**Большенко, Андрей Викторович. Импульсные регуляторы тока для микроплазменного оксидирования : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.01 / Большенко Андрей Викторович; [Место защиты: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т)].- Новочеркасск, 2013.- 202 с.: ил. РГБ ОД, 61 13-5/2155**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)»**

На правах рукописи

C:\Users\Pavel\AppData\AppData\Local\Temp\FineReader11.00\media\image1.png

04201360514

**Большей ко Андрей Викторович**

**ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО**

**ОКСИДИРОВАНИЯ**

Специальность 05.09.01 — Электромеханика и электрические аппараты

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - канд.техн.наук., профессор В.П. Гринченков

Новочеркасск-2013

**Оглавление**

Введение 5

1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ

МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ 8

* 1. История развития исследований в области микроплазменного

оксидирования 8

* 1. Оборудование для технологического процесса

микроплазменного оксидирования 9

* 1. Электрические режимы формирования МПО-покрытий 11
  2. Известные решения по реализации регуляторов тока установок

для МПО 17

* 1. Параметры импульсных микроплазменных процессов 34

1. КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ 39

* 1. Математическое описание МПО-нагрузки 39
  2. Аналитический расчет переходного процесса тока

МПО-нагрузки при прямоугольной форме поляризующего напряжения...40

* 1. Аналитический расчет переходного процесса тока

МПО-нагрузки при трапециевидной форме поляризующего напряжения .42

* 1. Анализ влияния параметров МПО-нагрузки и поляризующего

напряжения на параметры переходного процесса 45

* 1. Оценка условий применимости расчетных выражений для

определения тока нагрузки 53

* 1. Определение технических характеристик технологического

регулятора тока устройств для микроплазменного оксидирования 56

* 1. Расчет технических характеристик технологического

регулятора тока устройства для микроплазменного оксидирования 60

* 1. [Определение параметров МПО-нагрузки 63](#bookmark21)
     1. [*Определение параметров МПО-нагрузки при прямоугольной форме поляризующего напряжения* 64](#bookmark10)
     2. *Определение параметров МПО-нагрузки при трапецеидальной форме поляризующего напряжения* 68
     3. *Оценка методической погрешности определения параметров микроплазменной системы* 76

3 РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРОВ ТОКА ДЛЯ

МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ 85

1. [Тиристорный преобразователь напряжения 86](#bookmark33)
2. Синтез системы управления тиристорного регулятора тока... 93
3. [Синтез структуры тиристорного регулятора тока 95](#bookmark39)
4. [Моделирование тиристорного регулятора тока 98](#bookmark46)
5. *Моделирование процесса включения регулятора тока* 100
6. *Моделирование процесса включения при минимальной величине начального активного сопротивления* 104
7. *Моделирование процесса включения при различном начальном активном сопротивлении нагрузки* 106
8. *Моделирование процесса стабилизации тока* 109
9. [Транзисторный регулятор тока 112](#bookmark50)
10. [Синтез системы управления транзисторного регулятора тока.... 119](#bookmark38)

120

1. Синтез структуры транзисторного регулятора тока
2. Моделирование транзисторного регулятора тока....

МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ 135

1. Тиристорный регулятор тока 135
2. Транзисторный инверторный регулятор 140
3. Экспериментальные исследования тиристорного регулятора

тока для МПО 141

1. Экспериментальное определение параметров

микроплазменной системы 146

1. [Формирование покрытий с заданными свойствами 148](#bookmark64)

Заключение 151

Список использованной литературы 154

Приложение А. Документы, подтверждающие внедрение разработок

автора 175

Приложение Б. Программы 198

[Приложение Б.1. Программа комплексной модели тиристорного регулятора тока 199](#bookmark77)

[Приложение Б.2. Программа комплексной модели транзисторного регулятора тока 201](#bookmark78)

**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.

В зависимости от назначения покрытий используют различные способы их нанесения, такие как плазменное и газоплазменное напыление, электрофорез, анодирование, детонационный способ и др. Однако существующие методы нанесения покрытий имеют ряд технологических ограничений. К ним относятся, прежде всего, сложность оборудования, невозможность нанесения покрытий на изделия сложной формы, высокая пористость получаемых покрытий и низкая прочность сцепления с подложкой. Кроме того, практически все способы нанесения покрытий требуют тщательной предварительной обработки поверхности изделия, что существенно увеличивает время и стоимость технологического процесса.

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

Отличительной особенностью микроплазменного оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, 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 микроплазменного оксидирования 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 нанесения микроплазменных покрытий в настоящее время в целом достаточно хорошо разработана. Несмотря на это, теоретические представления о процессе еще далеки от совершенства. Известны различные виды режимов нанесения покрытий - поляризация постоянным током, импульсный режим, переменно-полярный режим и др. Форма поляризационных импульсов и другие электрические параметры при реализации того или иного режима подбираются эмпирическим путем и в большинстве случаев требуют повышенных требований к источнику питания.

Применение импульсных режимов формирования покрытия дает возможность улучшать качество микроплазменных покрытий не только на вентильных металлах, но и на меди, свинце, стали. Использование импульсного режима позволяет вести процесс микродугового оксидирования с низкими затратами энергии.

Важнейшим фактором, влияющим на протекание процесса микродугового оксидирования и, соответственно, на свойства формируемых покрытий, является изменение условий поляризации: формы и частоты следования импульсов, силы поляризующего тока, напряжения на ванне и др. На одних и тех же материалах, при использовании одинаковых электролитов, при изменении условий поляризации формируются покрытия, существенно отличающиеся по свойствам. Изменяя условия поляризации и состав электролита, можно формировать на поверхности вентильных металлов

покрытия с различной структурой, химическим составом и свойствами.

**6**

Обзор существующих регуляторов тока для микроплазменного оксидирования показал отсутствие источников питания, использование которых позволило бы формировать покрытия с заданным набором свойств. Имеющиеся источники питания обладают недостаточным набором регулируемых параметров выходного напряжения, что ограничивает спектр свойств формируемых покрытий имеющимися в наличии режимами работы.

Отличительной особенностью разрабатываемых источников питания является то, что входными параметрами, задающими режим работы, являются требуемые свойства покрытия (толщина, шероховатость, твердость и др.).

Заключение

Основная научная и практическая значимость диссертационной работы состоит: в разработке методики проектирования регуляторов тока для микроплазменного оксидирования с учетом особенностей МПО-нагрузки; в разработке принципов построения регуляторов тока, обеспечивающих широкий диапазон изменения параметров процесса МПО, что позволяет получать широкий спектр параметров формируемых покрытий с заданным набором физико-химических свойств. Данный результат достигается использованием разработанной системы управления регулятором тока и разработанных методом определения параметров МПО-нагрузки, что позволяет в режиме реального времени производить косвенное измерение основных параметров МПО-покрытия.

В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования, которые базируются на научных основах теории электрических цепей.

Научные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в производство и используются в качестве инструмента для проведения научных исследований в области формирования МПО-покрытий.

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Предложена модель МПО-нагрузки, отличающаяся от известных тем, что в нее включена индуктивность, обусловленная наличием монтажных проводов, и которая производит значительное влияние на переходные процессы изменения тока МПО-нагрузки.
2. Проведен аналитический расчет переходного процесса изменения тока МПО-нагрузки при воздействии на нее импульсом прямоугольной и трапециевидной формы.
3. Проведены исследования влияния параметров МПО-нагрузки на переходной процесс изменения тока нигузки, в результате которых выявлено

151

значительное влияние индуктивности и длительности фронта импульса напряжения.

1. Разработаны методы и алгоритмы определения параметров МПО-нагрузки, отличающиеся от известных тем, что учитывается наличие индуктивности в составе МПО-нагрузки и позволяет производить обработку при более низкой малой частоте квантования исходного сигнала тока нагрузки [155].
2. Разработана методика и алгоритм расчета параметров регулятора тока для МПО.
3. Предложены два варианта реализации регуляторов тока для МПО, обеспечивающих требуемые функциональные требования.
4. Разработаны комплексные модели предложенных вариантов тиристорного и транзисторного регуляторов тока, включающих силовой модуль, систему управления и МПО-нагрузку.
5. Проведена разработка регуляторов систем управления регуляторами тока для МПО.
6. Проведено моделирование процессов МПО в критических режимах работы, в результате чего обнаружилась необходимость модификации регулятора системы управления. Результаты моделирования подтвердили возможность использования разработанных силовых модулей регуляторов тока и их системы управления.
7. Разработан и создан опытный образец тиристорного регулятора тока для МПО.
8. Разработан и создан макет транзисторного регулятора тока для

МПО.

1. Экспериментальные исследования тиристорного регулятора тока подтвердили адекватность разработанной комплексной модели и удовлетворение всех предъявляемых требований. Максимальный уровень пульсаций среднего значения тока нагрузки при моделировании составил

0,5%, при экспериментальных исследованиях - 4,75%.

152

1. В результате экспериментальных исследований транзисторного регулятора тока была превышена заданная точность стабилизации выходного тока нагрузки, что обусловлено сильной зашумленностью измеряемых сигналов. Максимальный уровень пульсаций среднего значения тока нагрузки при моделировании составил 2,57%, при экспериментальных исследованиях - 7,47%.
2. В результате экспериментальных исследований с использованием созданных регуляторов тока сформирована база данных покрытий, позволяющая формировать покрытия с заданными свойствами.
3. Разработанный способ позволяет производить косвенное определение параметров МПО-покрытия в процессе МПО.
4. В результате использования созданных регуляторов тока получен ряд патентов на изобретения формирования покрытий с уникальными свойствами [164].
5. Результаты работы использовались при выполнении двух государственных контрактов с Министерством образования и науки Российской Федерации.

Список использованной литературы

1. Brown S.D. Anodic Spark Deposition from Aqueous Solutions of NaA10**2**

and Na2SiO / S.D. Brown, K.J. Kuna, Tran Bao Van // J. Amer. Ceram. Soc. - 1971. -V. 54, №**4**. - P. 384-390.

1. Tran Bao Van. Mechanism of Anodic Spark Deposition / Tran Bao Van, S.D. Brown, G.P. Witrz // Amer. Ceram. Bull. - 1977. - V. 56, №**6**. - P. 563-568.
2. Николаев A.B. Новое явление в электролизе / А.В. Николаев, Г.А. Марков, Б.Н. Пещевицкий // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. - 1977. - Вып. 5.-С. 32-33.
3. А.С. 926083 (C25D 9/06). Способ электролитического нанесения силикатных покрытий / Г.А. Марков, Б.С. Гизатуллин, И.В. Рычажкова (СССР); опубл. 1982, Бюл. №17.
4. А.С. 926084 (C25D **1**1/02; В23Р 1/18). Способ анодирования металлов и сплавов / Г.А. Марков, Е.К. Шулепко, М.Ф. Жуков (СССР); опубл. 1982, Бюл. №17.
5. Баковец В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. - 168с.
6. А.С. 526961 СССР (НОЮ 9/24). Способ формовки анодов электрических конденсаторов / Г.А. Марков, Г.В. Маркова (СССР); опубл. 1976, Бюл. №32.
7. А.С. 582894 СССР (B22D 15/00). Способ изготовления металлической литейной формы / Ю.А. Караник, Г.А. Марков, В.Ф. Минин и др. (СССР); опубл. 1977, Бюл. №45.
8. А.С. 657908 СССР (B22D 15/00. В22С 9/00). Способ изготовления литейных форм и стержней / Ю.А. Караник, Г.А. Марков, В.Ф. Минин и др. (СССР); опубл. 1979, Бюл. №15.
9. Марков Г.А. Электрохимическое окисление алюминия при катодной поляризации / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. - 1983. - №7, вып. 3. - С. 31-34.

154

1. Малышев В.Н. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования / В.Н. Малышев, Г.А. Марков, В.А. Федоров, А.А. Петросянц, О.П. Терлеева // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1984. - №1. - С. 26-27.
2. Марков Г.А. Стадийность в анодно-катодных микроплазменных процессах / Г.А. Марков, В.И. Белеванцев, А.И. Слонова, О.П. Терлеева // Электрохимия. - 1989. - Т. 25, вып. 11. - С. 1473-1479.
3. Марков Г.А. Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий / Г.А. Марков. О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Научные труды /МИНХиГП им. И.М. Губкина; вып. 185: Повышение износостойкости деталей газонефтяного оборудования за счет реализации эффекта избирательного переноса и создания износостойких покрытий. - М., 1985. - С. 54-64.
4. Миронова М.К. О формировании пленки при анодном микродуговом оксидировании / М.К. Миронова // Защита металлов. - 1990. - Т. 26, №2.-С. 320-323.
5. Жуков М.Ф. Исследование поверхностных разрядов в электролите / М.Ф. Жуков, Г.Н. Дандарон, Б.И. Замбалаев, В.А. Федотов // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. Наук. - 1984. - №4, вып. 1. - С. 100-104.
6. Баковец В.В. Оксидные покрытия, полученные микродуговой обработкой титанового сплава в кислых электролитах / В.В. Баковец // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1987. - Т. 23, №7. - С. 1226-1228.
7. Электрохимические микроплазменные процессы в производстве защитных покрытий // Сборник научн. тр. ИНХ СО АН СССР. Изд. 2. - Новосибирск, 1990. -32 с.
8. Марков Г.А. Микродуговое оксидирование алюминия в концентрированной серной кислоте / Г.А. Марков, В.В. Татарчук, М.К. Миронова // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. - 1983. - №7, Вып. 2. - С. 34-37.
9. Марков Г.А. Структура анодных пленок при микродуговом оксидировании алюминия / Г.А. Марков, Н.К. Миронова, О.Г. Потапова,

В.В. Татарчук // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1983. - Т. 19, №7.-С. 1110-1113.

1. Малышев В.Н. Физико-химические характеристики и

износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / В.Н. Малышев, С.И. Булычев, Г.А. Марков и др. // Физика и химия обработки материалов. - 1985. - №1. - С. 82-87.

1. Поляков. О.В. Некоторые закономерности воздействия

микроразрядов на электролит / О.В. Поляков, В.В. Баковец // Химия высоких энергий. - 1983. - Т. 17, №4. - С. 291-295.

1. Баковец В.В. Оксидные покрытия, полученные микродуговой обработкой титанового сплава в кислых электролитах / В.В. Баковец // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1987. - Т. 23, №7. - С. 1226-1228.
2. Черненко В.И. Получение покрытий анодно-искровым

электролизом / В.И. Черненко, JT.A. Снежко, И.И. Папанова. - Л.: Химия, 1991.-128 с.

1. Снежко Л.А. Импульсный режим для получения силикатных покрытий в искровом разряде / Л.А. Снежко, Ю.М. Бескровный,

В.И. Невкрытый // Защита металлов. - 1980. - Т. 16, №3. - С. 365-367.

1. Снежко Л.А. Получение анодных покрытий в условиях искрового разряда и механизм их образования: автореф. дис. ... канд. хим. наук. - Днепропетровск, 1982. - 16 с.
2. Черненко В.И. Прогрессивные импульсные и переменно-токовые режимы электролиза / В.И. Черненко, К.П. Литовченко, И.П. Папанова. - Киев: Наукова думка, 1986. - 176 с.
3. Снежко Л.А. Рост оксида алюминия в растворах силиката натрия в области предпробойных напряжений / Л.А. Снежко, И.И. Папанова, Л.С. Тихая, В.И. Черненко // Защита металлов. - 1990. - Т. 26, №**6**. - С. 998-1002.
4. Снежко Л.А. Анодно-искровое осаждение силикатов на переменном токе / Л.А. Снежко, Л.С. Тихая, Ю.З. Удовенко, В.И. Черненко // Защита

металлов. - 1991. - Т. 27, №3. - С. 425-430.

1. Черненко В.И. Электролиты для формовки покрытий на алюминии в режиме искрового разряда / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, С.Е. Чернова

// Защита металлов. - 1982. - Т. 18, №3. - С. 454-458.

1. Черненко В.И. Исследование процесса образования алюмосиликатных покрытий из водных электролитов в искровом разряде /В.И. Черненко, Л.А. Снежко, Ю.М. Бескровный // Вопросы химии и химической технологии. - 1981. - Вып. 65. - С. 28-30.
2. Черненко В.И. Исследование коррозионной стойкости сплавов алюминия с силикатными покрытиями / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, Г.Б. Розенбойм // Защита металлов. - 1981. - Т. 17, №5. - С. 618-620.
3. Снежко Л.А. Энергетические параметры процесса получения силикатных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда / Л.А. Снежко, В.И. Черненко // Электронная обработка материалов. - 1983. - №2 (110).-С. 25-28.
4. Снежко Л.А. Анодный процесс при формовке силикатных покрытий / Л.А. Снежко, В.И. Черненко, С.Г. Павлюс // Защита металлов. - 1984. - Т. 20, №2. - С. 292-295.
5. А.С. 827614 СССР. Электролит для анодирования вентильных металлов и их сплавов / В.И. Черненко, Н.Г. Крапивный, С.Г. Павлюс, Л.А. Снежко (СССР); опубл. 1981, Бюл. №17.
6. А.С. 937853 СССР. Способ электролитического нанесения покрытий на алюминий и его сплавы / Л.А. Снежко, В.И. Черненко (СССР); опубл. 1982, Бюл. №23.
7. А.С. 964026 СССР (C25D 9/06). Электролит для нанесения керамических покрытий на сплавы алюминия / Л.А. Снежко, В.И. Черненко (СССР); опубл. 1982, Бюл. №37.
8. Гордиенко П.С. Определение параметров процесса микродугового оксидирования по вольтамперным характеристикам / П.С. Гордиенко, Т.П. Яровая // Электронная обработка материалов. - 1990. - №**6**. - С. 44-48.
9. Гордиенко П.С. О механизме роста МДО покрытий на титане / П.С. Гордиенко, С.В. Гнеденков, C.JT. Синебрюхов и др. // Электронная обработка материалов. - 1991. - №2. - С. 42-46.
10. Руднев B.C. Влияние электролита на результат микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / B.C. Руднев, П.С. Гордиенко,

А.Г. Курносова // Защита металлов. - 1991. - Т. 27, №1. - С. 106-110.

1. Гордиенко П.С. Образование покрытий на аноднополяризованных электродах в водных электролитах при потенциалах пробоя и искрения / П.С. Гордиенко. - Владивосток: Дальнаука, 1996. - 216 с.
2. Гордиенко П.С. Микродуговое оксидирования титана и его сплавов / П.С. Гордиенко, С.В. Гнеденков. - Владивосток: Дальнаука, 1997. - 186 с.
3. Гордиенко П.С. Защита от биметаллической коррозии в паре сталь- титан микродуговым оксидированием / П.С. Гордиенко, Г.М. Скоробогатова, О.А. Хрисанфова и др. // Защита металлов. - 1992. - Т. 28, №1. — С. 117-121.
4. Гордиенко П.С. Исследование газопроницаемости титана ВТ 1-0 с МДО покрытиями / П.С. Гордиенко, С.Б. Буланова, О.А. Хрисанфова и др. // Электронная обработка материалов. - 1991. - №3. - С. 35-39.
5. Гордиенко П.С. Элементарный состав анодных пленок на сплаве НбЦУ, полученных при потенциалах искрения в водных электролитах / П.С. Гордиенко, П.М. Недозоров, А.Г. Завидная // Электронная обработка материалов. - 1991. - №1. - С. 38-41.