 100 |
| 23                     | 0,5                      | 50                          | 42             |         | 4,02                      |           | 1131   |            |
| 24                     | 0,5                      | 50                          | 41             |         | 2,75                      |           | 1022   |            |
| 25                     | 1                        | 100                         | 48             | 46 ± 5  | 1,91                      | 2,1 ± 0,4 | 914  | 1100 ± 350 |
| 26                     | 1                        | 100                         | 46             |         | 2,32                      |           | 1212   |            |
| 27                     | 1                        | 100                         | 43             |         | 2,08                      |           | 1259   |            |
| 28                     | 2                        | 200                         | 57             | 54 ± 7  | 2,32                      | 3 ± 2,2   | 837  | 850 ± 60   |
| 29                     | 2                        | 200                         | 55             |         | 2,11                      |           | 891  |            |
| 30                     | 2                        | 200                         | 50             |         | 4,24                      |           | 825  |            |
| <b>Общее значение:</b> |                          |                             | 43 ± 4         |         | 2,5 ± 0,4                 |           | 1030 ± 80  |            |

Варианты размещения были сопоставлены по коэффициенту вариации ( $\gamma, \%$ ) среднего значения ( $C_{удв}$ , мкФ /дм<sup>2</sup>) удельной балластной емкости ТИТ, полученного при выборе этой емкости с помощью УПО, от требуемого значения  $C_{удт}=100$  мкФ/дм<sup>2</sup>:

$$\gamma = \frac{|\overline{C_{удв}} - C_{удт}|}{C_{удт}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

$$C_{убв} = \frac{C_B}{S_0}, \quad (5.2)$$

где  $S_0$  – площадь ведомого образца, дм<sup>2</sup>;  $C_B$  – значение емкости балластного конденсатора ТИТ, выбранное с помощью УПО. Результаты испытаний приведены в таблицах 5.8-5.10

**Таблица 5.8 – Оценка относительной погрешности выбора УПО удельной емкости балластного конденсатора ТИТ при размещении ведущего и ведомого образцов в общей электролитной ванне**

| Ведомый образец |                                    | Выбранная УПО емкость ТИТ |  |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------|--|
| №               | площадь $S_o$ ,<br>дм <sup>2</sup> | абсолютная $C_v$ ,<br>мкФ | удельная $C_{удв}$ ,<br>мкФ/ дм <sup>2</sup> |
| 1               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 2               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 3               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 4               | 0,2                                | 15                        | 75   |
| 5               | 0,2                                | 15                        | 75   |
| 6               | 0,2                                | 15                        | 75   |
| 7               | 0,5                                | 30                        | 60   |
| 8               | 0,5                                | 35                        | 70   |
| 9               | 0,5                                | 30                        | 60   |
| 10              | 1                                  | 45                        | 45   |
| 11              | 1                                  | 50                        | 50   |
| 12              | 1                                  | 45                        | 45   |
| 13              | 2                                  | 90                        | 45   |
| 14              | 2                                  | 95                        | 47,5   |
| 15              | 2                                  | 105                       | 52,5   |

**Среднее значение:**

70 ± 11

**Коэффициент вариации  $\gamma$ , %:**

33

На основании анализа данных таблиц 5.8-5.10 можно сделать вывод, что наилучшие результаты ( $\gamma=7,5$  %) применения УПО достигаются при размещении ведущего и ведомого образцов в разных ваннах. Это вариант размещения будет реализован при проведении дальнейших испытаний.

Можно признать допустимым ( $\gamma \approx 11$  %) вариант размещения ведомого и ведущего образцов в общей электролитной ванне и электрическим экранированием ведущего образца. Вариант же размещения без электрического экрана в общей ванне не приемлем из-за высокой погрешности  $\gamma \approx 33$  % выбора тока при МДО-обработке.

Полученные результаты можно объяснить влиянием электромагнитных полей, создаваемых при протекании токов через электролит, на процессы МДО деталей, обрабатываемых одновременно в общей электролитной ванне.

**Таблица 5.9 – Оценка относительной погрешности выбора УПО удельной емкости балластного конденсатора ТИТ при размещении ведущего и ведомого образцов в общей электролитной ванне с экранированием**

| Ведомый образец |                                    | Выбранная УПО емкость ТИТ |  |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------|--|
| №               | площадь $S_o$ ,<br>дм <sup>2</sup> | абсолютная $C_v$ ,<br>мкФ | удельная $C_{удв}$ ,<br>мкФ/ дм <sup>2</sup> |
| 1               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 2               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 3               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 4               | 0,2                                | 20                        | 100  |
| 5               | 0,2                                | 20                        | 100  |
| 6               | 0,2                                | 20                        | 100  |
| 7               | 0,5                                | 45                        | 90   |
| 8               | 0,5                                | 50                        | 100  |
| 9               | 0,5                                | 50                        | 100  |
| 10              | 1                                  | 75                        | 75   |
| 11              | 1                                  | 75                        | 75   |
| 12              | 1                                  | 70                        | 70   |
| 13              | 2                                  | 155                       | 77,5   |
| 14              | 2                                  | 155                       | 77,5   |
| 15              | 2                                  | 150                       | 75   |

Среднее значение:  $90 \pm 7$

Коэффициент вариации  $\gamma$ , %: 10,6

На третьем этапе проверялась возможность использования УПО в технологиях МДО. В ходе этих испытаний ведомый и ведущий образцы размещались в разных электролитных ваннах. Результаты этого этапа испытаний представлены в таблицах 5.11, 5.12.

После этого были сопоставлены свойства покрытий сформированных на 1 и 3 этапах испытаний (рисунок 5.11-5.13).

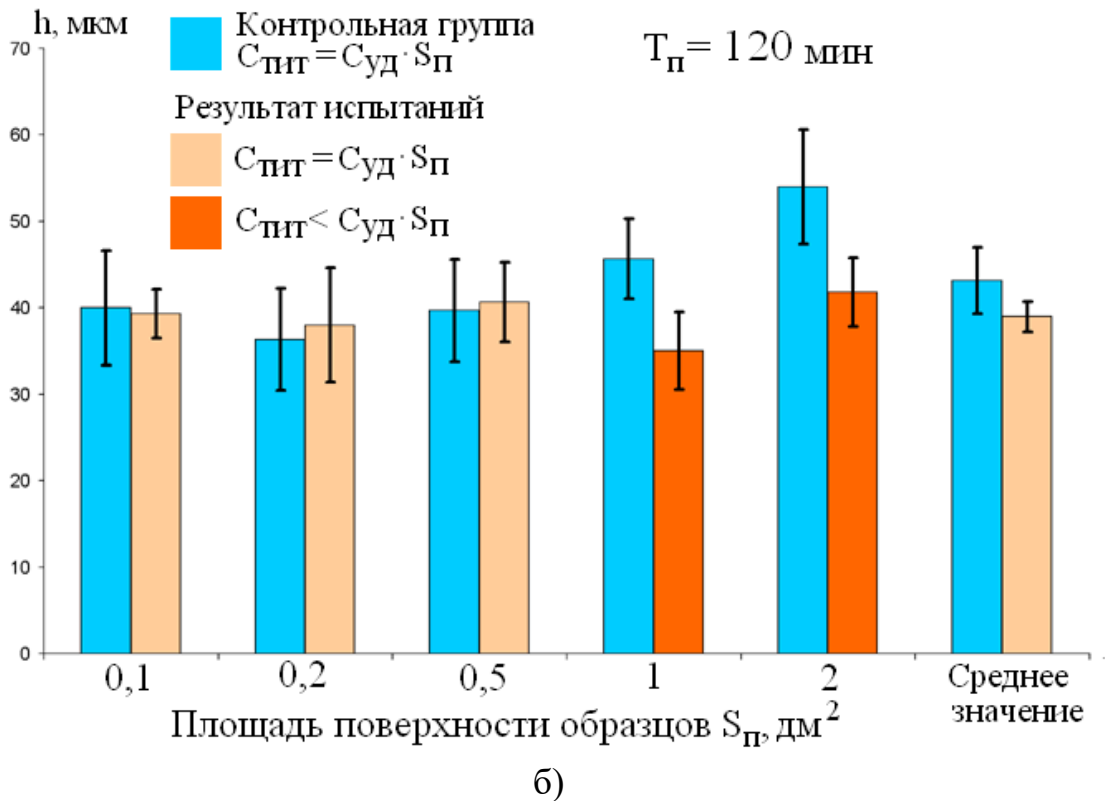
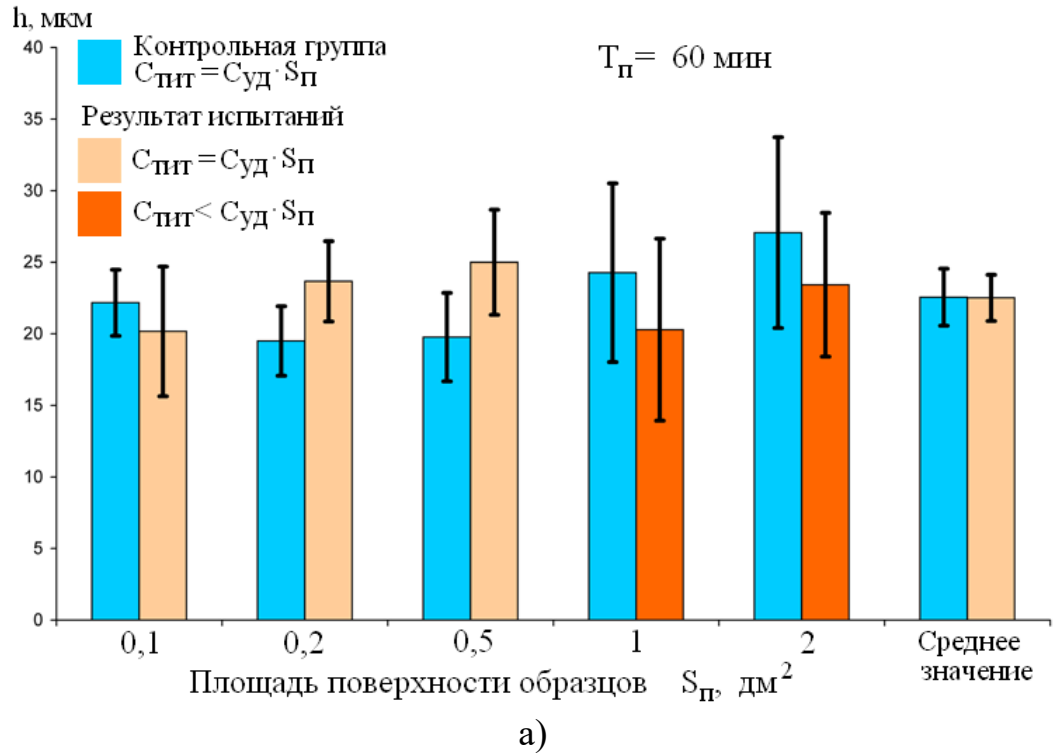
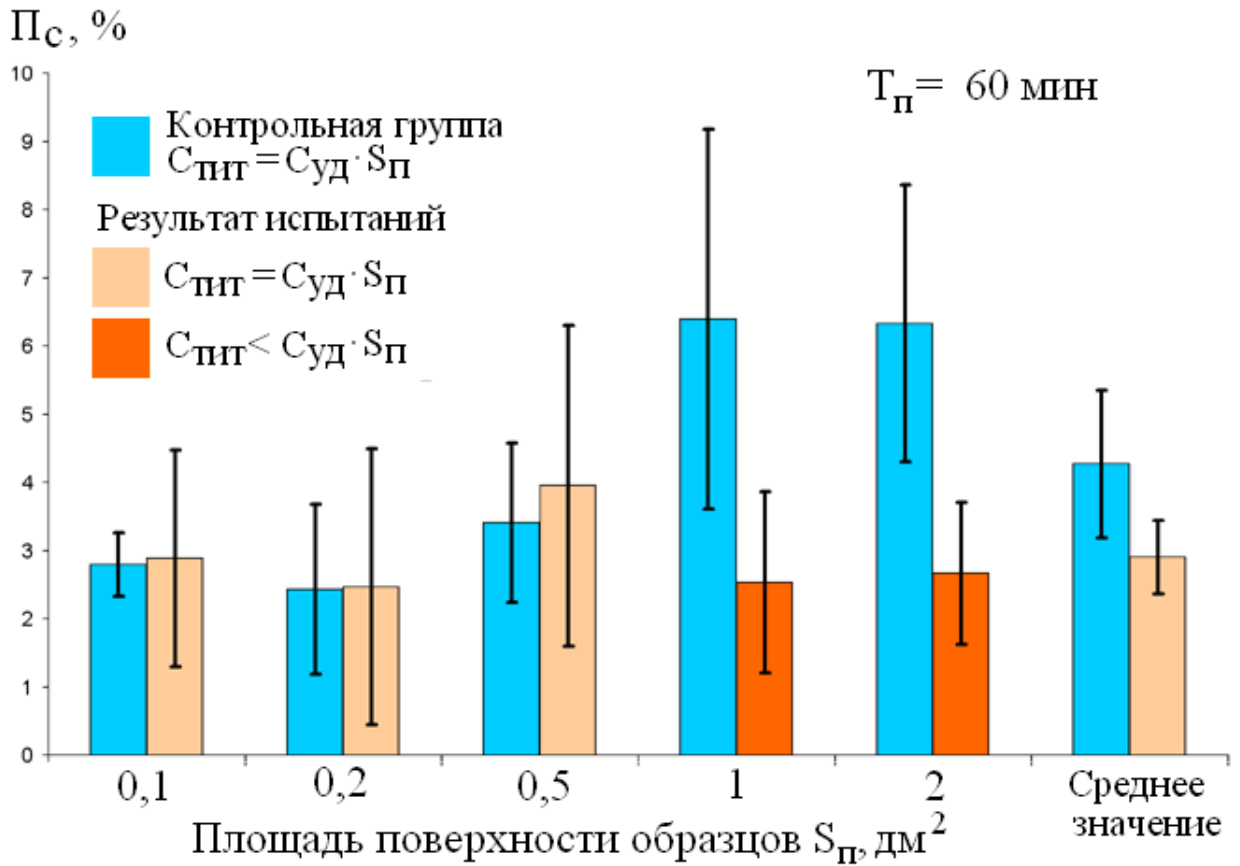
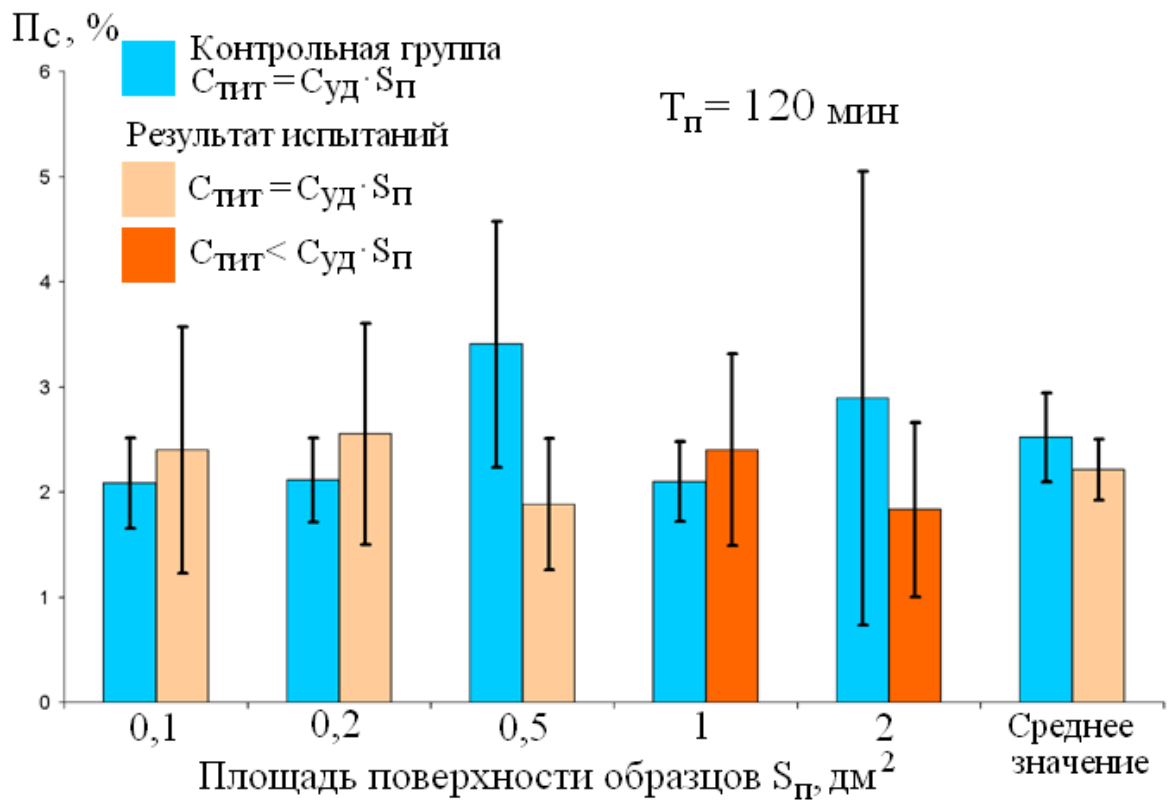


Рисунок 5.11 – Толщина МДО-покрытий, сформированных на сплаве АМг6 в течение 60 (а) и 120 (б) мин.

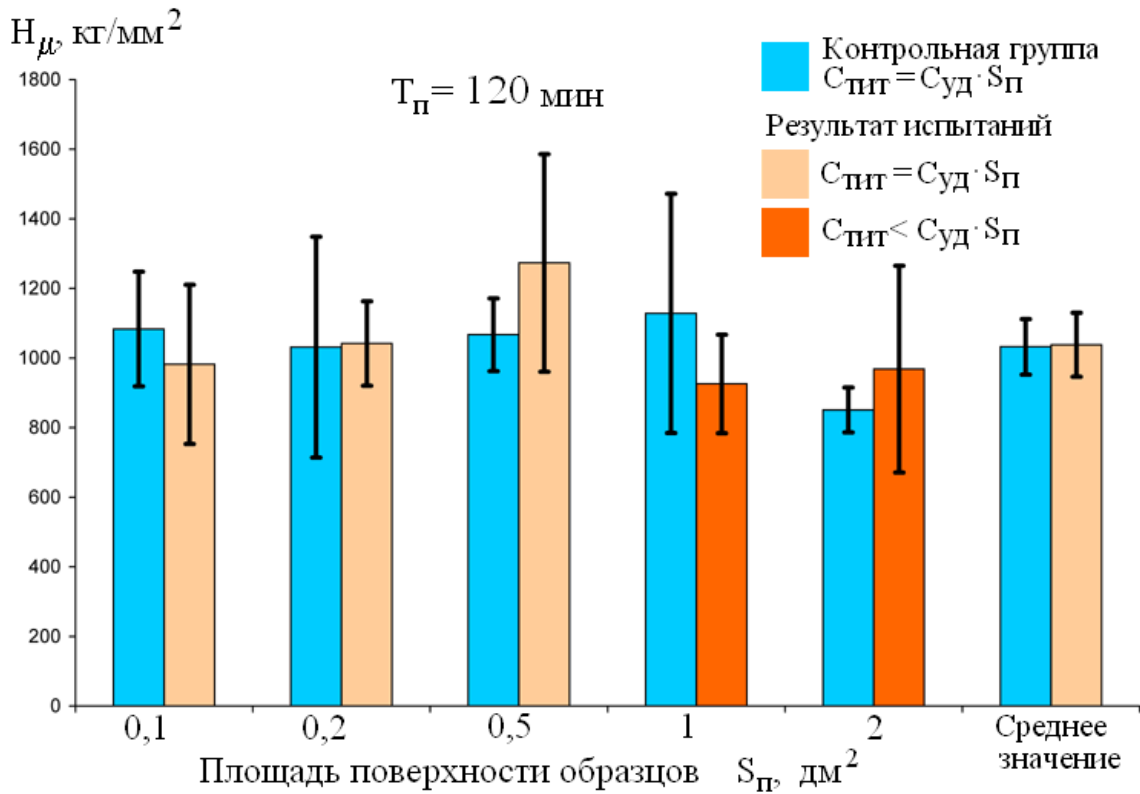


а)



б)

Рисунок 5.12 – Сквозная пористость МДО-покрытий, сформированных на сплаве АМг6 в течение 60 (а) и 120 (б) мин.



**Рисунок 5.13 – Микротвердость МДО-покрытий, сформированных на сплаве АМг6 в течение 120 мин.**

Анализ результатов выбора емкости балластного конденсатора ТИТ с помощью УПО (таблицы 5.11, 5.12), показывает, что этот выбор корректен, если площадь ведущего образца составляет не менее 20% от площади ведомого (образцы 1-9 в таблице 5.11 и 16-24 в таблице 5.12).

Если же эта площадь составляет 5-10% от площади ведомого образца, то необходимо при выборе емкости конденсатора ТИТ использовать повышающий коэффициент 1,2-1,3 (образцы 9-15 в таблице 5.11 и 25-30 в таблице 5.12). На Рисунок 5.11-5.13 свойства покрытий, сформированных при корректном выборе емкости ТИТ на третьем этапе испытаний, выделены бежевым цветом, а при заниженном – красным.

**Таблица 5.10 – Оценка относительной погрешности выбора УПО удельной емкости балластного конденсатора ТИТ при размещении ведущего и ведомого образцов в разных электролитных ваннах.**

| Ведомый образец |                                    | Выбранная УПО емкость ТИТ |  |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------|--|
| №               | площадь $S_o$ ,<br>дм <sup>2</sup> | абсолютная $C_v$ ,<br>мкФ | удельная $C_{удв}$ ,<br>мкФ/ дм <sup>2</sup> |
| 1               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 2               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 3               | 0,1                                | 10                        | 100  |
| 4               | 0,2                                | 20                        | 100  |
| 5               | 0,2                                | 20                        | 100  |
| 6               | 0,2                                | 20                        | 100  |
| 7               | 0,5                                | 50                        | 100  |
| 8               | 0,5                                | 50                        | 100  |
| 9               | 0,5                                | 50                        | 100  |
| 10              | 1                                  | 80                        | 80   |
| 11              | 1                                  | 85                        | 85   |
| 12              | 1                                  | 75                        | 75   |
| 13              | 2                                  | 160                       | 80   |
| 14              | 2                                  | 170                       | 85   |
| 15              | 2                                  | 165                       | 82,5   |

Среднее значение:  $92 \pm 5$

Коэффициент вариации  $\gamma$ , %: 7,5

При корректном выборе с помощью УПО емкости балластного конденсатора ТИТ показатели свойств сформированных МДО-покрытий находятся в пределах изменений (рисунок 5.11-5.13) аналогичных показателей свойств покрытий контрольной группы образцов. Это позволяет сделать вывод, что использование УПО не ухудшает условий формирования МДО-покрытий.

**Таблица 5.11 – Свойства МДО-покрытий, сформированных на образцах сплава АМгб в течение 60 мин с использованием УПО.**

| Образец |                          | Балластная емкость ТИТ, мкФ | Толщина $h$ , мкм |              | Сквозная пористость $P_s$ , % |             |
|---------|--------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------|-------------------------------|-------------|
| №       | площадь, дм <sup>2</sup> |                             | индивид.          | средняя      | индивид.                      | средняя     |
| 1       | 0,1                      | 10                          | 19                | $20 \pm 4,5$ | 2,9                           | $3 \pm 1,6$ |
| 2       | 0,1                      | 10                          | 23                |              | 2,02                          |             |
| 3       | 0,1                      | 10                          | 19                |              | 3,75                          |             |
| 4       | 0,2                      | 20                          | 25                | $24 \pm 3$   | 3,2                           | $2,5 \pm 2$ |
| 5       | 0,2                      | 20                          | 22                |              | 1,2                           |             |



Продолжение таблица 5.11

|                        |     |     |    |        |         |           |
|------------------------|-----|-----|----|--------|---------|-----------|
| 6                      | 0,2 | 20  | 24 |        | 3       |           |
| 7                      | 0,5 | 50  | 25 | 25 ± 4 | 5,3     | 4 ± 2     |
| 8                      | 0,5 | 50  | 27 |        | 3,8     |           |
| 9                      | 0,5 | 50  | 23 |        | 2,75    |           |
| 10                     | 1   | 85  | 21 | 20 ± 6 | 3,25    | 2,5 ± 1,3 |
| 11                     | 1   | 80  | 16 |        | 1,8     |           |
| 12                     | 1   | 85  | 23 |        | 2,55    |           |
| 13                     | 2   | 170 | 27 | 23 ± 5 | 3,3     | 2,5 ± 1   |
| 14                     | 2   | 175 | 22 |        | 2,2     |           |
| 15                     | 2   | 175 | 21 |        | 2,5     |           |
| <b>Общее значение:</b> |     |     |    | 22 ± 2 | 2,9±0,6 |           |

**Таблица 5.12 – Свойства МДО-покрытий, сформированных на образцах сплава АМгб в течение 120 мин с использованием устройства УПО**

| Образец                |                          | Балластная емкость ТИТ, мкФ | Толщина h, мкм |          | Сквозная пористость Пс, % |           | Микротвердость Н <sub>μ</sub> , кг/мм <sup>2</sup> |            |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|----------|---------------------------|-----------|--|------------|
| №                      | площадь, дм <sup>2</sup> |                             | инд.           | средняя  | инд.                      | средняя   | инд.   | средняя    |
| 16                     | 0,1                      | 10                          | 39             | 39 ± 3   | 1,85                      | 2,4 ± 1,2 | 948  | 1000 ± 200 |
| 17                     | 0,1                      | 10                          | 41             |          | 3,1                       |           | 878  |            |
| 18                     | 0,1                      | 10                          | 38             |          | 2,25                      |           | 1120   |            |
| 19                     | 0,2                      | 20                          | 37             | 38 ± 7   | 3,2                       | 2,5 ± 1   | 1100   | 1000± 100  |
| 20                     | 0,2                      | 20                          | 35             |          | 2,35                      |           | 970  |            |
| 21                     | 0,2                      | 20                          | 42             |          | 2,11                      |           | 1055   |            |
| 22                     | 0,5                      | 50                          | 38             | 41 ± 6   | 2,15                      | 1,9 ± 0,6 | 1100   | 1300 ± 300 |
| 23                     | 0,5                      | 50                          | 41             |          | 2                         |           | 1280   |            |
| 24                     | 0,5                      | 50                          | 43             |          | 1,5                       |           | 1440   |            |
| 25                     | 1                        | 100                         | 36             | 35 ± 4,5 | 1,9                       | 2,4 ± 0,9 | 1005   | 900 ± 150  |
| 26                     | 1                        | 100                         | 37             |          | 2,4                       |           | 851  |            |
| 27                     | 1                        | 100                         | 32             |          | 2,9                       |           | 921  |            |
| 28                     | 2                        | 200                         | 44             | 42 ± 4   | 1,4                       | 1,8 ± 0,8 | 915  | 1000 ± 300 |
| 29                     | 2                        | 200                         | 41             |          | 1,8                       |           | 1150   |            |
| 30                     | 2                        | 200                         | 40             |          | 2,3                       |           | 840  |            |
| <b>Общее значение:</b> |                          |                             |                | 39 ± 2   | 2,2 ± 0,3                 |           | 1000 ± 100   |            |

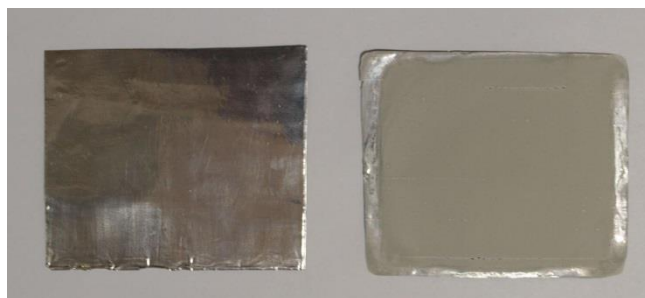
### 5.3. Результаты внедрения

В ходе выполнения диссертационной работы была создана автоматизированная система управления, размещенная в технологическом источнике тока ТИТ МДО-100Г (рисунок 5.14). Этот источник оснащен устройством параллельной обработки деталей. С 2014 г. ТИТ МДО-100Г внедрен в учебный и научный процессы лаборатории МДО кафедры ТППИСУЛА МАТИ.

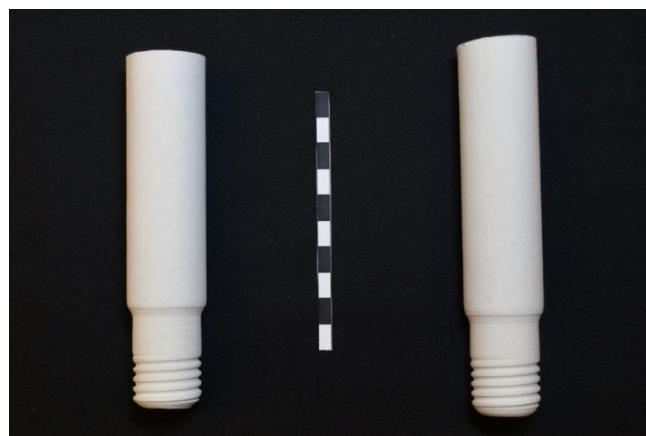


**Рисунок 5.14 – Автоматизированный технологический источник тока МДО-100Г для параллельной и индивидуальной обработки деталей методом микродугового оксидирования**

Источник МДО-100Г применяется в научных исследованиях кафедры [18], а также при обработке мелких и средних серий деталей. В частности, на МДО-100Г для изготовления мембран тензодатчиков была оксидирована алюминиевая фольга (рисунок 5.15 а), для защиты от коррозии подверглись МДО-обработке алюминиевые корпуса светодиодных ламп (рисунок 5.15 б), корпуса фотографических камер (рисунок 5.15 в), элементы корпусов (рисунок 5.15 г).



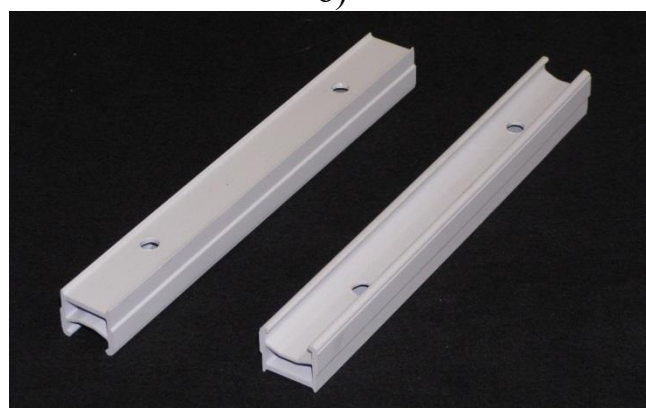
а)



б)



в)



г)

**Рисунок 5.15 – Фотографии деталей, подвергшихся МДО-обработке на разработанном оборудовании: а) мембрана тензодатчика; б) элемент корпуса светодиодной лампы; в) корпус фотокамеры; г) держатель корпуса.**

За срок эксплуатации этот ТИГ зарекомендовали себя как надежный в работе, удобный и простой в обслуживании.

#### 5.4. Выводы

1. Разработана методика экспериментальных исследований режимов формирования покрытий при МДО алюминиевом сплаве АМгб с помощью разработанной АСУ, оснащенной устройством параллельной обработки деталей.

2. Установлено, что после 60 мин МДО, наилучшие показатели свойств покрытий наблюдается при коррекции режима их формирования с помощью УПО и наименьшем заданном пороге коррекции режима по относительному отклонению количества электричества 1,5 %. Наименьшая стабильность наблюдается при отсутствии коррекции режима обработки. Однако при увеличении длительности МДО-процесса до 180 мин эта разница в показателях стабильности снижается. Таким образом, УПО наиболее эффективно применять при формировании относительно тонких МДО-покрытий.

3. Использование УПО при формировании твердых МДО-покрытий, позволяет снизить вариативность их микротвердости (рисунок 5.8) в 4 раза.

4. При МДО с использованием ведущего образца, его рекомендуемая площадь должна составлять не менее 20% от площади обрабатываемой детали. Если она составляет 5-10%, то необходимо при выборе емкости конденсатора ТИТ использовать повышающий коэффициент 1,2-1,3;

5. Разработанная АСУ была внедрена в составе ТИТ мощностью 100 кВА, оснащенного устройством параллельной обработки деталей. За время эксплуатации АСУ подтвердила высокую надежность (отсутствие отказов), простоту обслуживания и удобство эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Выявлены факторы, влияющие на стабильность свойств формируемых покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых деталей в условиях параллельной обработки. Установлено, что свойства покрытий, формируемых параллельно в одной электролитной ванне, могут существенно различаться из-за неравномерного распределения электрического тока через обрабатываемые образцы. Коэффициенты вариации толщин при этом могут достигать 25 %, сквозной пористости в 50 %, а микротвердости – 40 %;

2. Предложено физико-математическая модель процесса параллельной обработки, которая позволила обосновать способ автоматической коррекции режима при параллельной обработке, а также разработать способ автоматического определения площади поверхности детали сложной формы;

3. Разработана функциональная схема АСУ (патенты РФ 97734 и 135648), которые позволили впервые осуществлять автоматическую коррекцию технологического режима при параллельной обработке деталей;

4. Разработан алгоритм функционирования автоматизированной системы управления МДО-процесса, основанный на автоматической коррекции хода выполнения режима обработки по результатам анализа совокупности технологических параметров, условий функционирования МДО разряда и распределения электрического тока между обрабатываемыми поверхностями деталей.

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

В целом, в результате выполнения диссертационной работы была разработана, исследована и внедрена принципиально новая АСУ, позволяющая индивидуально для каждой детали корректировать режим МДО, что позволило существенно повысить качество и воспроизводимость получаемых покрытий при параллельной обработке.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- АОП – анодная оксидная пленка;
- АСУ – автоматизированная система управления;
- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
- БУТ – блок управления тиристорами;
- ВАК – Высшая Аттестационная Комиссия;
- КМП – контроль и мониторинг параметров;
- ЛКП – лакокрасочное покрытие
- МДО – микродуговое оксидирование;
- МДР – микродуговой разряд;
- МОЭ – металл оксид электролит;
- ОУ – операционный усилитель;
- ПК – персональный компьютер;
- ПЛК – программируемы логический контроллер;
- ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина;
- СИФУ – система импульсно фазового управления
- СПК – силовой полупроводниковый ключ;
- СУ – система управления;
- ТИТ – технологический источник тока;
- ТП – технологический процесс;
- ТПИСУЛА – технология производства приборов и информационных систем управления летательными аппаратами;
- УПО – устройство параллельной обработки.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Справочник-технолога приборостроителя. В 2-х томах / Под. ред. П.В. Сыроватченко (т.1), Е.А. Скороходова (т.2) – М.: Машиностроение, т. 1, 1980. – 607 с, 463 с.
2. Валетов В.А. Технология приборостроения: Учебное пособие/ В.А.Валетов, Ю.П.Кузьмин, А.А. Орлова, С.Д. Третьяков – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008 – 336 с.
3. Ларин В.П. Проектирование технологических процессов изготовления деталей приборов: Учебное пособие/ В.П. Ларин, Я.А. Поповская - СПб.: ГУАП, 2003. - 85 с.
4. Арзамасов Б.Н. Справочник по конструкционным материалам / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.- 640 с.
5. Дураджи В.Н. Нагрев металлов в электролитной плазме /В.Н. Дураджи, А.С. Парсаданян. - Кишинев, 1988г.-216с.
6. Солнцев Ю.П. Специальные материалы в машиностроении: Учебник для вузов. /Ю.П. Солнцев, Е.Н. Пряхин, В.Ю. Пирайнен - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2004. – 640 с.
7. Стекольников Ю.А. Физико-химические процессы в технологии машиностроения: Учеб. Пособие / Ю.А. Стекольников, Н.М. Стекольников — Елец: Издательство Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина, 2008
8. Корягин С.И. Способы обработки материалов: Учебное пособие / С.И.Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков - Калинингр. ун-т – Калининград, 2000. – 448 с.
9. Любимов Б.В. Защитные покрытия изделий: Справочник конструктора / Б.В. Любимов - Машиностроение», 1969 – 216 с.
10. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник в 2-х томах /Под ред. М.А. Шлугера, Л.Д. Тока. – М.: Машиностроение, том 2, 1985. – 248 с.
11. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия: Справочник по применению / Ю.Д. Гамбург– М.: Техносфера, 2006. – 216 с.



12. Инженерная гальванотехника в приборостроении / Под ред. д-ра техн. наук А. М. Гинберга.- М., «Машиностроение», 1977. 512 с. с ил.
13. Петров Л.Н. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л.Н. Петров, Н.Г. Сопрунюк – К.: Наукова Думка, 1991. – 216 с.
14. Суминов И.В. Микродуговое оксидирование (обзор) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, А.М. Борисов, Б.Л. Крит // Приборы. 2001. № 9, 10. – С. 13-23, 26-36.
15. Макаров Ю.Н. Перспективные технологии приборостроения /Ю.Н. Макаров, А.А Панич., С.В. Скородумов, Т.К. Шумова, И.М. Ягудин – Экономика, 2011. – 406 с.
16. Суминов И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б Людин., Б.Л. Крит , А.М. Борисов М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
17. Yerokhin A.L. Plasma electrolysis for surface engineering /A.L. Yerokhin, X. Nie, A Leyland., A. Matthews, S.J. Dowey // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 122. P. 73-93.
18. Суминов И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд и др. Под общ. ред. И.В. Суминова – М.: Техносфера, т. 2, 2011 – 512 с.
19. Малышев В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования: Автореферат дисс. на соиск. ученой ст. д.т.н: 05.02.04 / Малышев Владимир Николаевич. - Москва. 1999. – 54 с.
20. Гордиенко П.С. Микродуговое оксидирование титана и его сплавов/ П.С. Гордиенко, С.В. Гнеденков - Владивосток: Дальнаука, 1997. - 186 с.
21. Баковец В.В. Оксидные покрытия, полученные микродуговой обработкой титанового сплава в кислых электролитах/ В.В. Баковец // Изв. АН СССР. Неорг. Материалы. 1987. Т. 23, №7. - С. 1226-1228.
22. Руднев В.С. Цирконий содержащие оксидные слои на титане / В.С. Руднев, Д.Л. Богута, К.Н. Килин, П.М. Недозоров, Т.П. Яровая // Журнал физической химии. 2006. Т. 80, № 8. С. 1530-1531.

23. Руднев В.С. Оксидно-фосфатные слои с соединениями циркония на титане / В.С. Руднев, К.Н. Килин, П.М. Недозоров, А.Ю. Устинов, Т.П. Яровая, Т.А. Кайдалова // Защита металлов. 2007. Т. 43, № 6. С. 542-547.
24. Эпельфельд А.В. Технологические методы и средства формирования многофункциональных покрытий микродуговым оксидированием; автореф. дисс. на соиск. ученой ст. докт. техн. наук: 05.16.06 / Эпельфельд Андрей Валерьевич - М., 2007. - 38 с.
25. Ракоч А.Г. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом / А.Г. Ракоч, В.В. Хохлов, В.А. Баутин, Н.А. Лебедева, Ю.В. Магурова, И.В. Бардин // Защита металлов. 2006. Т. 42, № 2. С. 173-184.
26. Ракоч А.Г. Влияние катодной составляющей тока на кинетику роста микродуговых покрытий на поверхности алюминиевых сплавов / А.Г. Ракоч, А.В. Дуб, И.В. Бардин, П.М. Жаринов, И.И. Щедрина, В.Л. Ковалев // Коррозия: Материалы, Защита. 2008. № 11. С. 30-34.
27. Ракоч А.Г. К вопросу о влиянии комбинированных режимов на предельную толщину микродуговых покрытий / А.Г. Ракоч, А.В. Дуб, И.В. Бардин, В.Л. Ковалев, А.Г. Сеферян, И.И. Щедрина // Коррозия: Материалы, Защита. 2009. № 11. С. 32-36.
28. Людин В.Б. Управление процессом формирования наноструктур керамикоподобных покрытий в электротехнологиях микродугового оксидирования / В.Б. Людин, Л. П. Шичков, А.В. Эпельфельд // Наноэлектротехнологии в сельском хозяйстве: Материалы научно-технического семинара (ФГОУ ВПО МГАУ имени В.П. Горячкина 12-13 декабря 2006 г.) – Москва ФГНУ “Росинформагротех”, 2007. – С. 107-114
29. А.С. 526961 СССР (H0IG 9/24). Способ формовки анодов электрических конденсаторов / Марков Г.А., Маркова Г.В. // Оpubл. в Бюл. № 32. 1976.
30. Атлас технологий - <http://www.tech-atlas.net/atlas/17/an14579/>
31. Жуков С.В. Исследование процессов и разработка технологии формирования многофункциональных покрытий методом микродугового оксидирования на

- титановых сплавах в приборостроении : автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.14 / Жуков Сергей Владимирович.- Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ), 2009 – 26 с.
32. Кривенков А. О. Способы получения композиционных материалов на основе титана и циркония микродуговым оксидированием: автореферат дис. к. т. н.: 05.02.01 / Кривенков Алексей Олегович - Пенз. гос. ун-т Пенза, 2005 20 с.
33. Михайлов В.Н. Защита от коррозии химического оборудования из сталей, сплавов алюминия и циркония методом микроплазменного оксидирования из водных электролитов: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.17.14 / Михайлов Владимир Николаевич. - Моск. ин-т стали и сплавов Москва, 1994 22 с.
34. Саакян Л.С. Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтегазопромыслового оборудования / Л.С. Саакян, А.П. Ефремов, Л.Я. Ропяк, А.В. Эпельфельд - М.: ВНИИОЭНГ. 1986. - 60 с.
35. Саакян Л.С. Повышение долговечности деталей газоперерабатывающего и газопромыслового оборудования защитными покрытиями / Л.С. Саакян, А.П. Ефремов, А.В. Эпельфельд // Физико-химическая механика материалов. 1986. Т. 22. № 6. С. 92-94.
36. А.С. 1485670 СССР (С23С 28/00). Способ защиты от сульфидного растрескивания и износа / А. П. Ефремов, Г.А. Марков, Л.Я. Ропяк, Л.С. Саакян, А.В. Эпельфельд - Зарег. 1989.
37. Lasser H. Preparation of semiporous wafers of aluminum oxide by high voltage anodization / H. Lasser, G. Robinsen, B. Almaula // Amer. Ceram. Soc. Bull. 1971. V. 50. № 1-4. P. 165-169.
38. Суминов И.В. Новый способ формирования селективного слоя на фильтрующих элементах / И.В. Суминов, А.П. Ефремов, А.М. Борисов, А.В. Эпельфельд, К.Ю. Никоноров, О.С. Невская, О.Н. Дунькин // Сборник «Инженерная механика, материаловедение и надежность оборудования». – Новомосковск, 2000. С. 65-68.

39. Гаврилин В.И. Формирование защитных характеристик поверхностей алюминиевых сплавов методом микродугового оксидирования: автореферат дис. к.т.н.: 05.03.01 / Гаврилин Валентин Иванович - Тул. гос. ун-т Тула, 2003 19 с.
40. Миронова М.К. Пробой анодных оксидных пленок и их рост в режиме искрения / М.К. Миронова // Новосибирск, 1988. - С. 46.- Препринт/СО АН СССР, Ин-т неорганической химии; 88-9.
41. Гордиенко П.С. Элементный состав анодных пленок на сплаве НБЦУ, полученных при потенциалах искрения в водных электролитах / П.С. Гордиенко, П.М. Недозоров, А.Г. Завидная, Т.П. Яровая // Электронная обработка материалов. 1991. № 1. С. 38-41.
42. Patent 3,293,158 US (Cl. 204-56) Anodic Spark Reaction Processes and Articles / Mc Neil W., Gruss L.L. 1966.
43. Pat. 3.834.999 USA (C23B 4/02, 11/02). Electrolytic Production of Glassy Layers on Metals / Hradcovsky R.J., Kozak O.R.; 10.09.1974.
44. Pat. 3,812,023 USA (C23B 9/02). Anodic Production of Pigmented Siliceous Coatings for Aluminous Metals / Schardein D.J., Rogers C.M., Graig H.L.; 21.05.1974.
45. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов. – М.: Высш. шк., 1984. – 519 с.
46. Шичков Л.П. Энергосберегающая гальванотехнология нанесения МДО-покрытий / Л.П. Шичков, В.Б. Людин, А.В. Эпельфельд //Труды 2-й Международной научно-технической конференции "Энергосбережение в сельском хозяйстве". Часть 1.- М.: ВИЭСХ, 2000, С. 459-466.
47. Патент 1759041 РФ (С25D 11/02). Устройство для микродугового оксидирования вентильных металлов и сплавов / Залялетдинов И.К, Людин В.Б., Пазухин Ю.Б., Харитонов Б.В., Шичков, Л.П., Эпельфельд А.В. Зарег. 1.05.92.
48. Саакян Л.С. Влияние режимов микродугового оксидирования на защитные свойства формируемых покрытий / Л.С. Саакян, А.П. Ефремов, А.В.

- Эпельфельд, Б.В. Харитонов, В.Б. Людин // «Защита-92». М., 1992. Т. 1. Ч. 2. С. 225-227.
49. Патент РФ № 2112086. Способ нанесения электролитического покрытия на поверхности металлов и сплавов и электролитическое покрытие. / Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Суминов И.В., Борисов А.М.
50. Людин В.Б. Полупроводниковые преобразователи напряжения для специальных электротехнологических установок в сельском хозяйстве. Диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. по спец. 05.20.02: Людин Валерий Борисович. - М., 2006. - 309 с.
51. Булатов О.Г. Тиристорно-конденсаторные источники питания для электротехнологии / О.Г. Булатов, А.И. Царенко, В.Д. Поляков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.
52. Дунькин О.Н. Система цифрового управления и мониторинга установок плазменно-электролитической обработки. / О.Н. Дунькин, В.Б. Людин, И.В. Суминов, Л.П. Шичков, А.В. Эпельфельд. // Приборы, 2003, № 4, 5. – С. 30-44, 27-41.
53. Rakoch A.G. On the effect of combined welding modes on ultimate thickness of microarc coatings / A.G. Rakoch, A.V. Dub, I.V. Bardin, V.L. Kovalev, A.G. Seferyan, I.I. Tshchedrina // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2010. V. 46. № 7. P. 828–832.
54. Bardin I.V. New model conceptions of influence electric mode at the mechanism of microarc oxidation of aluminium alloys / I.V. Bardin, A.G. Chujko, A.G. Rakoch, P.M. Zharinov, I.I. Tschedrina // Eleventh international conference on plasma surface engineering conference and exhibition (PSE 2008) September 15-19, 2008 / Garmisch Partenkirchen (Germany).
55. Ракоч А.Г. Экзотермическое окисление дна каналов разрядов при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов / А.Г. Ракоч, Ю.В. Магурова, И.В. Бардин, Г.М. Эльхаг, П.М. Жаринов, В.Л. Ковалев // Коррозия: Материалы, Защита. 2007. № 12. С. 36-40.
56. Парфенов Е.В. управление технологическими процессами электролитно-

- плазменной обработки деталей энергетических машин на основе спектральных методов диагностики состояния объекта: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.13.06 / Парфенов Евгений Владимирович- Уфа, 2012.- 34 с.
57. EP 0563671, IPC Classification C 25 D 11/02. Process for electrolytical coating of material and so forth./ Mitin B.S., Suminov I.V., Epelfeld A.V., Fjodorov J.A.- Priority 25.03.92 date, publication date 06.10.93
58. Патент РФ 97732 (C25D 11/02). Устройство для микродугового оксидирования магниевых сплавов /Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М., Квернадзе А.В., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Сорокин И.В., Граменицкий М. Д., Васин В.А., Сомов О.В. Оpubл. в Бюл. № 26. 2010.
59. А.С. СССР 1624060 (C25D 11/02). Устройство для микродугового оксидирования вентильных металлов и их сплавов / Ефремов А.П., Залялетдинов И.К, Капустник А.И, Куракин И.Б., Пазухин Ю.Б., Ропяк Л.Я., Харитонов Б.В., Эпельфельд А.В. Оpubл. в Бюл. № 4. 1991.
60. Патент РФ 95671 (C25D 11/02). Устройство для микродугового оксидирования алюминиевых сплавов /Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М., Желтухин А.В., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Сорокин И.В., Граменицкий М. Д., Васин В.А., Сомов О.В. Оpubл. в Бюл. № 19. 2010.
61. Энергетическая электроника. Справочное пособие: Пер. с нем. / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
62. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. / Ю. К. Розанов - М.: Энергоатомиздат, 1992. 296 с.
63. Патент РФ 96868 (C25D 11/02). Устройство для микродугового оксидирования вентильных металлов и сплавов /Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М., Кабанова А.Д., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Сорокин И.В., Граменицкий М. Д., Васин В.А., Сомов О.В. Оpubл. в Бюл. № 23. 2010.
64. А.С. 1339818 СССР (H02M 5/257). Устройство для преобразования переменного напряжения в асимметрическое переменное / Марков Г.А., Шулепко Е.К., Терлеева О.П., Кириллов В.И., Федоров В.А., Кан А.Г.,

- Максутов Р.А., Глазунов В.П. Оpubл. в Бюл. № 35. 1987.
65. Людин В.Б. Управляемый преобразователь для обработки деталей микродуговым оксидированием // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2003, № 2. С. 24-26.
66. Патент РФ 95672 (С25D 11/02). Технологический источник тока для микродугового оксидирования металлов и сплавов /Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М., Гребенюк Е.И., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Сорокин И.В., Граменицкий М. Д., Васин В.А., Сомов О.В. Оpubл. в Бюл. № 19. 2010.
67. Патент РФ 2083731 (С25D11/02, С25D21/00) Устройство для микродугового оксидирования металлов и сплавов /Мамаев А.И., Савельев Ю.А., Рамазанова Ж.М. Оpubл 10.07.1997
68. Патент РФ 2112086 (С25D11/00) Способ нанесения электролитического покрытия на поверхности металлов или сплавов и электролитическое покрытие. Оpubл 27.05.1998
69. Патент РФ 90442 (С25D 11/02). Устройство для нанесения электролитических покрытий на поверхности металлов или сплавов /Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Сорокин И.В., Невровский В.А., Васин В.А., Сомов О.В. Оpubл. в Бюл. № 1. 2010.
70. Патент РФ 102619 (С25D 11/02). Устройство для микродугового оксидирования металлических изделий /Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М., Михеев В.И., Харитонов Б.В., Назим А., Рыбалко А.В., Сахин О., Васин В.А., Сомов О.В. Оpubл. в Бюл. № 7. 2011.
71. Людин В.Б. Алгоритм автоматизации конденсаторного технологического источника тока для микродугового оксидирования/ В.Б. Людин, В.А. Эпельфельд, А.В. Виноградов, А. В. Желтухин, Д. Б. Чудинов // 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. - С. 162-166

72. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов. - М.: Наука, 1989. - 240 с.
73. Каханер Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. - (пер. с англ.). М.: Мир, 2001, 575 с.
74. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. - Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 500 с.
75. ADuC702x Series - Серия микроконтроллеров с ядром ARM7TDMI®.  
<http://www.gaw.ru/pdf/AD/arm/ADuC702xR.pdf>
76. Суминов И.В. Влияние температуры электролитов на характеристики МДО-покрытий, применяемых в приборостроении / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, А.В. Виноградов, Б.В. Владимиров, А.В. Желтухин // Приборы, №12, 2010. - С. 61-63.
77. Невровский В.А. Модель охлаждения установок микродугового оксидирования / В.А. Невровский, А.В. Виноградов, В.Б. Людин // Технология машиностроения, №9 (147), 2014. – 38 - 41
78. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов. – М.: Высш. шк., 1984. – 519 с.
79. Виноградов А.В. разработка и исследование источника тока для микродугового оксидирования деталей приборов и оценка его технологических возможностей: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.14 / Виноградов Алексей Владимирович.- Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ), 2013 – 23 с.
80. Клауснитцер Г. Введение в электротехнику / Г. Клауснитцер. - Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 480 с.
81. Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение, 1998. – 224 с.
82. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев – М.: Наука, 1986. – 544 с.
83. Бабичев П.А. Физические величины: Справочник. /А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Под ред. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. -



- М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
84. Суминов И.В. Программно-аппаратная система управления и мониторинга установок микродугового оксидирования / И.В. Суминов, В.Б. Людин, А.В. Эпельфельд, Б.Л. Крит, А.В. Виноградов, А.В. Желтухин // Приборы, №1, 2009. – С. 30-35.
85. Патент 135648 РФ (С25D 11/02, 21/12). Устройство для групповой обработки деталей методом микродугового оксидирования./ Людин В.Б., Эпельфельд А.В., Чудинов Д.Б., Суминов И.В., Крит Б.Л., Борисов А.М., Васин В.А., Сомов О.В., Савва В.В., Андрианова Н.Н. // Опубл. 20.12.2013. Бюл. N 35.
86. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. –М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
87. [http://www.telegesis.com/wp-content/uploads/filebase/document-centre/etrx3\\_technical\\_manuals/TG-PM-0517-ETRX35x-LRS%20r7.pdf](http://www.telegesis.com/wp-content/uploads/filebase/document-centre/etrx3_technical_manuals/TG-PM-0517-ETRX35x-LRS%20r7.pdf)
88. Разоренов Ф. Модули ОВЕН МВА8 и МВУ8 с поддержкой протоколов Modbus и Dcon / Ф. Разоренов // Автоматизация производства, №28. - <http://owen-automat.narod.ru>
89. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
90. Solid State Sensors CS Series Linear Current Sensor. - Honeywell Sensing and Control, [sensing.honeywell.com](http://sensing.honeywell.com)
91. [http://www.owen.ru/uploads/re\\_dts\\_1846.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_dts_1846.pdf)
92. <http://sccatalog.honeywell.com/pdbdownload/images/awm720p1.pdf>
93. Генералов М.Б. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т. IV-12 / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев и др.; Под общ. ред. М.Б. Генералова. 2004-832 с.
94. Глебов И.Т. Аспирационные и транспортные пневмосистемы деревообрабатывающих предприятий./ И.Т. Глебов, В.Е. Рысев – Екатеринбург: Урал. гос. лесо-техн. ун-т, 2004. – 180 с.
95. [http://electronica.su/upload/editor/descr/m/mlh\\_series.pdf](http://electronica.su/upload/editor/descr/m/mlh_series.pdf)

96. <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00035129.pdf>
97. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8601\\_8602\\_8604.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8601_8602_8604.pdf)
98. <http://www.mikroe.com/mini/stm32/>
99. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADM660\\_8660.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADM660_8660.pdf)
100. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75477.pdf>
101. [http://www.datavision.com.tw/en/lcm\\_01\\_1.php?P\\_Id=11](http://www.datavision.com.tw/en/lcm_01_1.php?P_Id=11)
102. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADM202\\_203.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADM202_203.pdf)
103. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001203U.pdf>
104. Сиката С. Практическое руководство по управлению качеством/ Пер. с 4-го японского издания С.И. Мышкиной; Под ред. Г.И. Гостева. – М.: Машиностроение, 1980. – 215с.