

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Н И У « Б е л Г У »)**

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
КАФЕДРА НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

**Формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах методом
микродугового оксидирования**

Выпускная квалификационная работа

обучающегося по направлению подготовки

03.04.02. Физика,

очной формы обучения,

группы 07001536

Карницкого Марка Владиславовича

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук

Иванов Максим Борисович

Рецензенты:

Доцент, к.ф. – м.н. Вохмянина К.А.

БЕЛГОРОД 2017 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Микродуговое оксидирование. Физика формирования покрытий ..	5
1.1. Краткое описание предлагаемого технологического процесса	5
1.2. Технологические операции	6
1.3. Свойства МДО-покрытий	7
Глава 2. Основные характеристики тиристорного источника тока (ТИТ) для микродугового оксидирования	10
2.1. Основные технические параметры ТИТ	10
2.2. Электромеханический узел	12
2.3. Тиристорный источник тока (силовой преобразователь).....	15
2.4. Функции системы контроля и управления	17
2.5. Функциональное обеспечение ТИТ	19
2.6. Реализуемые подрежимы анодно-катодного режима ПЭО	22
Список использованной литературы	37

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых экологически чистых технологий нанесения высокоэффективных и надежных покрытий для защиты и упрочнения металлических изделий, бесспорно, является сегодня одной из самых актуальных задач современной науки и техники в связи с ростом жесткости условий эксплуатации, агрессивности применяемых технологических сред и соответственным повышением требований к конструкционным материалам.

Микродуговое оксидирование (МДО) - сравнительно новый вид поверхностной обработки и упрочнения главным образом металлических материалов, берущий свое начало от традиционного анодирования, и соответственно относится к электрохимическим процессам. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия.

Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микрозарядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышаются по сравнению с обычными анодными пленками. Другими положительными отличительными чертами процесса МДО являются его экологичность, а также отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки поверхности в начале технологической цепочки и применения холодильного оборудования для получения относительно толстых покрытий.

Технология микродугового оксидирования довольно хорошо отработана только для группы вентильных металлов. Вентильные металлы – это металлы, на которых оксидные пленки, сформированные электрохимическим путем, обладают униполярной или асимметричной проводимостью в системе

металл-оксид-электролит - МОЭ, причем положительный потенциал на металле, на котором образована анодная оксидная пленка – АОП, соответствует запирающему или обратному направлению, аналогичному полупроводниковому вентилю и их сплавов, прежде всего алюминиевых.

Актуальность:

Формирование оксидных покрытий на поршнях дизельных двигателей внутреннего сгорания позволяет существенно повысить износостойкость юбки поршня, изготовленного из сплава АК4, снизить коэффициент трения в паре поршень-гильза и склонность к схватыванию деталей в мертвых точках. Метод микродугового оксидирования является наименее затратным способом получения керамических покрытий, экологически чистым и технологичным. Наиболее значимой задачей на пути внедрения данного метода в производство является повышение твердости наносимых покрытий и снижение количества потребляемой электроэнергии на единицу обрабатываемой площади изделий.

Цель:

Определить влияние добавки гидроксида циркония в электролит на параметры процесса микродугового оксидирования и свойства оксидных покрытий на алюминиевом сплаве АК4.

Задачи:

1. Синтезировать суспензию гидроксида циркония.
2. Определить влияния добавки гидроксида циркония в электролит на вольт-амперные характеристики процесса микродугового оксидирования.
3. Провести исследования влияния добавки гидроксида циркония в электролит на элементный состав и твердость оксидных покрытий.

ГЛАВА 1. МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ. ФИЗИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ

1.1. Краткое описание предлагаемого технологического процесса

Реализация разработанного технического решения осуществлялась следующим образом: изделие помещали в ванну с водным раствором электролита, к двум стенкам ванны были прикреплены пьезопреобразователи с разными резонансными частотами, другие стенки ванны служили для охлаждения (поддержания оптимальной температуры) раствора электролита в процессе микродугового оксидирования. Далее к электродам, одним из которых являлось само изделие, подводили электрический ток, что привело к образованию микродуг, позволяющих получать композитные покрытия. Процесс микродугового оксидирования происходил при включенных пьезопреобразователях, работающих на разных частотах (от 15 до 100 кГц), что позволило сформировать покрытие с более плотной структурой и постоянно подавать свежий электролит в зону микродугового оксидирования. В состав композита включали не только собственные оксиды металлов, но и химические соединения из компонентов электролита, обеспечивая получение уникального комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств.

Разработанная технология микродугового оксидирования в ультразвуковом поле является экономичной и высокопроизводительной (по сравнению с существующими аналогами, например, анодированием), обеспечивает получение высоких физико-механических и эксплуатационных свойств изделий различной степени сложности.

Производственная линия МДО состоит из:

- силового оборудования - специализированных источников питания;
- ванн, в которых проводится подготовка поверхности, обработка и промывка;

- манипулятора для перемещения подвески с деталями (в случае серийного производства);
- металлоконструкций для размещения ванн и манипулятора;
- вспомогательного оборудования - дистиллятора, насоса-фильтра для очистки и перекачки растворов, резервных емкостей, приборов контроля качества покрытия и состояния электролита.

От источников питания на клеммы ванн подаются импульсы тока определенной формы, при этом деталь выполняет роль анода, в качестве катода служит ванна или дополнительные электроды, как правило, из нержавеющей стали (Рис 1.1).

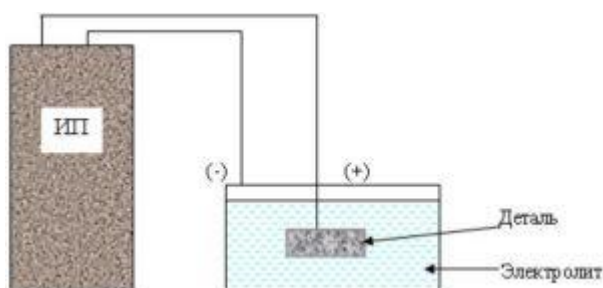
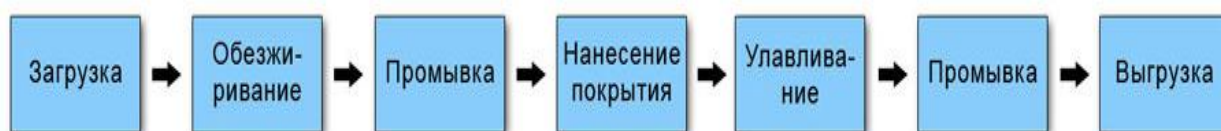


Рис. 1.1. - Производственная линия МДО

1.2. Технологические операции.

Количество необходимых технологических операций при МДО существенно меньше, чем при традиционных процессах анодирования. Это следует из отсутствия многочисленных подготовительных операций и экологичности применяемых растворов. После монтажа деталей на подвеску проводится



обезжиривание, после чего детали поступают на обработку. При больших масштабах производства после ванны нанесения покрытия ставят ванну улавливания для более рационального использования химикатов и промывочной воды.

1.3 Свойства МДО-покрытий

МДО-покрытия представляют собой керамику сложного состава. Покрытие при микродуговом окислении образуется за счет окисления поверхности металла, при этом формируются оксидные и гидроксидные формы этого металла. С другой стороны, покрытие растет за счет включения в его состав элементов из электролита. Элементы электролита входят в покрытие в виде солей, оксидов и гидроксидов сложного состава. При необходимости технология МДО позволяет ввести в покрытие любой нужный химический элемент. Чем больше времени производить обработку детали, тем больше элементов из электролита накапливается в поверхностном слое. Нижний слой покрытия, прилегающий к металлу-основе, состоит преимущественно из его оксидных соединений.

Толщина:

Толщина покрытий определяется несколькими основными факторами. Это природа электролита, материал сплава металла, режим обработки и время процесса. МДО позволяет получать покрытий толщиной от долей до сотен микрометров. Необходимая толщина покрытия зависит от назначения и условий эксплуатации. Для нанесения подслоя под окрашивание достаточно 5-10 мкм, для придания электроизоляционных свойств или высокой износостойкости необходимо 50-100 мкм. Декоративные свойства и антикоррозионные свойства в атмосферных условиях обеспечивают 20-40 мкм покрытия.

Пористость:

Пористость покрытий варьируется в интервале 5-50 %, размеры от 0,01 до 10 мкм. Строение пор при толщине покрытия более 5-10 микрон сложное, разветвленное с множеством ответвлений и замкнутых пространств. Покрытия, не содержащие пор, получить невозможно, что обусловлено природой процесса. При необходимости пористость может быть понижена с помощью пропитки различными материалами либо с помощью нанесения слоя поли-

мера (красителя). Наиболее часто применяется пропитка фторопластами и нанесение полимерных порошковых красок. В ряде случаев пористость является положительным фактором. При работе покрытия на износ в условиях смазки, последняя входит в поры покрытия и обеспечивает постепенное поступление в зону трения. В медицине биоактивные МДО-покрытия могут содержать в порах лекарственные препараты.

Износостойкость:

Покрытия используются как износостойкие в различных узлах и агрегатах машин и механизмов. За счет этого во многих случаях удается применять изделия из алюминия - металла достаточно мягкого и сложного для традиционных методов поверхностной обработки (к примеру, гальваники). Проводились сравнительные испытания образцов с МДО-покрытием на алюминии и стального образца с нанесенным износостойким слоем хрома. Удельная нагрузка при испытаниях составляла 0.64 Н/мм². МДО -покрытия показали меньший износ, особенно при повышенных температурах.

Термостойкость:

МДО-покрытия имеют повышенную стойкость к термическим и термоциклическим нагрузкам. Покрытия могут без ограничений работать при температурах от -40 до +60В°С. При постепенном нагреве детали термостойкость МДО-покрытия ограничивается температурой плавления металла самой детали, поскольку эти значения для металла заведомо ниже, чем для керамики. Испытания показали, что покрытия могут выдерживать до 280 термоциклов 310-15ВЭС и до 25 термоциклов 500-15ВЭС. При таких испытаниях, образец с покрытием нагревается до заданной температуры в печи и затем бросается в холодную воду.

Шероховатость:

В процессе обработки шероховатость поверхности повышается с течением времени. Можно получить покрытия с шероховатостью до 8 класса. Шероховатость зависит от материала сплава, состояния его поверхности и режима обработки.

Коррозионная стойкость:

Метод МДО позволяет получать покрытия, стойкие в атмосферных условиях и в различных коррозионных средах - химически агрессивных растворах, парах, морской воде и пр. Так как МДО покрытие представляет собой керамику сложного состава, то коррозионная стойкость материала покрытия достаточно велика. Защиту от коррозии металла-основы можно обеспечить толщиной покрытия и регулированием количества и строения пор. Дополнительную защиту придает пропитка пор инертным материалом (чаще всего фторопластом). Испытания (ГОСТ В 20.57.304-76, ГОСТ РВ 20.57.304-88) показали, что полученные покрытия могут эксплуатироваться как коррозионностойкие в течение 15 лет.

Диэлектрические свойства:

Напряжение, при котором происходит пробой покрытия, как и коррозионная стойкость, зависит от толщины покрытия, типа и размеров пор. Также эта величина может быть существенно увеличена применением материала, заполняющего поры. Среднее напряжение пробоя покрытия - 600 В. Напряжение пробоя покрытия с наполнением пор - до 2500 В.

Адгезия:

МДО-покрытия имеют превосходное сцепление с металлом-основой, которое обеспечивается наличием переходного слоя на границе металл покрытие. Переходный слой формируется как внутрь металла, так и наружу, а также имеет профиль с множеством изгибов.

В результате, сцепление покрытия с металлом оказывается больше прочности самого покрытия и при нагрузке не происходит отрыва покрытия по границе раздела металл-покрытие. Рассчитанные по результатам Scrach-тестирования значения адгезии достигают 350 МПа.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА (ТИТ) ДЛЯ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

2.1. Составные части установки

Технологическая установка состоит из технологического источника тока (ТИТ), электромеханического узла, соединительных кабелей и рабочего места оператора. ТИТ представляет собой металлический шкаф, внутри которого выполнены силовые, управляющие и вспомогательные цепи. ТИТ предназначен для формирования специальной формы сигнала для воздействия на обрабатываемую деталь. Электромеханический узел предназначен для обеспечения необходимых условий проведения электрохимического процесса, а также для размещения необходимых датчиков контроля за состоянием оборудования и происходящим процессом МДО. Рабочее место оператора процесса представляет собой ПК с установленным специальным технологическим ПО контроля и управления ТИТ и электромеханического узла.

ТИТ выполнен по схеме преобразователя переменного тока сетевой частоты в переменный импульсный реверсивный (асимметричный) ток. Он относится к двухплечевым тиристорно-конденсаторным источникам тока. Основные технические параметры источника представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные технические параметры источника

№ п/п	Наименование	Значение или диапазон значений
1	Напряжение питания преобразователя, В	380
2	Допустимое относительное отклонение напряжения в сети электропитания	$\pm 5 \%$
3	Частота переменного тока в цепи электропитания, Гц	50
4	Наибольшая потребляемая мощность, кВА	42

5	Наибольшее действующее значение выходного тока, не менее А	120
6	Наименьшее действующее значение выходного тока, не более А	0,15
7	Дискретность задания действующего значения выходного тока (при $R_n = 0$) в любом из режимов работы, не более, А	0,15
8	Амплитуда выходного напряжения (диапазон), В	-800...+800
9	Частота следования выходных импульсов, Гц	17, 50
10	Полярность выходного напряжения	однополярное, двухполярное симметричное, двухполярное асимметричное
11	Форма выходных импульсов	специальная
12	Возможность управления отдельно положительной и отрицательной составляющими тока (асимметрией) в соответствии с п. 5, п. 6 и п. 7	да
13	Возможные циклические режимы импульсов	однополярные, двухполярные симметричные, двухполярные асимметричные, бестоковая пауза
14	Диапазон установки количества шагов в циклической последовательности	не ограничен
15	Диапазон установки длительностей одного шага циклической последовательности, с, не менее	от 20 мс до 20 минут
16	Количество этапов обработки	произвольное
17	Длительность одного этапа обработки, ч	произвольное
18	Габаритные размеры силовой установки, мм, не более длина ширина высота	1500 800 2100

2.2 Электромеханический узел

Электромеханический узел выполняет функции по обеспечению заданных физических условий протекания процесса. Габаритные размеры электромеханического узла в горизонтальной проекции (Д×Ш) не превышают 800×700 мм. Общий вид конструкции электромеханического узла приведен на рисунке 2.1.

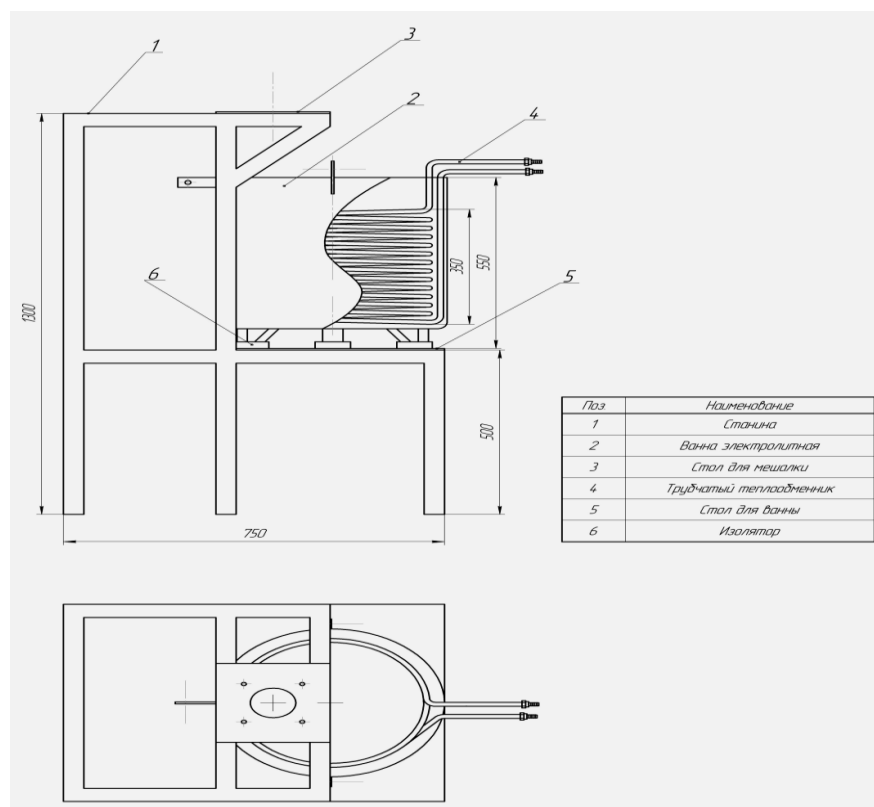


Рисунок 2.1. Общий вид электромеханического узла

В состав электромеханического узла входит технологическая емкость, в которой находится электролит для процесса ПЭО. Материал емкости – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Полезный объем ванны составляет 60 л., а наименьший размер (высота или диаметр) не менее 350 мм. Допустимое рабочее давление охлаждающей жидкости в теплообменнике не менее 0,6 МПа.

Толщина стенки любого элемента емкости не менее 0,5 мм. Эскизный чертеж электролитической ванны приведен на рисунке 2.2.

Емкость установлена на специальную раму, которая в свою очередь является основой для крепления электроприводов, датчиков, технологической заготовки. Все элементы рамы имеют антикоррозионную защиту от воздействия слабых щелочей и кислот.

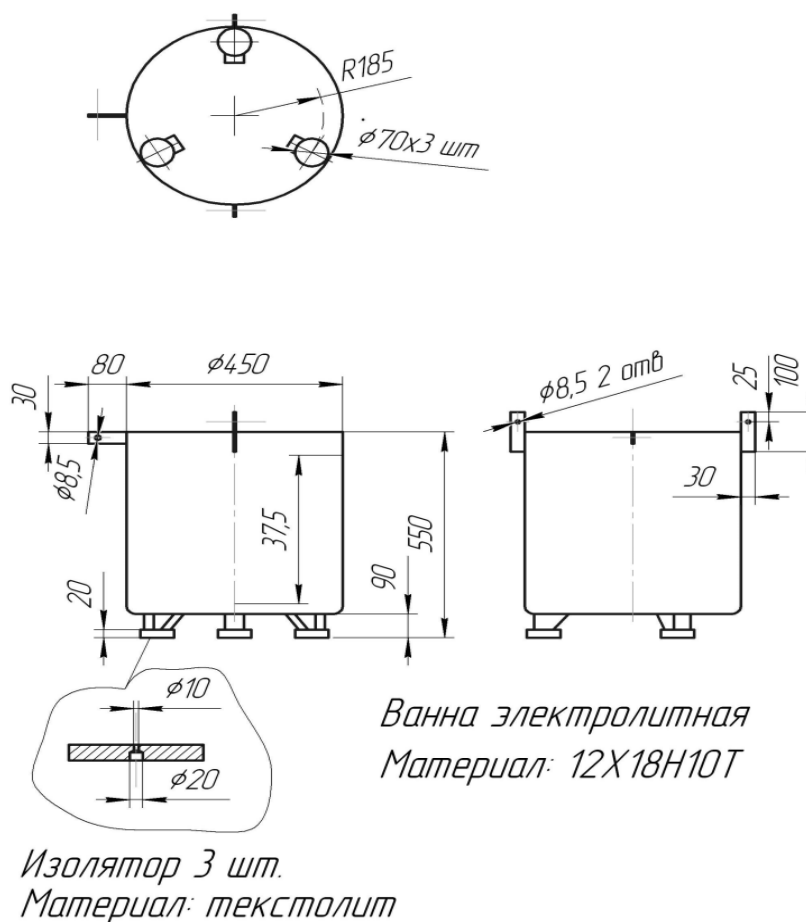


Рис. 2.2. Электролитическая ванна

Для обеспечения отвода тепла, выделяемого в процессе ПЭО электролитная ванна снабжается спиральным теплообменником (рисунок 2.3). Внутри теплообменника циркулирует проточная вода. При перепаде температур охлаждающей и охлаждаемой жидкостей 15°C, обеспечивается отводимый тепловой поток не менее 4,5 кВт.

Кроме емкости с крепежной рамой в состав электромеханического узла входят два автоматизированных электропривода: привод мешалки и привод вращения заготовки.

При изготовлении установки предполагается установка трехфазных асинхронных электродвигателей фирмы СИМА (Италия), двигатель 63М (0,55кВт, 2770 rpm) для мотор-редуктора и 63М (0,25 кВт, 1340 rpm) – для мешалки. Двигатели поставляются в комплекте с червячными редукторами INNORED в квадратных корпусах, типоразмера 063, с передаточным коэффициентом – 20.

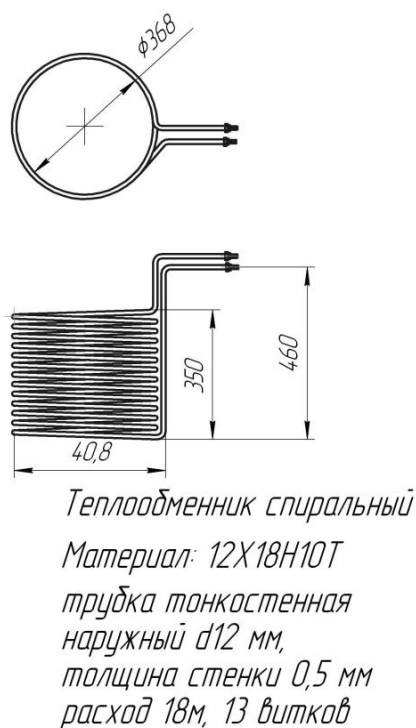


Рис. 2.3. Теплообменник спиральный

Крепление емкости к раме выполняется через диэлектрический материал с длительной электрической прочностью не менее 1000 В в нормальных условиях.

2.3. Тиристорный источник тока (силовой преобразователь)

Непосредственно процесс плазменно-электролитического оксидирования проводится под воздействием электрических импульсов напряжения, формируемых ТИТ из напряжения сети электропитания 0,4 кВ. Основными факторами, влияющими на характеристики получаемых покрытий наряду с составом электролита в ванне, являются форма и электрические параметры импульсов, формируемых ТИТ.

ТИТ представляет собой источник переменного напряжения специальной формы с широкими возможностями регулировки амплитуды выходного напряжения и тока, с управляемым соотношением симметрии выходного напряжения и тока, позволяющий выполнять циклические последовательности обработки заготовки, заданные пользователем. ТИТ обеспечивает настройку, управление, измерение, отображение и регистрацию всех основных параметров выполняемого процесса, и сохранение их в своей энергонезависимой памяти (и памяти ПК).

Силовой преобразователь выполняется в виде металлического шкафа двухстороннего обслуживания.

В состав ТИТ (рис. 2.4.) входят: вводное устройство, энергетические (силовые) и измерительные цепи, система управления силовыми ключами энергетических цепей. Для автоматизации и мониторинга протекания процесса в ТИТ интегрированы соответствующие программно-аппаратные системы автоматизации и контроля.

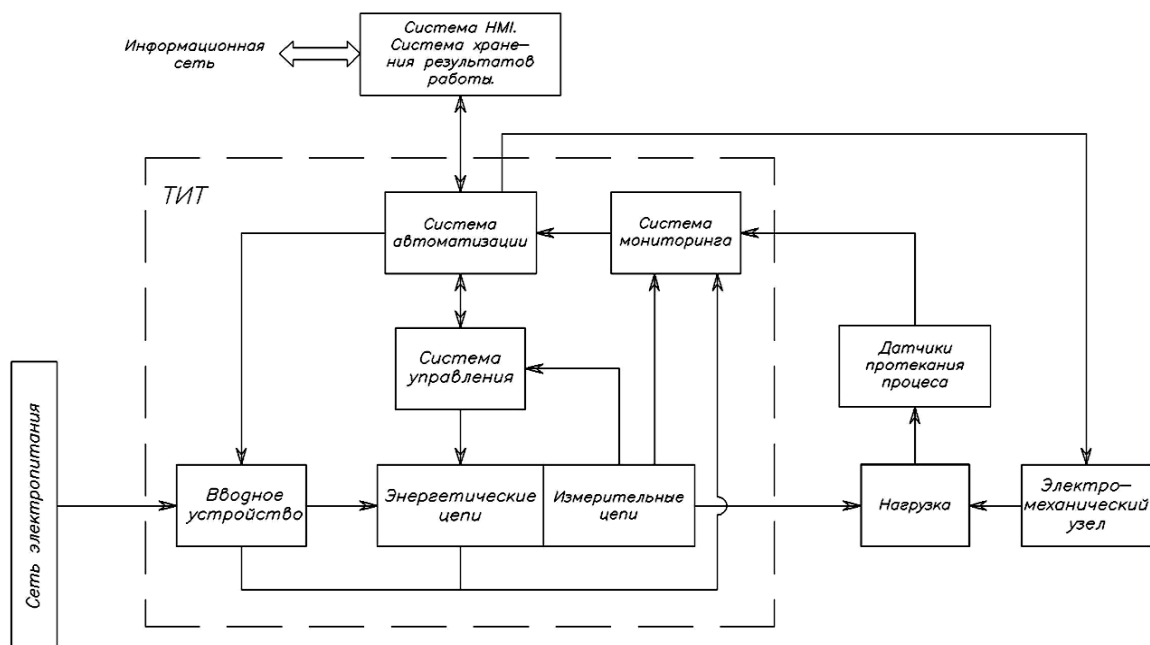


Рис. 2.4. Общая схема ТИТ

Вводное устройство выполняет функции включения-выключения ТИТ, защиту входных цепей ТИТ от перегрузок и КЗ. Дополнительно вводное устройство обеспечивает реализацию функций защиты персонала от поражения электрическим током. Преобразование электрического тока сети в требуемый для нагрузки электрический ток осуществляется в энергетических цепях ТИТ, в составе которых функционируют силовые полупроводниковые и электромеханические ключи, а также блоки силовых конденсаторов. Управление силовыми ключами и блоками конденсаторов осуществляется с помощью системы управления. Система управления обеспечивает оперативное управление энергетическими цепями ТИТ, контролируя состояние процессов преобразования энергии, происходящих в энергетических цепях ТИТ с помощью измерительных цепей.

Общее управление ТИТ выполняет система автоматизации. Система автоматизации обеспечивает управление оборудованием внешнего электро-механического узла, который формирует необходимые условия протекания процессов в нагрузке. Система автоматизации обеспечивает функционирование ТИТ на основе внешнего задания и информации поступающей из систе-

мы мониторинга. Система мониторинга выполняет функции сбора и обработки информации датчиков протекания процесса, информации, полученной от измерительных цепей и органов управления ТИТ. Основные функции систем контроля и автоматизации приведены в таблице 2.

Система НМІ обеспечивает функции человеко-машинного взаимодействия с оператором, формирование управляющих команд системе автоматизации, визуализацию процессов, протекающих в ТИТ, электромеханическом узле и нагрузке, а также хранение, обработку и отображение полученной в процессе работы информации. Система НМІ состоит из специального программного обеспечения установленного на ПК оператора процесса и панели оператора установленной на двери ТИТ.

Предусматривается возможность временного снятия блокировок процесса по внешним сигналам, кроме сигналов от конечных выключателей и аварийных сигналов.

2.4. Система контроля и управления

Система контроля и управления осуществляет сбор информации от внутренних и внешних датчиков и передает ее в систему автоматизации силового преобразователя, она оповещает и уведомляет о режимах работы силового преобразователя и ходе технологического процесса, а также о выходе рабочих параметров за установленные граничные значения через элементы звуковой и световой сигнализации.

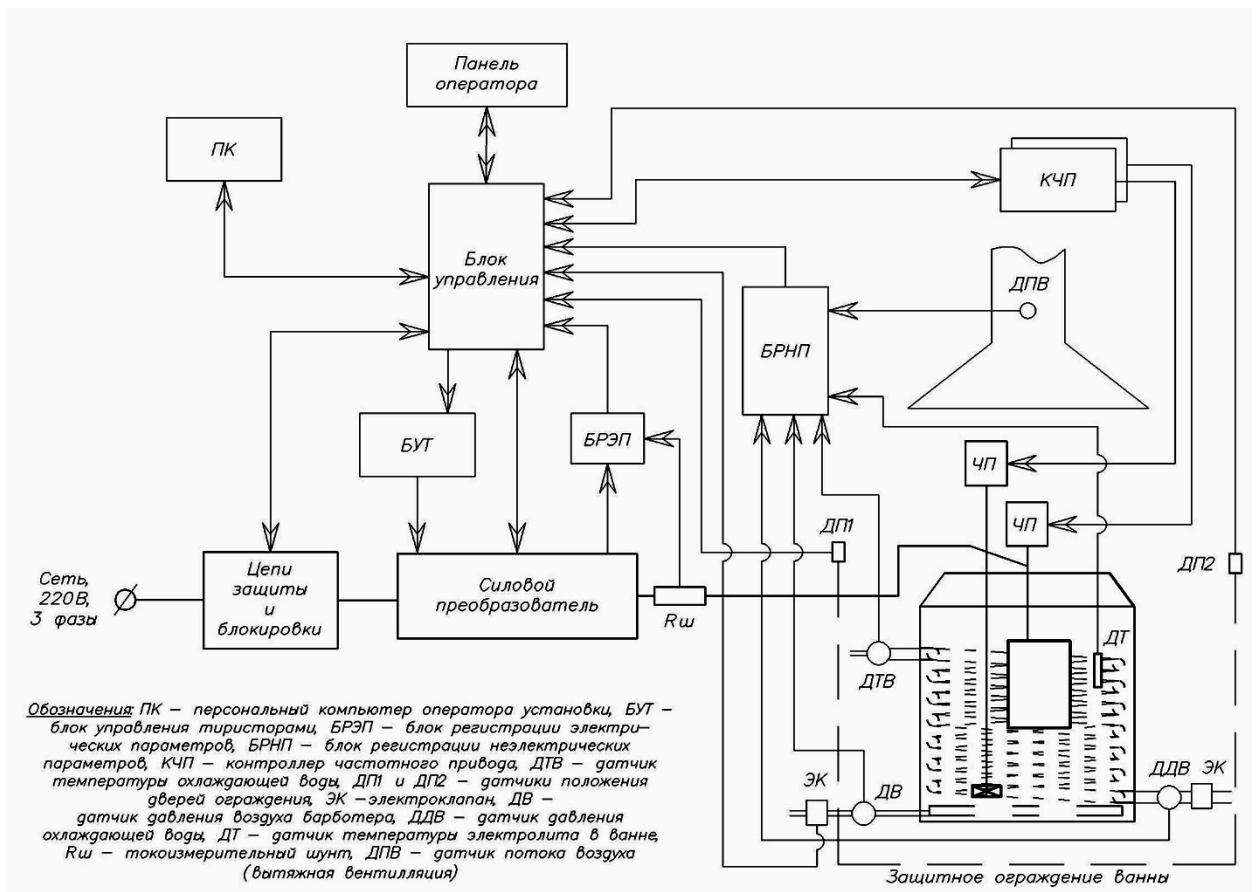


Рис. 2.5. Структурная схема установки

На рисунке 2.5 приведена структурная схема. Оператор посредством программного обеспечения на (ПК и/или панели) оператора выполняет настройку, запуск или остановку процесса обработки. Блок управления принимает команды оператора и выполняет оперативное управление установкой (цепями защиты и блокировки, блоком управления силовыми тиристорами, оборудованием силового преобразователя) и электромеханическим блоком (электроприводами вращения детали и перемешивания, клапанами системы барботажа и охлаждения электролита). Необходимую для работы информацию о текущих параметрах процесса, состоянии оборудования ТИТ и электромеханического узла блок управления получает с блоков регистрации электрических и неэлектрических параметров.

2.5 Функциональное обеспечение ТИТ

Предлагаемый технологический источник тока позволяет реализовать одну из эквивалентных схем преобразователей переменного тока (рисунок 2.6). Необходимый тип реализуемой эквивалентной схемы в каждом из заданных режимов обработки устанавливается оператором с помощью ПО и реализуется системой автоматизации ТИТ.

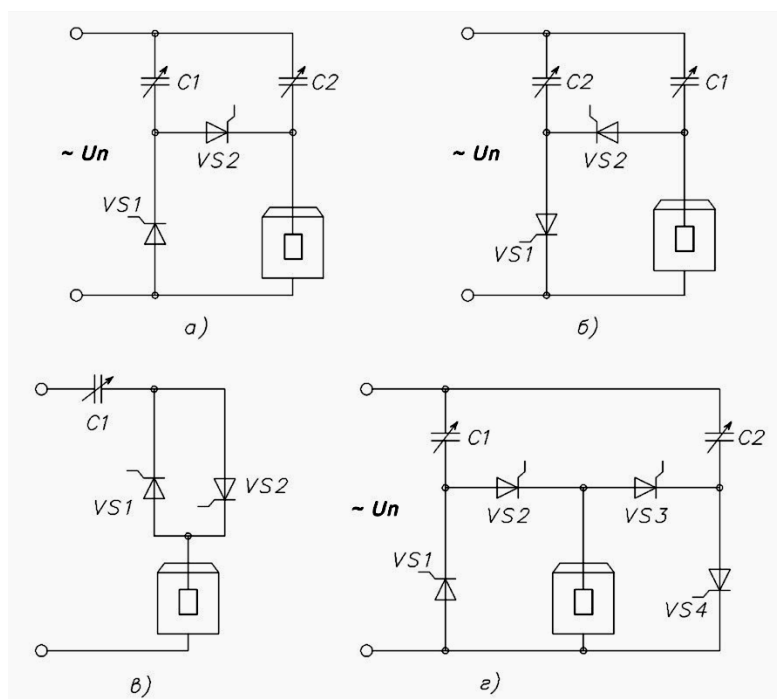


Рис. 2.6. Эквивалентные схемы структуры ТИТ

Предлагаемый ТИТ относится к тиристорно-конденсаторным источникам питания с умножением напряжения, переменного тока, с регулируемой жесткостью режимов, обеспечивающих как анодный, так и катодный, а также анодно-катодный режим обработки с регулируемым соотношением I_A и I_K .

Система автоматизации совместно с технологическим программным обеспечением управляет силовым преобразователем, реализовывает функции системы управления и автоматизации технологическим процессом, а так сервисные и диагностические функции ТИТ. Система выполнена в виде связки контроллера оперативного управления и технологического программного

обеспечения, установленного на персональном компьютере. Этим обеспечивается с одной стороны необходимое быстродействие системы по управлению оборудованием, а с другой стороны функциональность в части сбора, хранения, отображения, обмена и визуализации получаемых во время работы данных.

В состав контролера оперативного управления дополнительно входят: блок управления тиристорами, блоки цифровых входов и выходов, высокоскоростной прецизионный измерительный блок электрических параметров (регистрация формы тока и напряжения).

Контроллер управления обеспечивает управление конфигурацией силового преобразователя, коммутацию блоков силовых конденсаторов, управление силовым пускателем подключения нагрузки. Дополнительно контроллер управления обеспечивает логику неаварийных защит и блокировок работы ТИТ.

Высокоскоростной измерительный блок обеспечивает необходимое быстродействие по измерению основных сигналов датчиков напряжения (U) и датчиков тока (I, токовые шунты). Датчики расположены непосредственно в силовых цепях ТИТ.

Управление тиристорами силового блока выполняется контроллером управления на основе информации, поступающей с высокоскоростного измерительного блока посредством блока управления тиристорами.

Для связи с датчиками технологических параметров использованы стандартные блоки аналоговых вводов, связь их с контролером управления происходит по интерфейсу RS-485.

Управление процессами перемешивания электролита и вращения деталей обеспечивает 2 отдельных блока частотного привода, управление (включение, выключение, изменение скорости) которыми обеспечивается с контролера управления по интерфейсу RS-485.

Для измерения количества электричества, пройденного через ванну в состав ТИТ включен многофункциональный счетчик электрической энергии,

который дополнительно обеспечивает учет и мониторинг электрических параметров сетевого напряжения. Регистрируемые параметры передаются на контроллер управления через интерфейс RS-485.

Для оперативного контроля и визуализации основных оперативных параметров, а также для индикации состояния ТИТ предусмотрена панель оператора, расположенная на лицевой двери ТИТ. Связь с контроллером управления выполнена по интерфейсу RS-485.

В состав ТИТ входят две коммутируемые батареи конденсаторов, общей емкостью порядка 2600 мкФ, конденсаторы объединены в группы соответствующим образом для получения заданной дискретности выходных токов. Каждая группа коммутируется собственным магнитным пускателем.

Для управления процессами накопления электрической энергии и передачи ее в нагрузку применены силовые тиристоры. Изменение конфигурации (эквивалентной схемы) силового преобразователя обеспечивают три дополнительных пускателя конфигурации ТИТ.

ТИТ обеспечивает реализацию 7 различных подрежимов. Выбор типа подрежима и его параметров зависит от типа обрабатываемого материала, состава электролита и требуемых свойств получаемого покрытия. Чередование подрежимов и заданных параметров подрежимов обработки наряду с бестоковыми паузами в обработке в конечном итоге и позволяют получить покрытия с новыми свойствами.

Формирование программ обработки, которые включают различные подрежимы, бестоковые паузы выполняется без ограничений на их количество, состав, чередование, длительность на технологическом ПО установленном на ПК (оператором). ПО обеспечивает гибко редактировать программы и режимы обработки (создавать, сохранять, редактировать).

Для работы с «трудно зажигаемыми» сплавами предусмотрены:

- возможность построения программ обработки в режиме циклирования: анодного, катодного, анодно-катодного подрежима и бестоковой паузы в любом сочетании,

- возможность наложения на синусоидальные выходные импульсы инициирующих импульсов на фронтах и спадах основных импульсов.

2.6 Реализуемые подрежимы анодно-катодного режима ТИТ

Формирование программ обработки, которые включают различные подрежимы, бестоковые паузы выполняется без ограничений на их количество, состав, чередование, длительность на технологическом ПО установленном на ПК (оператором). ПО обеспечивает гибко редактировать программы и режимы обработки (создавать, сохранять, редактировать).

Для работы с «трудно зажигаемыми» сплавами предусмотрены:

- возможность построения программ обработки в режиме циклирования: анодного, катодного, анодно-катодного подрежима и бестоковой паузы в любом сочетании,

- возможность наложения на синусоидальные выходные импульсы инициирующих импульсов на фронтах и спадах основных импульсов.

В таблице 2 приведена краткая характеристика каждого из реализуемых подрежимов анодно-катодного режима ПЭО.

Таблица 2

Реализуемые подрежимы анодно-катодного режима ПЭО

№ п/п	Форма импульсов	Регулирование по фронту импульса	Соотношение I_K/I_A	Частота следования импульсов, Гц
1	Синусоидальная Обработка синусоидальными импульсами напряжения без регулирования фронтов и спадов при равных плотностях анодного и катодного токов. Среднее значение выходного тока зависит от емкости батареи конденсаторов. Частота следования импульсов напряжения составляет 50 Гц	нет	1	50
2	Синусоидальная или пилообразная Обработка импульсами напряжения синусоидальной или пилообразной форм с регулируемыми фронтами анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение анодного тока I_A зависит от емкости батареи С1, а катодного I_K – С2.	да	0 - ∞	~17
3	Синусоидальная или импульсная Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с регулируемыми фронтами (жесткостью режима) анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение анодного тока I_A зависит от емкости батареи С1, а катодного I_K – С2.	да	0 - ∞	50
4	Синусоидальная Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с регулируемыми фронтами (жесткостью режима) анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение	да	1	50

	анодного тока равно катодному и зависит от емкости батареи конденсаторов.			
5	Наложение синусоидальной и импульсной Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с возможностью наложения на них пилообразных импульсов, на их фронтах или спадах. Напряжение наложения регулируется контроллером. Среднее значение катодного тока определяется емкостью батареи С1, а анодного суммой емкостей С1 и С2.	да	< 1	50
6	Наложение синусоидальной и импульсной Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с возможностью наложения на них пилообразных импульсов, на их фронтах. Напряжение наложения регулируется контроллером. Среднее значение анодного тока определяется емкостью батареи С1, а катодного суммой емкостей С1 и С2.	да	> 1	50
7	Синусоидальная Обработка импульсами напряжения синусоидальной формы с регулируемыми спадами анодных и/или катодных импульсов. Среднее значение выходного тока зависит от емкости батареи С1.			

ГЛАВА 3. РАБОТА С ТИРИСТОРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТОКА

3.1. Программное обеспечение

Меню программы для работы с источником представлено на рисунке 3.1. В меню проводят выбор формы импульсов (режима) и времени обработки, в течение которого будет формироваться слой. Форма импульса определяется временами открытия и закрытия соответствующих тиристоров, в результате чего разряд накопленной в конденсаторах энергии осуществляется в произвольные промежутки времени.

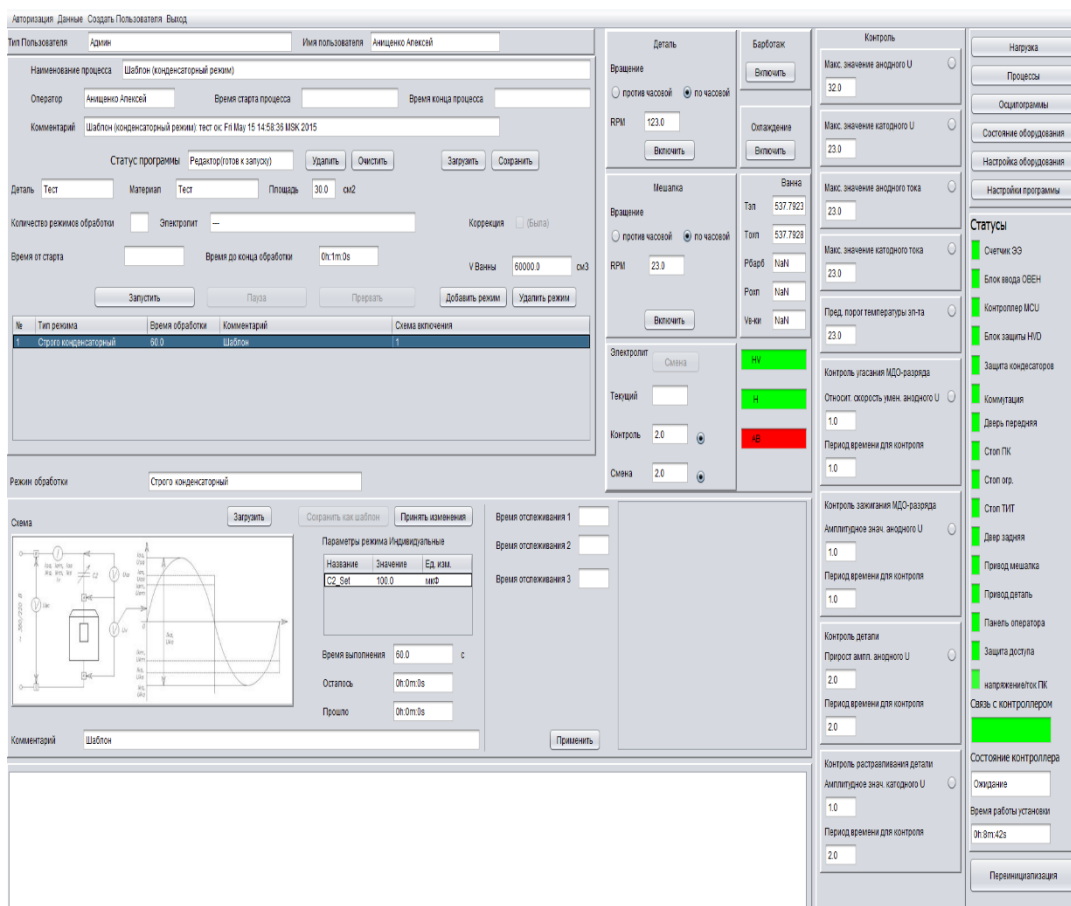


Рис. 3.1 Главное меню программного обеспечения ТИТ

Для приведенного ниже примера период обработки составлял 60 сек. В течение этого времени можно было наблюдать рост напряжения и тока. Площадь образца составляла $X\text{см}^2$. Программа позволяет фиксировать в лю-

бой момент времени осциллограммы напряжений и токов в различных участках цепи и на нагрузке, циклическую вольт-амперную характеристику (Рис. 3.2), а также отслеживать временные зависимости характерных значений напряжений и токов (Рис.3.3)

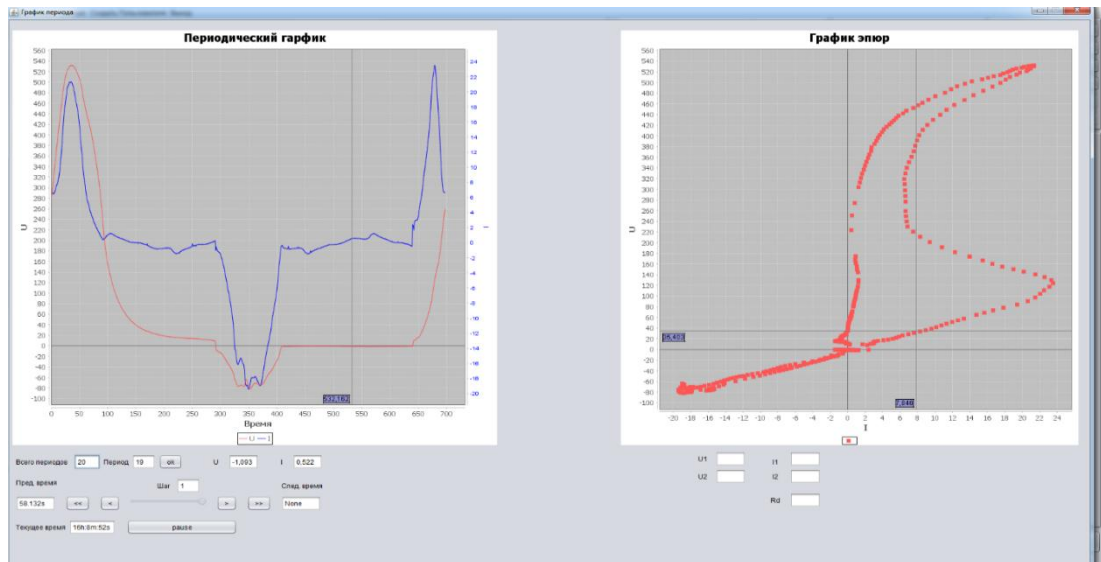


Рис. 3.2 Отображение осциллограмм тока и напряжения на нагрузке(слева) и циклической вольт-амперной характеристики (справа)

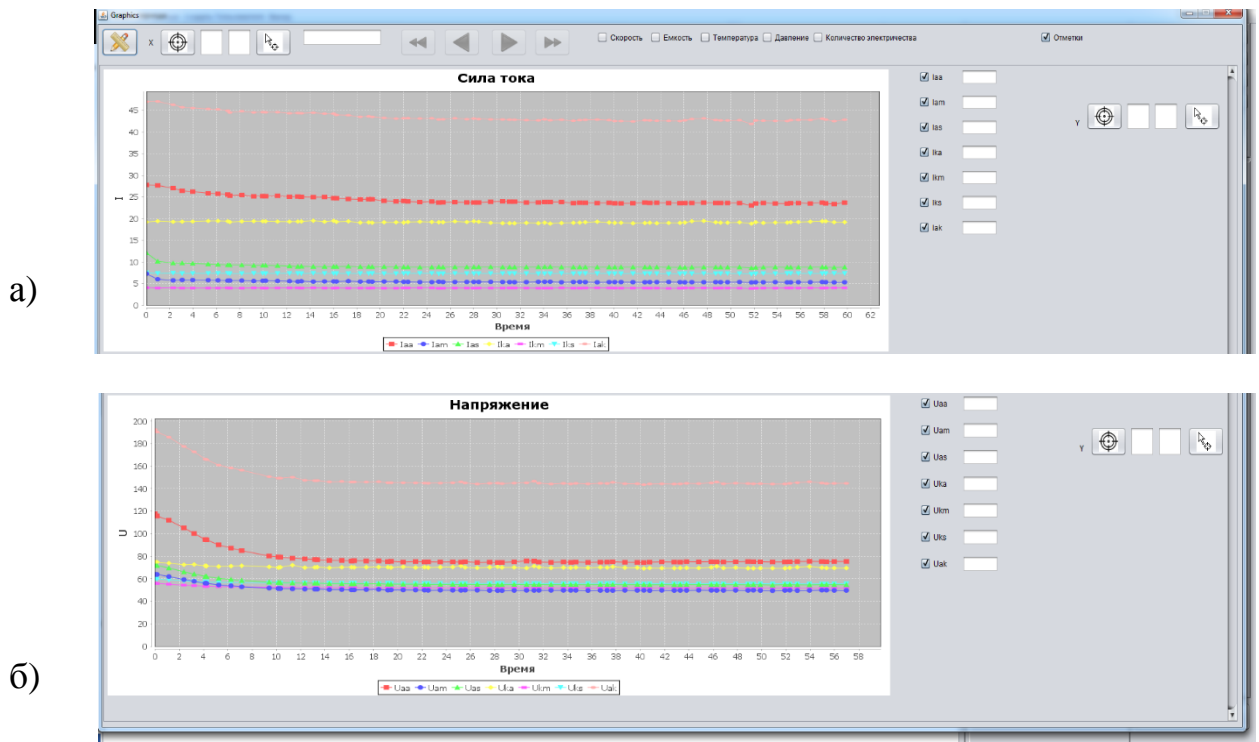


Рис. 3.3 Графики а) силы тока , б) напряжения

3.2 Проведение процесса МДО

Для проведения исследования характеристики покрытий было взято 6 образцов сплава АК4 (Рис.3.4). Для начала исследований по значению площади образцов необходимо было рассчитать емкость конденсаторов для каждого образца исходя из удельной емкости, обеспечивающей требуемый средний ток процесса. Из опыта формирования покрытий на сплавах АК4 была использована удельная емкость для каждого образца. Примеры расчета емкости приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчет примерной емкости конденсаторов

№ образца		1	2	3	4	5	6
Площадь, S	дм ²	0,1822	0,1792	0,1796	0,1844	0,1775	0,1834
Расчетная емкость	мкФ	129	86	43	130	86	44

В прошлой работе было исследовано 3 режима: мягкий, жесткий-мягкий и жесткий. Жесткость режима определяется характером подачи напряжения. Мягкий режим способствует постепенному (напряжение включения – 0В), а жесткий вынужденному (напряжение включения →U_{макс}) зажиганию микродуговых разрядов на поверхности изделия. Один образец для каждого режима был помещен в ванну и в программе были записаны основные параметры, такие как: частота, время обработки, емкость конденсаторов. Так же в таблицу 4 были вынесены данные тиристоров (VS 1,2,3 ON и VS 1,2,3 OFF) и расчетный ток, индивидуальные для каждого режима.

Заданные параметры

Основные параметры	Ед. измерений	Конденсаторный строго	Конденсаторный регулирования фронтов	Анодно-катодный режим (17 Гц)	Анодно-катодный режим (50 Гц)
Заданная емкость C1set	мкФ		13	11	10
Заданная емкость C2set	мкФ	12	13	11	10
VS1 ON	град.		0	450	90
VS1OFF	град.		360	630	360
VS2ON	град.		0	0	0
VS2OFF	град.		90	90	90
VS3ON	град.		180	540	180
VS3OFF	град.		270	630	270
VS4ON	град.		0	990	0
VS4OFF	град.		360	90	360
Расчетный ток I	А	0,63	0,70	0,60	0,54
Частота	Гц	50	50	17	50
Время обработки	сек	1800	1800	1800	1800

После того как были заданы параметры был запущен процесс МДО. Для запуска процесса использовался анодный режим, позволяющий ускорить формирование первичного оксидного слоя на поверхности образцов. После 1 минуты анодной обработки был запущен исследуемый режим.

Для продолжения исследований были взяты 6 образцов, подготовлен электролит Na_2SiO_3 (20 г/л) + KOH (6 г/л) + дистиллированная вода (3 л), а для обработки образцов 4, 5, 6 подготовлен электролит Na_2SiO_3 (20г/л) +

КОН (6 г/л)+ дистиллированная вода (3 л) + $ZrO(OH)_2$ (0,5 г/л), и выбран конденсаторный режим МДО, так как только при таком режиме осуществляется рост оксидной пленки для формирования слоя. После подготовки установки МДО и задания соответствующих параметров, таких как: емкость конденсатора, частота и время обработки был проведен процесс МДО. Данные процесса фиксировались по окончанию времени, отведенного на каждый образец. Все параметры занесены в таблицу 5. На рисунке 3.6(а) и 3.6(б) отображены графики тока и напряжения для образцов 1, 2, 3 и 4, 5, 6 соответственно.

Таблица 5

Данные процесса МДО

№ образца	1 Без ZrO_2	2 Без ZrO_2	3 Без ZrO_2	4 С ZrO_2	5 С ZrO_2	6 С ZrO_2
Площадь, $дм^2$	0,1822	0,1792	0,1796	0,1844	0,1775	0,1834
Время, мин	60	90	120	60	90	120
Емкость, Ф	129	86	43	130	86	44
U_{aa} , В	545,8	572,8	572,5	551,7	572,5	580
U_{ka} , В	133,6	167,2	185,3	138,5	187,2	205,6
U_{am} , В	345,3	362,4	358,1	350,6	364,4	368,5
U_{km} , В	83,4	101,8	112,2	85,3	103,1	118,8
I_{aa} , А	19,8	14,7	8	21,1	14,9	8,8
I_{ka} , А	26	32,9	8,8	27,4	18,2	9,6
I_{am} , А	6,2	4	2,6	6,4	4	2,6
I_{km} , А	12,3	8	3,1	12,8	8,3	3,5

После завершения процесса, все образцы (Рис 3.5) были отправлены на исследование толщины слоя, микротвердости, и химический анализ.



Рис. 3.5. Образцы после обработки



Рис. 3.6(а). График тока и напряжения для образцов 1,2,3

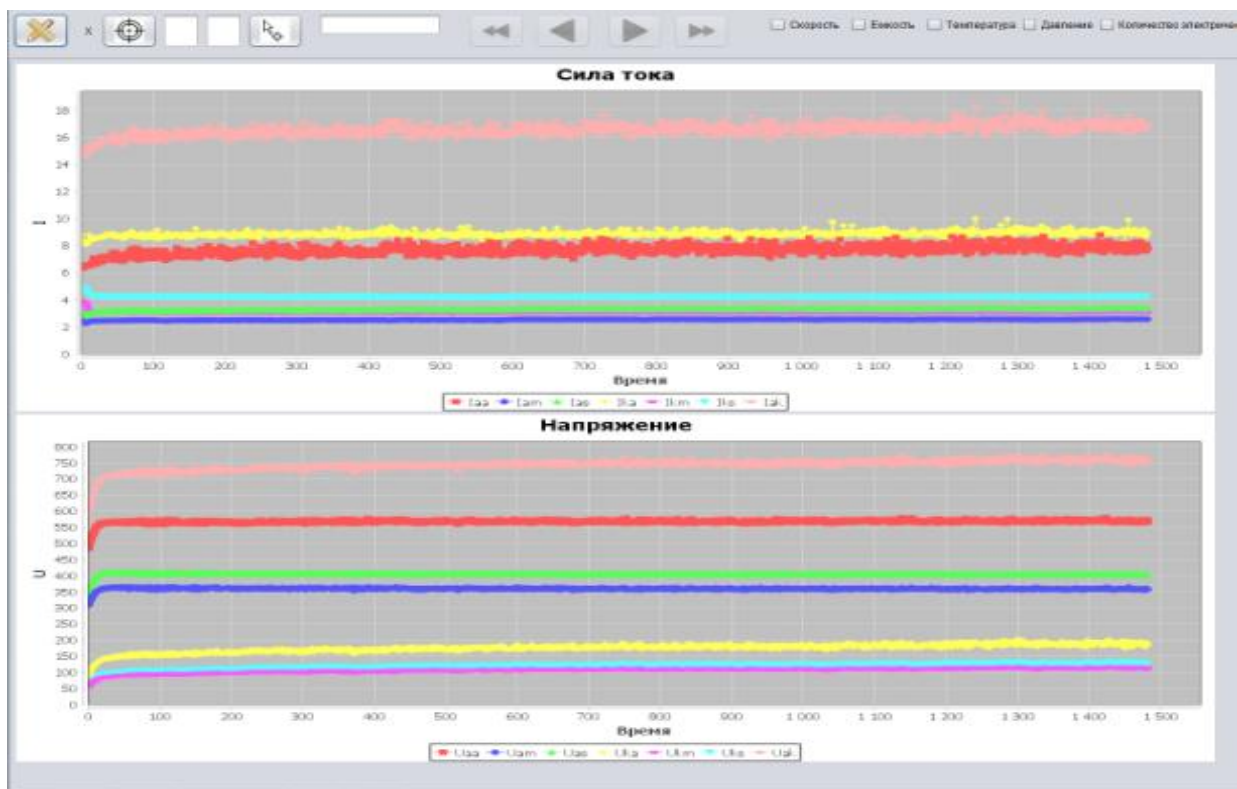


Рис. 3.6(б). График тока и напряжения для образцов 4,5,6

3.3 Результаты эксперимента

Сперва 6 образцов были отправлены на поперечный шлиф, чтобы измерять толщину слоя. При помощи оптического микроскопа были получены значения толщины слоя образцов без содержания ZrO_2 (Рис. 3.7) и с содержанием ZrO_2 (Рис. 3.8).

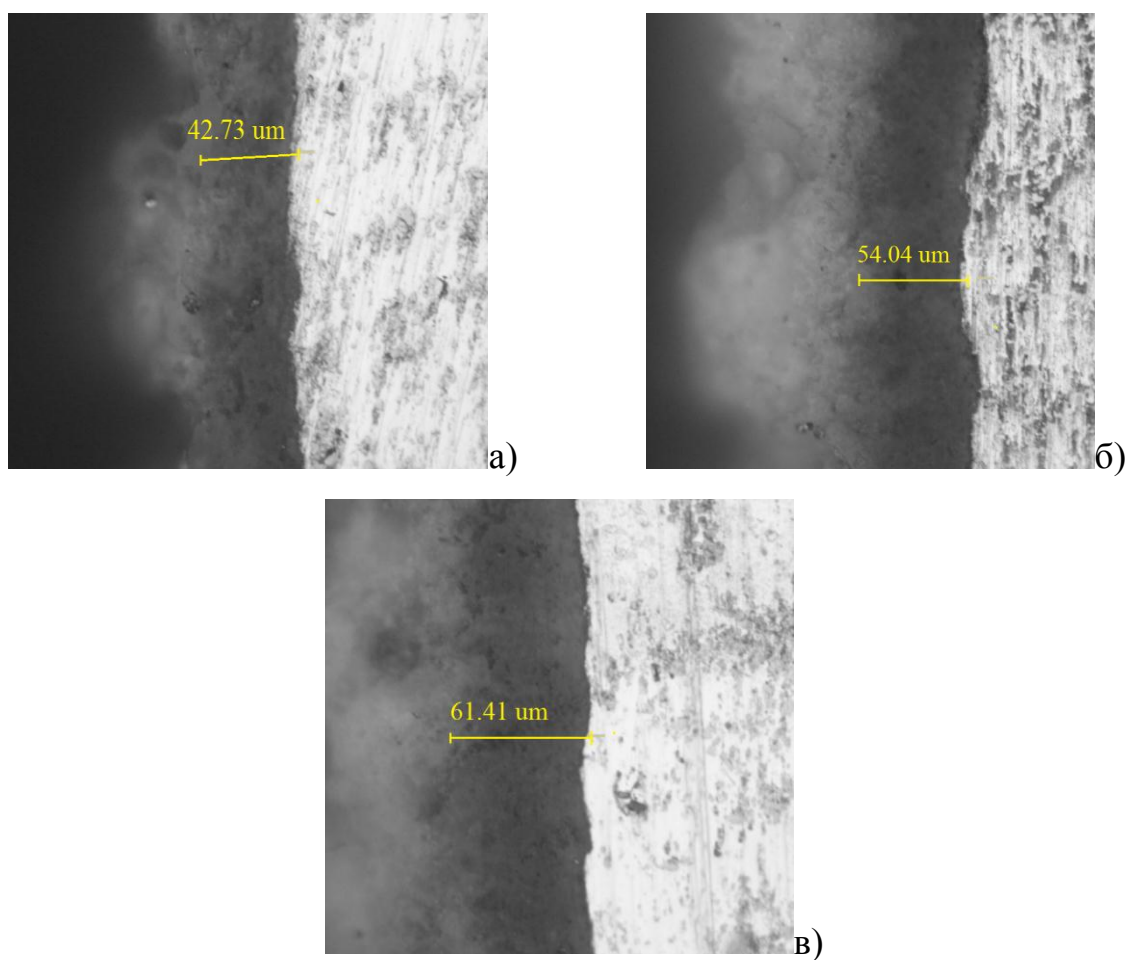


Рис. 3.7. Толщина слоя образцов а) образец 1, б) образец 2, в) образец 3

Из исходных данных видно, что рост слоя на 60 мин. и 90 мин. примерно одинаков. Но на 120 мин. в электролите без содержания ZrO_2 слой вырос всего лишь на 10 μm , а в электролите с ZrO_2 на 30 μm .

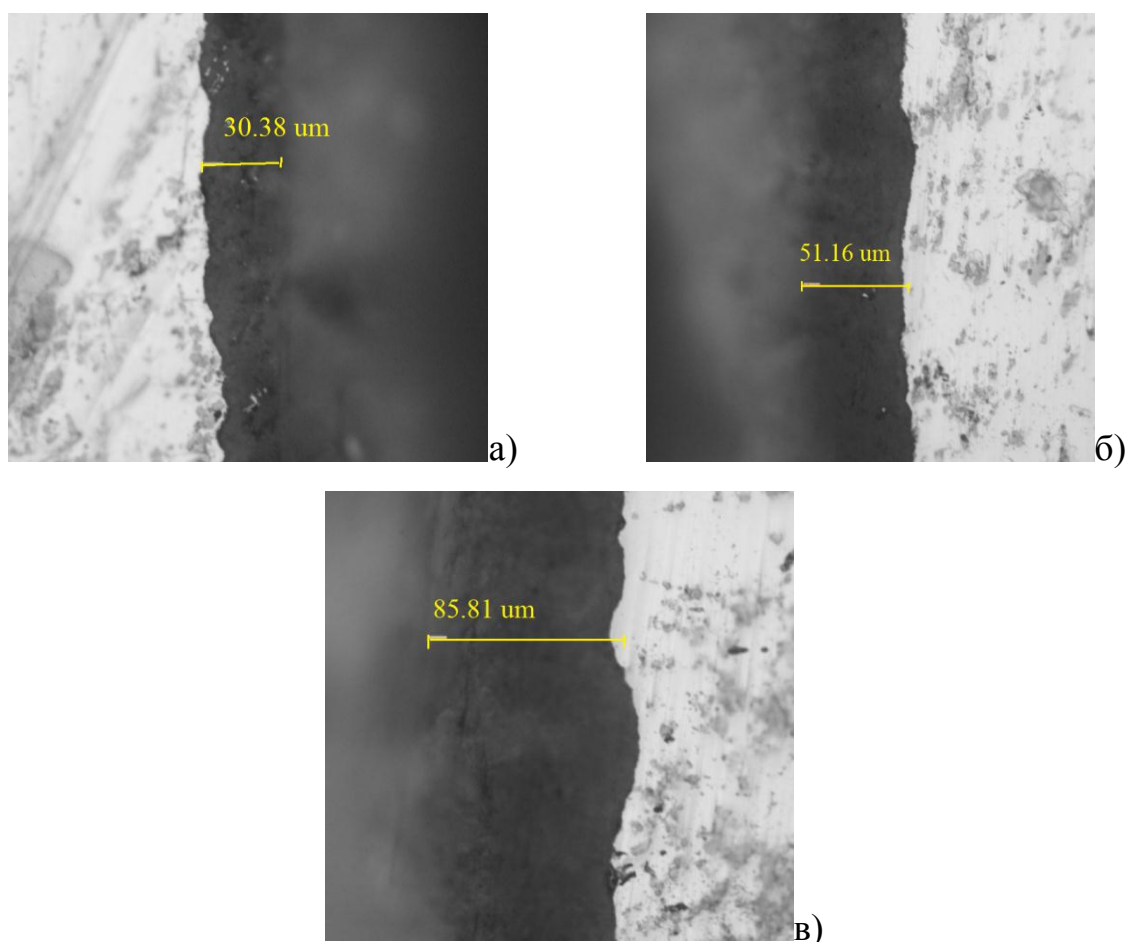


Рис. 3.8. Толщина слоя образцов а) образец 4, б) образец 5, в) образец 6

Далее образцы были отправлены на измерение микротвердости методом Виккерса. Были выбраны образцы под номерами 3 и 6, так как они имеют наибольшую толщину слоя и время обработки. Твердость измерялась на одинаковой толщине покрытий после их механического шлифования. Данные по измерению микротвердости по Виккерсу указаны в таблице 6.

Таблица 6

Данные твердости слоя

№ п/п	Образец 3		Образец 6	
	Твердость, HV	Нагрузка, г	Твердость, HV	Нагрузка, г
1	698	0,2	863	0,2
2	859	0,2	1087	0,2
3	697	0,2	896	0,2
4	669	0,2	965	0,2
5	804	0,2	1076	0,2
6	757	0,2	1076	0,2

7	624	0,2	1024	0,2
8	614	0,2	921	0,2
9	714	0,2	913	0,2
10	720	0,2	1109	0,2
Ср.	715	0,2	993	0,2

После расчета микротвердости был изучен химический состав покрытия. С помощью микроскопа Quanta 600D был исследован образец под номером 6.

На рисунке 3.9 показан линейный химический анализ покрытия. Как видно на рисунке, $ZrO(OH)_2$ в состав основного покрытия не вошел, а осел на технологическом слое. Это говорит о том, что при данных параметрах и химическом составе электролита, $ZrO(OH)_2$ не участвует в формировании основного слоя из-за малой концентрации или неактивности элементов.

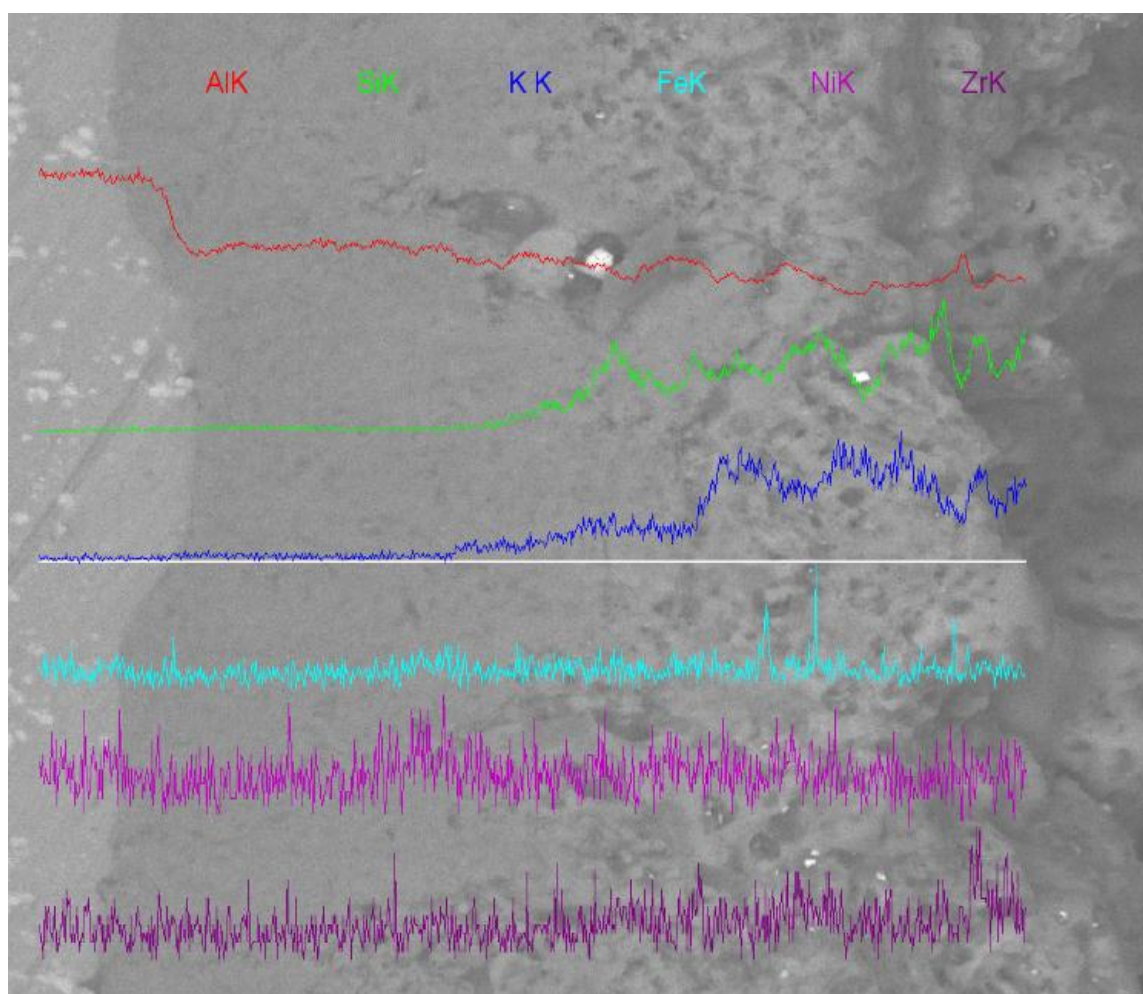


Рис 3.9. Линейный химический анализ

Далее показан химический анализ по области на исследуемом (рис.3.10) и технологическом (рис.3.11) слое.

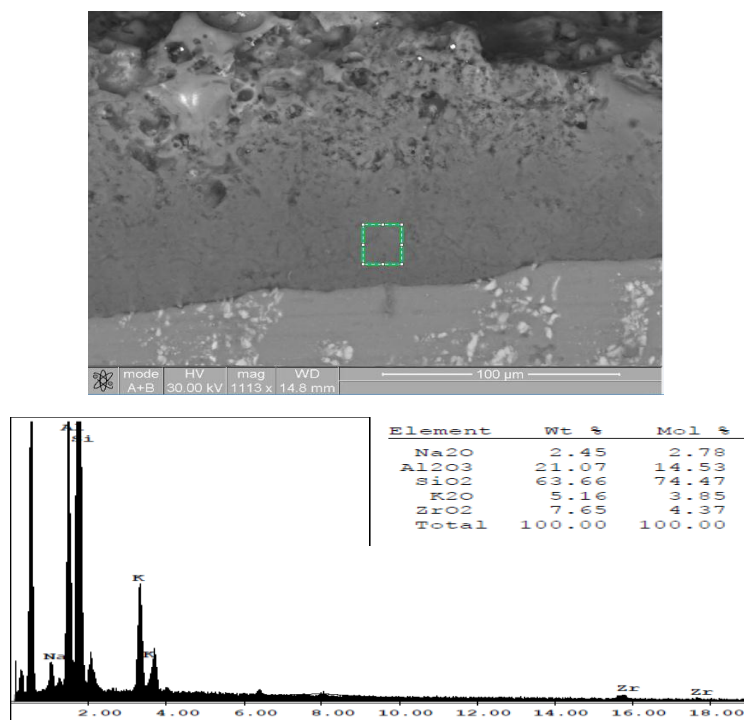


Рис. 3.10. Химический анализ исследуемого слоя

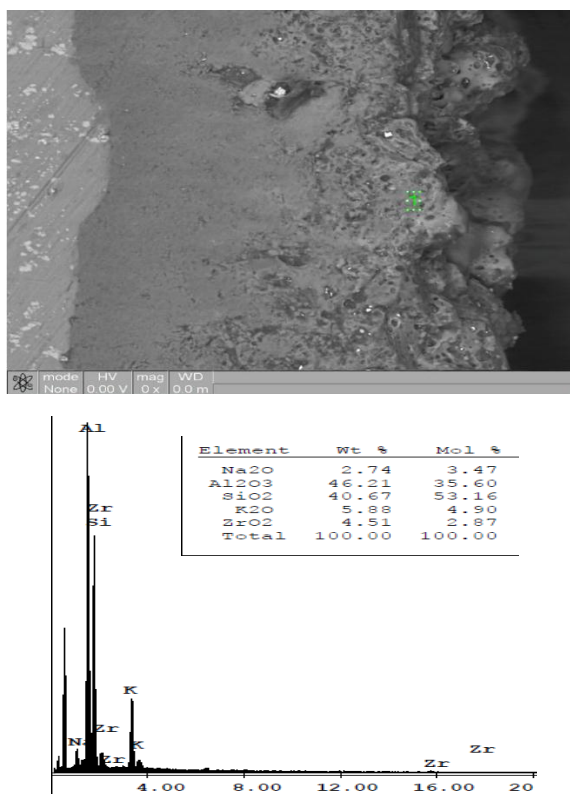


Рис. 3.10. Химический анализ технологического слоя

Заключение

После завершения исследований были сделаны следующие выводы:

1. Добавка небольшой концентрации (1 % масс.) гидроксида циркония в электролит на основе жидкого стекла для микродугового оксидирования алюминиевых сплавов приводит к повышению амплитудных и средних величин катодного и анодного напряжения и тока (в среднем на 5%).

2. Добавка гидроксида циркония в электролит приводит к легированию внешнего рыхлого технологического слоя покрытия оксидом циркония с концентрацией свыше 7 масс. %. Внутренние слои покрытия, прилегающие к металлу, состоят в основном из оксида алюминия.

3. При прочих равных условиях формирования покрытий (протекающий ток, время обработки) на одной и той же толщине твердость покрытий на основе оксида алюминия, полученных с использованием модифицированного гидроксидом циркония электролита, оказывается на 30% выше соответствующей, полученной по стандартной технологии.

Список использованной литературы

1. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М.: Техносфера, 2011. 464 с.
2. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
3. Гордиенко П.С. Электрохимическое формирование покрытий на алюминии и его сплавах при потенциалах искрения и пробоя. Владивосток, Дальнаука, 1999 –232с.
4. Жуков С.В., Кантаева О.А., Желтухин Р.В. и др. Исследование физико-механических свойств, структуры и фазового состава покрытий, полученных методом микродугового оксидирования. М.: Приборы, 2008. №4. С. 28-32.
5. Казанцев И.А., Кривенков А.О. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием: монография / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007.–240 с.
6. Дабижа А.А., Плинер С.Ю. Упрочнение керамических материалов за счет фазового перехода ZrO_2 // Огнеупоры. – 1986. – № 11. – с. 23-28.
7. Особенности получения прочной керамики, содержащей диоксид циркония / Е.С. Лукин, Н.А. Попова, Н.И. Задвижкова и др. // Огнеупоры. – 1991. – № 9. – с. 5-7.
8. Влияние некоторых технологических факторов на свойства керамики из частично стабилизированного диоксида циркония / А.Г. Караулов, Е.Б. Процак, Э.Л. Карякина, Т.Е. Константинова // Зб. наук. пр. ВАТ " УкрНДІВ ім. А.С. Бережного". – Харьков: Каравелла, 2002. – С. 53-56.
9. Технология получения нанокристаллических порошков на основе диоксида циркония / В.И. Алексеенко, И.А. Даниленко, Т.Е. Константинова и

др. // Тез. докл. междунар. конференции "Передовая керамика - третьему тысячелетию". – Киев, Украина, 5-9 ноября 2001. – с. 84.

10. Орданьян С.С., Гудовских П.С., Пичунова Д.Н. Керамика на основе Al_2O_3 с добавками плавленной эвтектики $Al_2O_3 - ZrO_2 (Y_2O_3)$ // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – № 1. – с. 4-8.

11. Прочная корундовая керамика Сикор / Е.С. Лукин, Н.А. Попова, Д.Л. Цецхладзе и др. // Огнеупоры. – 1991. – № 3. – с. 11-12.

12. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1974. – 416 с.

13. Баринов С.М., Шевченко В.Я. Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. – 159 с.

14. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.