

ПОНОМАРЕВ Илья Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ
МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кривоносова Екатерина Александровна

Официальные оппоненты: **Мелюков Валерий Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», профессор кафедры «Прикладная математика и информатика»;

Щербаков Юрий Васильевич
кандидат технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова», заведующий кафедрой «Технический сервис и ремонт машин»

Ведущая организация: **ФГБУН Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург**

Защита диссертации состоит 24 мая 2016 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=255358>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Евгений Юрьевич Раскатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных путей решения задачи создания новых машин и механизмов, повышения их эффективности, является использование легких материалов с высокой удельной прочностью. Использование алюминиевых сплавов при изготовлении сварных конструкций, на сегодняшний день, непрерывно повышается, что связано с более высокими, по сравнению со сталями, коррозионной стойкостью в ряде агрессивных жидких и газовых сред, электро- и теплопроводностью, немагнитностью.

Основным недостатком данного материала является высокая чувствительность структуры металла к температурному циклу сварки, а также различным типам дефектов и включений в металле сварных швов, значительно снижающих его механические свойства. В большей степени структурные изменения (неравномерное распределение легирующих элементов, возникновение различных фаз химических соединений) влияют на коррозионные свойства и износостойкость поверхности сварных швов, приводят к их значительному снижению.

Причинами уменьшения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов в сварных швах являются: возникновение гальванических пар при работе в кислых или щелочных средах вследствие неравномерного распределения легирующих элементов при сварке; образование на границах зерен металла различных фаз (β - Al_3Mg_2 для сплавов АМг, с содержанием магния более 5-6%), что увеличивает вероятность возникновения межкристаллитной коррозии; неметаллические включения и соединения, разрыхляющие естественную оксидную пленку.

Для предотвращения возникновения коррозии применяются различные термические способы обработки, например, искусственное старение, изменение режимов сварки и состава легирующих элементов. Сопутствующий и последующий подогрев уменьшают скорость кристаллизации, способствует равномерному распределению элементов шва, однако не всегда может быть применим к сварным конструкциям. Кроме того, в настоящее время разрабатываются и активно применяются различные способы обработки и модифицирования поверхностного слоя, такие как различные типы анодирования и оксидирования.

Процесс микроплазменного оксидирования является одним из наиболее перспективных способов обработки и модифицирования поверхностного слоя алюминиевых сплавов. Первые работы по микроплазменному оксидированию берут начало еще в 50-70х годах в США и СССР. Данный процесс в настоящее время применяется в различных отраслях промышленности, и, в зависимости от области использования, в различных литературных источниках обозначен как микроплазменное оксидирование или искровое анодирование.

Главным преимуществом данного вида обработки является его простота реализации и безопасность для окружающей среды. Использование микроплазменного оксидирования для обработки сварных швов алюминиевых сплавов и создания защитного покрытия значительно упрощает обработку данного материала, может применяться как ко всей свариваемой конструкции, так и локально, непосредственно на сварных швах.

Основной проблемой при эксплуатации покрытий, полученных микроплазменным оксидированием на алюминиевых сплавах, является их недостаточная толщина и потеря

рабочих свойств, вследствие пористости основного слоя покрытия.

Кроме того, на сегодняшний день недостаточно изучен механизм формирования микроплазменных разрядов на поверхности изделий, а также его взаимосвязь с такими параметрами, как плотность тока, напряжение, частота переменного, постоянного и импульсного тока. Это затрудняет выбор параметров процесса микроплазменного оксидирования, необходимых для получения заданных механических и специальных свойств защитных оксидных покрытий. Параметры процесса микроплазменного оксидирования чаще всего не являются оптимальными, задаются опытным экспериментальным путем, что приводит к дополнительным экономическим затратам. Большинство исследований по данной тематике (научная школа И.В. Суминова, А.В. Эпельфельда) на текущий момент направлены на исследование влияния различных составов электролитов на физические свойства покрытий, однако исследований по влиянию электрических параметров, таких как частота, полярность и плотность, а также применению различных источников питания не проводилось. Существующие источники питания для проведения микроплазменного оксидирования не позволяют в полной мере регулировать электрические параметры процесса.

Таким образом, актуальным является решение проблемы повышения коррозионной стойкости и износостойкости сварных швов алюминиевых сплавов микроплазменным оксидированием на основе выявления механизма процесса формирования микроплазменного разряда, и установления закономерностей влияния электрических параметров процесса на механические и специальные свойства покрытий на поверхности сварных швов.

Цель работы: повышение коррозионных свойств поверхности сварных швов и деталей из алюминиевых сплавов методом микроплазменного оксидирования.

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

- 1) на основе анализа литературных источников по микроплазменному оксидированию выявить закономерности формирования покрытия на поверхности алюминиевых сплавов, установить механизм образования покрытия;
- 2) выявить закономерности влияния электрических режимов (частота, форма, скважность и сила электрического тока) на структуру и механические свойства (коррозионную стойкость, толщину, пористость, износостойкость, микротвердость) получаемых оксидных покрытий на поверхности сварных швов из алюминиевых сплавов; получить физическую модель образования покрытия на основе экспериментальных данных;
- 3) создать математическую модель, описывающую зависимость механических свойств (толщины и микротвердости) защитных оксидных покрытий на поверхности сварных швов из алюминиевых сплавов от электрических режимов процесса;
- 4) разработать технологические рекомендации для процесса микроплазменного оксидирования, повышения коррозионной стойкости и износостойкости поверхности сварных швов из алюминиевых сплавов.

Научная новизна работы:

- 1) Разработаны физическая и математическая модели процесса микроплазменного оксидирования, описывающие характер воздействия микроплазменных разрядов на обрабатываемые поверхности и зависимость механических свойств защитных

оксидных покрытий, таких как толщина и микротвердость, от электрических параметров процесса.

2) Впервые предложен процесс микроплазменного оксидирования на пульсирующем электрическом токе высокой частоты для повышения коррозионной стойкости сварных швов алюминиевых сплавов.

3) Выявлено влияние формы электрического тока (синусоида, прямоугольник) на геометрические параметры, структуру, механические свойства оксидного покрытия при микроплазменном оксидировании поверхности алюминиевых сплавов Д16 и АМг5. Определены области применения поверхностной обработки микроплазменным оксидированием деталей из алюминиевых сплавов.

4) Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность увеличения производительности процесса микроплазменного оксидирования алюминиевых сварных швов и получения оксидного покрытия толщиной более 100 мкм с микротвердостью до 30000 Н/мм² за короткий промежуток времени за счет применения наиболее оптимальных электрических параметров.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) Установлено, что искусственное создание защитного оксидного покрытия на поверхности деталей и сварных швов алюминиевых сплавов значительно повышает их коррозионную стойкость в агрессивных средах. Использование защитных покрытий для повышения твердости и коррозионной стойкости поверхности сварных швов расширяет области применения сварных конструкций.

2) Разработан высокочастотный источник питания с возможностью регулировки формы и частоты электрического тока, обеспечивающий увеличение производительности и снижения энергетических и временных затрат на проведение процесса микроплазменного оксидирования более чем на 40%.

3) Даны рекомендации по увеличению производительности процесса и механических свойств оксидного покрытия с помощью микроплазменного оксидирования для обработки сварных швов и ЗТВ алюминиевых сплавов, защиты поверхности сварных швов от различных типов коррозии. Описаны возможные способы дальнейшего совершенствования процесса микроплазменного оксидирования для защиты поверхностей сварных швов деталей из алюминиевых сплавов.

Методология и методы научного исследования. Для достижения поставленной цели было использовано сочетание теоретических, экспериментальных и вычислительных методов исследований.

Для проведения исследования была разработана и скомпонована установка с источником питания для проведения процесса высокочастотного микроплазменного оксидирования (с возможностью получения электрического тока заданной формы и частоты), были выполнены опыты по высокочастотному микроплазменному оксидированию на образцах из алюминиевых сплавов Д16 и АМг5.

Для исследования структуры и свойств изучаемых материалов использовались следующие методы: методы металлографии в виде подготовки поперечных шлифов образцов с покрытием и изучения микроструктуры покрытия с помощью микроскопа и программного комплекса «ВидеоТест-Металл 1.0»; измерение микротвердости оксидного покрытия по Виккерсу; измерение износостойкости оксидного покрытия методом поверхностного трения; измерение коррозионной стойкости защитного покрытия по

методу измерения весового показателя коррозии. Исследование химического состава покрытия проводилось с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре EDX-800HS, Shimadzu.

Положения, выносимые на защиту:

1) Закономерности влияния процесса микроплазменного оксидирования на высоких частотах электрического тока на поверхностные свойства сварных швов алюминиевых сплавов Д16 и АМг5.

2) Зависимость толщины, твердости и износостойкости получаемого покрытия от параметров высокочастотных электрических процессов на поверхности обрабатываемых деталей.

3) Физическая и математическая модели формирования микроплазменных разрядов, позволяющая объяснить увеличение скорости образования покрытия и его микротвердости в несколько раз.

Степень достоверности полученных данных определяется с помощью сопоставления последних с результатами предыдущих исследований в области микроплазменного оксидирования и получения оксидных покрытий на алюминии и его различных сплавах.

Апробация работы:

Основные результаты работы доложены и обсуждены на международной конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (г. Пермь, 2014), 2-й международной научно-практической конференция ИТММ-2014 (г. Пермь, 2014), XI международной научно-практической конференции: «Современные концепции научных исследований» (г. Москва, 2014), «Сварка и диагностика» в рамках XIV Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2014 г.), «Актуальные проблемы современной науки и техники» (Пермь, 2015 г.), «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» в рамках международного молодежного научно-промышленного форума «Прорыв» в рамках промышленной выставки «Иннопром-2015» (Екатеринбург, 2015 г.), 15-ая международная научно-техническая конференция "Сварка и родственные технологии" (Екатеринбург, 2015 г.)

Работа выполнена в рамках проектной части Государственного задания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности № 11.1196.2014/К от 17.07.2014.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 15 публикациях, из которых 5 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Структура и объем работ. Диссертационное исследование состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка литературы. Диссертация изложена на 145 страницах, в том числе содержит 110 рисунков, 17 таблиц, список литературы включает 135 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает в себя общую характеристику диссертационного исследования, обоснование и актуальность выбранной тематики исследования.

В первой главе рассмотрены особенности сварки конструкций из алюминиевых

сплавов, изменения структуры и механических свойств сварных швов. Описаны виды дефектов сварных швов, возникающих в процессе нагрева и сварки деталей из различных алюминиевых сплавов. Рассмотрены основные способы поверхностной обработки и повышения механических и коррозионных свойств сварных швов, рассмотрен процесс микроплазменного оксидирования, как один из способов увеличения коррозионной стойкости и износостойкости поверхности, выделены основные гипотезы и физические модели процесса микроплазменного оксидирования вентильных металлов, в частности алюминиевых сплавов. Основным недостатком сварных конструкций из алюминиевых сплавов является химические и структурные изменения металла шва, снижение прочности, а также коррозионной стойкости, что затрудняет и ограничивает эксплуатацию конструкций в агрессивных средах.

Различные виды алюминиевых сплавов, таких как 1915, 1201 (сплавы, содержащие цинк и медь), а также некоторые сплавы с содержанием магния выше 6% обладают сниженной коррозионной стойкостью в зонах термического влияния, а также непосредственно в сварных швах. Существующие методы поверхностной обработки алюминиевых сплавов для повышения механических свойств и коррозионной стойкости являются достаточно трудоемкими. Большинство из них требуют проведение процесса поверхностной обработки в достаточно агрессивных средах, что является небезопасным для рабочих производства и окружающей среды.

Процесс микроплазменного оксидирования имеет значительные отличия перед существующими способами поверхностной обработки. Данный процесс обладает достаточно низкой трудоемкостью, сложностью оборудования, не требует использования специфичных и дорогостоящих электролитов, специальных методов проведения, в виду его безопасности для окружающей среды. В ходе высокотемпературных реакций микроплазменного оксидирования на поверхности алюминиевых сплавов образуется плотное, твердое керамикоподобное покрытие, обладающее высокими механическими (твердость, износостойкость) и коррозионными свойствами.

На базе проведенного анализа научно-технической информации были определены и сформулированы существующие проблемы, возникающие в сварных конструкциях и деталях из алюминиевых сплавов, в частности 1915, 1911, 1201, АМг6, были выявлены существующие недостатки процесса микроплазменного оксидирования поверхности деталей из алюминиевых сплавов, препятствующие получению оксидных покрытий с повышенными механическими свойствами, а также снижению энергетических затрат данного процесса.

На основе проведенного анализа были сформулированы основные цели и задачи данного исследования.

Методологической основой данной диссертации по сварке и обработке сварных конструкций из алюминиевых сплавов послужили работы Д.М. Рабкина, И.В. Добвищенко, В.Г. Игнатьева, М.Д. Щипкова, Г.А. Николаева, В.М. Белецкого, Г.А. Кривова, а по микроплазменному оксидированию деталей и сварных швов из алюминиевых сплавов послужили работы Н.П. Слугинова, Г. Бетца, Г.А. Маркова, А.В. Николаева, Л.А. Снежко, И.В. Суминова, А.В. Эпельфельда, В.Б. Людина и А.М. Борисова.

В ходе проведенного анализа современных научных работ по микроплазменному оксидированию алюминиевых сплавов было установлено, что на сегодняшний день не

выработана единая физическая модель тепловых процессов, происходящих на поверхности обрабатываемых изделий. Физической модели образования покрытия при микроплазменном оксидировании сегодня также не существует.

Основополагающей физической моделью, описывающей стадии микроплазменного оксидирования вентильных металлов, на сегодняшний день, является модель, разработанная А.В. Николаевым, показанная на рисунке 1.

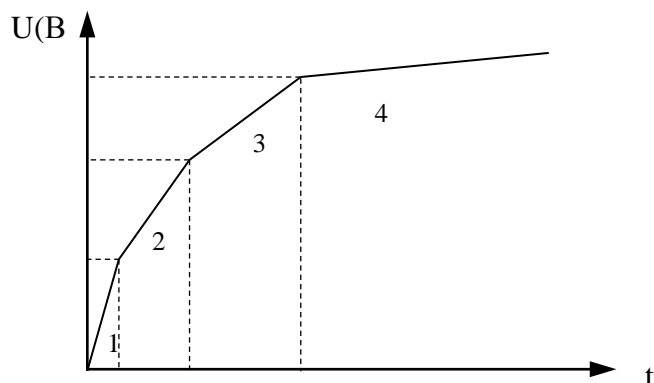


Рисунок 1 – Кривая стадий ведения процесса микроплазменного оксидирования

На первой стадии происходят электролитические процессы окисления поверхности металла с интенсивным выделением газа. Для второй стадии процесса оксидирования характерны очень мелкие разряды с коротким временем горения (искровой режим). На третьей стадии разряды более продолжительны, медленно перемещаются по поверхности (микроплазменный режим). Четвертая стадия характерна крупными дуговыми разрядами, практически не перемещающимися по поверхности обрабатываемой детали (дуговой режим).

В качестве основной физической модели процессов, происходящих непосредственно на поверхности обрабатываемого изделия, стала модель Д.Ю. Харитонова и А.Г. Ракоч, описывающая физические и химические процессы в микропорах образующегося покрытия (рисунок 2).

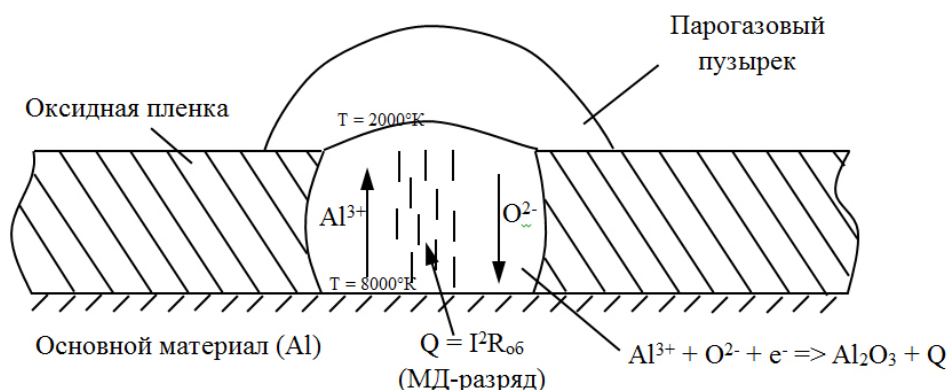


Рисунок 2 – Схема микроплазменного разряда и происходящих в нем химических процессов

Авторы разработанной физико-химической модели выделили два канала проводимости с температурами 8000 и 2000К, указав, что в области горения плазменного разряда происходят плазмохимические реакции преобразования оксидируемого материала и перехода элементов электролита в покрытие.

Позже данные физические модели более подробно были описаны И.В. Суминовым и А.В. Эпельфельдом.

В ходе анализа научной литературы было выявлено, что до настоящего времени, в качестве оборудования применялись промышленные установки с источниками питания, работающими на низких частотах переменного тока. Некоторые работы содержат исследования влияния электрических параметров на микроразряды процесса и механические свойства оксидных покрытий алюминиевых сплавов, полученных микроплазменным оксидированием.

Далее в данной главе рассматриваются наиболее современные представления о стадиях процессов, протекающих на поверхности обрабатываемых деталей при микроплазменном оксидировании:

- 1) Процесс анодного окисления;
- 2) Развитие и протекание плазмохимических реакций.

Первый этап процесса микроплазменного оксидирования, схожий с анодным окислением, протекает на ранних стадиях обработки, в момент образования барьерной оксидной пленки на поверхности обрабатываемого изделия. По мере увеличения толщины барьерного слоя, на его границе увеличивается напряжение до тех пор, пока его значение не будет равно значению электрического пробоя. За счет образования поровых каналов в барьерном слое, происходит перераспределение точек протекания электрического тока, испарения электролита в данных каналах с последующим электрическим пробоем.

После возникновения электрического пробоя поровых каналов, начинает действовать механизм развития и протекания плазмохимических реакций, разделенный на 4 стадии.

На первой стадии образования покрытия, его толщина не превышает 2-3 мкм. Возникающие на поверхности электрические разряды существуют очень короткое время. Скорость перемещения границы жидкости в порах, при этом, достаточно мала и плазменные образования не выходят за пределы пор.

На второй стадии микроплазменных разрядов толщина оксидного слоя и длина пор увеличивается до 150 мкм. За счет увеличения скорости перемещения жидкости в каналах пор, в момент достижения поверхности, плазменное образование выходит за пределы поры, образуя пузырь у поверхности покрытия. С последующим увеличением толщины покрытия, скорость перемещения границы жидкости оказывается слишком высокой, парогазовый пузырек, после выхода за пределы порового канала, расширяется слишком быстро и отрывается от поверхности покрытия. Продукты реакции, при этом, выходят на поверхность канала, оставляя его полностью открытым.

Переход от третьей стадии к четвертой характерен большим количеством незакрытых поровых каналов в оксидном покрытии. Четвертая стадия характерна горением дуговых разрядов в открытых каналах и полного прекращения роста толщины покрытия.

Опираясь на описанный выше механизм развития микроплазменных разрядов, в данной главе предлагается физическая модель поведения микроплазменных разрядов, позволяющая объяснить увеличение скорости образования покрытия и его микротвердости в несколько раз. Графическое представление данной физической модели показана на рисунке 3.

При достижении определенной толщины покрытия, при микроплазменном

оксидировании на частоте 50-100 Гц, скорость движения жидкости внутри порового канала становится слишком высокой, и парогазовый пузырек выходит за пределы канала (рисунок 3а, б).

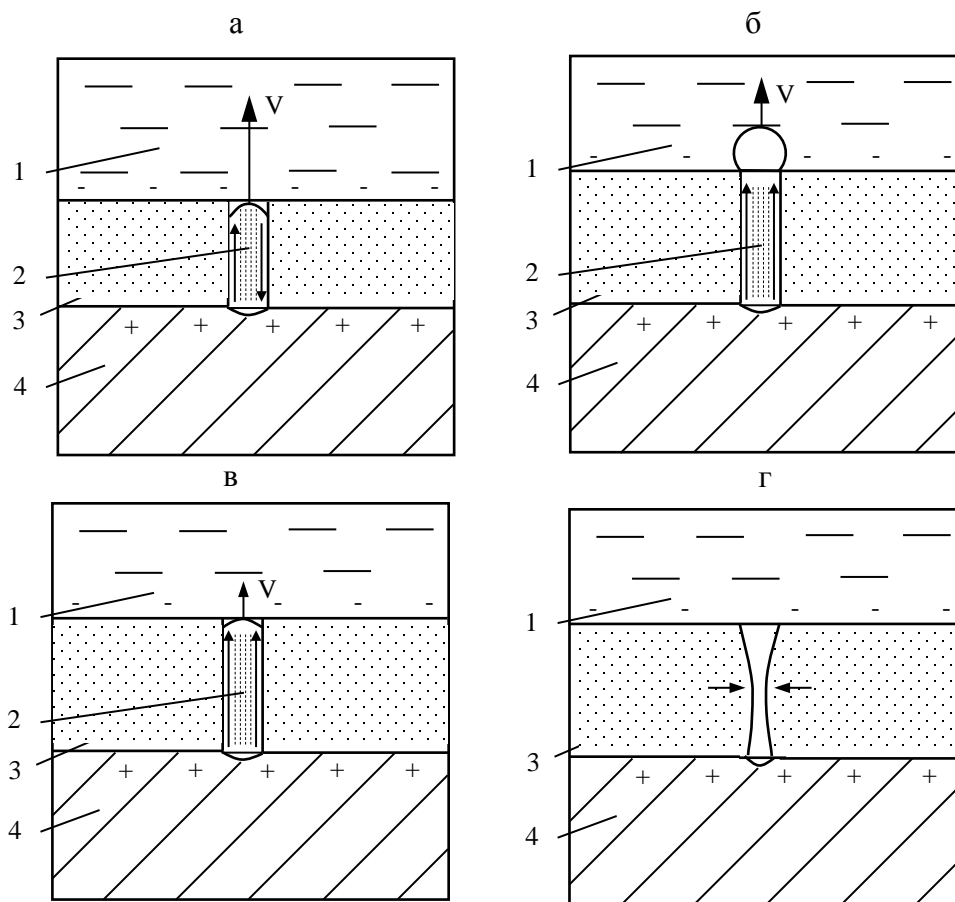


Рисунок 3 – Схема развития плазменных образований: 1 – электролит; 2 – плазменное образование; 3 – покрытие; 4 – основной металл – стадия горения микроразряда в пределах порового канала; б – стадия выхода парогазового пузырька за пределы канала; в – горение микроразряда в режиме высокой частоты; г – гашение разряда

При проведении процесса микроплазменного оксидирования высокочастотным импульсным электрическим током появляется возможность регулировки поведения микроразрядов внутри поровых каналов образованного оксидного покрытия. При воздействии высокой частоты электрического тока длительность горения разряда соответствует длительности воздействия импульса тока таким образом, что его гашение происходит до начала выхода парогазового пузырька на поверхность образованного покрытия (рисунок 3, в). Принудительное гашение микроплазменного разряда в поровом канале способствует уменьшению течения жидкости внутри него, продукты реакции осаждаются на стенках порового канала и, таким образом, производится его постепенное закрытие (рисунок 3, г).

Плотность электрического тока также влияет на характер микроразрядов в поровых каналах. Увеличение значения плотности тока поддерживает горение микроплазменных разрядов, значительно увеличивая их длину в поровых каналах, что приводит к выплескам продуктов реакции из каналов и переходу к дуговому процессу. Уменьшение плотности тока, как и в случае увеличения частоты электрического тока, способствует раннему

принудительному гашению микроразряда в поровом канале, исключая выброс продуктов реакции в электролит, однако, при этом падает и скорость процесса образования оксидного покрытия, а также его конечная толщина.

Вторая глава диссертации посвящена методике проведения экспериментов по микроплазменному оксидированию сварных швов алюминиевых сплавов Д16 и АМг5 для определения влияния состава сплава на свойства покрытия. Данная глава содержит также результаты металлографического исследования полученного покрытия, анализ микротвердости, износостойкости, а также химического состава покрытий.

Методики включают в себя описание установок микроплазменного оксидирования, работающих с традиционным конденсаторным источником питания, а также с разработанным на кафедре СПиТКМ ПНИПУ импульсным лабораторным источником питания с широким диапазоном регулировок электрических параметров процесса.

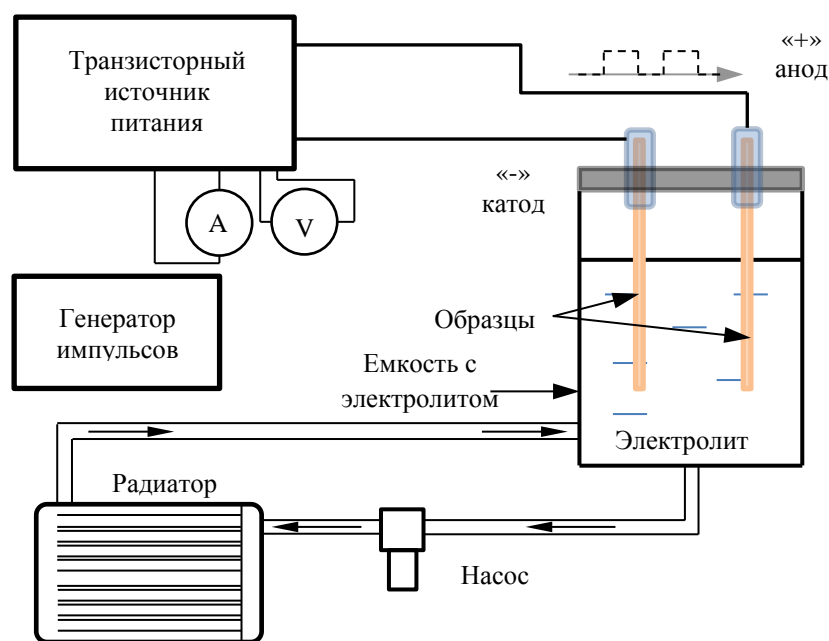


Рисунок 4 – Блок-схема установки для микроплазменного оксидирования

В качестве методик исследований механических и химических свойств покрытий применялись: визуальное исследование поперечного сечения покрытия на металлографическом микроскопе, измерение микротвердости по методу Виккерса, обработка результатов в программном комплексе «ВидеоТест-Металл 1.0»

Исследование износостойкости покрытия проводился на специальном фрикционном механизме, показанном на рисунке 5, с возможностью исследования

глубины износа, а также объема снятого материала с поверхности.

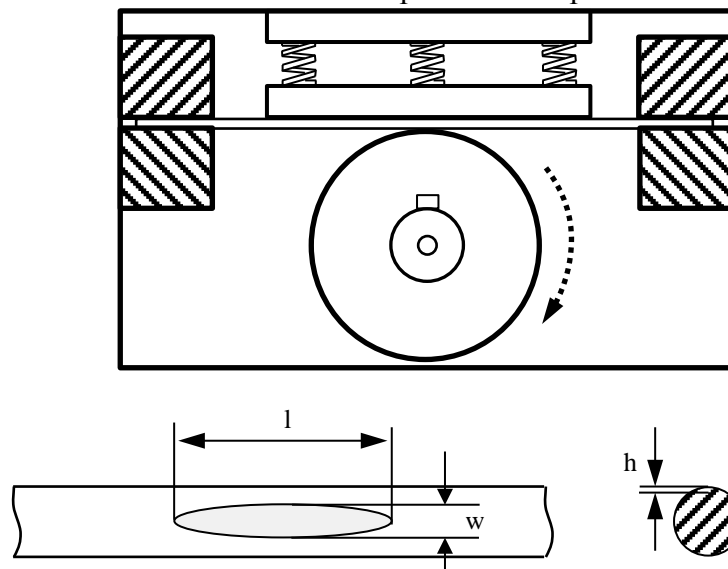


Рисунок 5 – Схема процесса исследования износостойкости МПО-покрытия, где l – длина отпечатка, w – ширина отпечатка, h – глубина отпечатка, r – радиус образца в виде проволоки

В результате вращения валика, происходит трение поверхностей валика и алюминиевой проволоки с оксидным покрытием, образуется канавка на поверхности оксидного покрытия шириной w и глубиной h . При этом, зная радиус проволоки r (рисунок 5), а также ширину отпечатка w , можно найти глубину износа h по формуле:

$$h = r \cdot \left(1 - \cos\left(\arcsin\left(\frac{w}{2 \cdot r}\right)\right)\right) \quad (1)$$

Для изучения химического состава покрытия использовался энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ на спектрометре EDX-800HS, Shimadzu. Рентгенофлуоресцентный анализ поликристаллов является достаточно распространенным методом исследования состава и структуры твердотельных соединений. Данный метод дает информацию о фазовом составе и строении исследуемого вещества.

Исследование коррозионной стойкости защитных оксидных покрытий с помощью методики помещения образцов сварных швов алюминиевых сплавов в агрессивные среды с высокой концентрацией химических элементов.

Кроме того, для выявления механизма формирования разрядов при микроплазменном оксидировании алюминиевых сплавов проводилась высокоскоростная фотовидеосъемка процесса со скоростями до 480 кадров в секунду с помощью фотокамеры FujifilmSL1000.

Третья глава диссертации содержит экспериментальные данные по микроплазменному оксидированию алюминиевых сплавов Д16 и АМг5 на различных электрических режимах. При анализе результатов оксидирования на оборудовании с традиционными источниками питания было выявлено, что на режимах с синусоидальной формой сигнала электрического тока системы деталь-электролит, происходит большой расход электроэнергии на сторонние процессы и нагрев электролита.

Была произведена фотовидеосъемка процесса микроплазменного оксидирования на традиционном оборудовании с конденсаторным источником питания, рабочая частота которого составляет 50 Гц (рисунок 6).

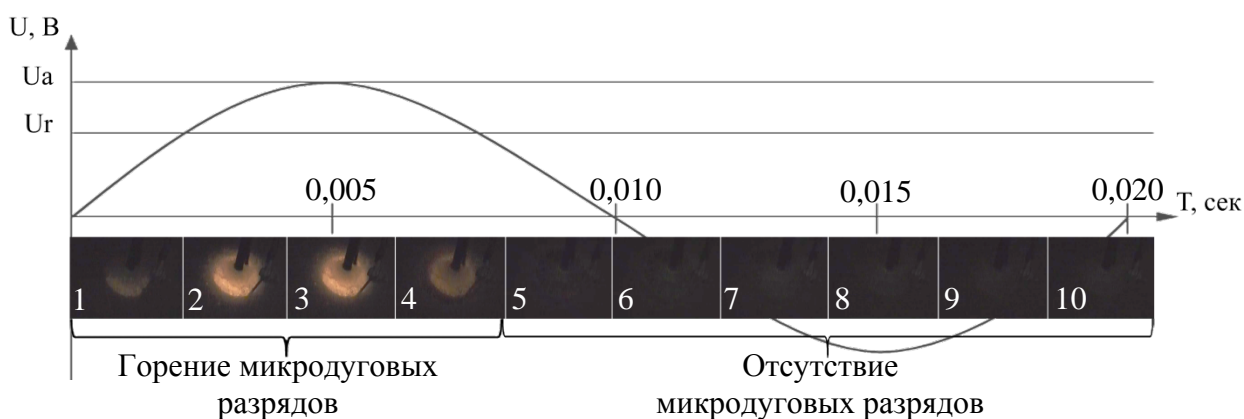


Рисунок 6 – Динамика процесса микроплазменного оксидирования за один период переменного тока частотой 50 Гц, где U_a – амплитудное значение напряжения, U_r – действующее значение напряжения

В ходе обработки полученного видеоряда было установлено, что наибольшая яркость горения микроархразрядов на поверхности (соответствует наибольшей температуре разрядов) присутствует только 40-50% от времени анодного полупериода переменного тока системы деталь-электролит. Во время катодного полупериода разряды на поверхности детали отсутствуют вследствие вентильных свойств пары оксид-металл. За счет данного эффекта, течение тока в катодный полупериод минимально.

Исследование полученных оксидных покрытий показало, что максимальная толщина покрытия образуется при достижении максимальной для оборудования плотности тока, при этом оно имеет значительное количество дефектов в виде прожогов и пористости.

При проведении фотовидеосъемки процесса микроплазменного оксидирования образцов из алюминиевых сплавов на оборудовании с импульсным источником питания было установлено, что длительность существования микроплазменных разрядов на поверхности значительно выше за один полупериод импульсного тока, и составляет 70-90% (рисунок 7).

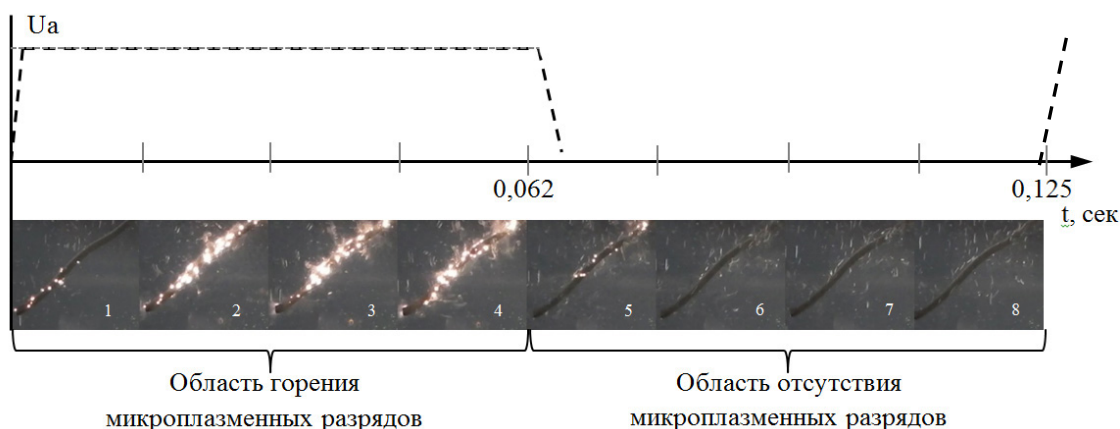


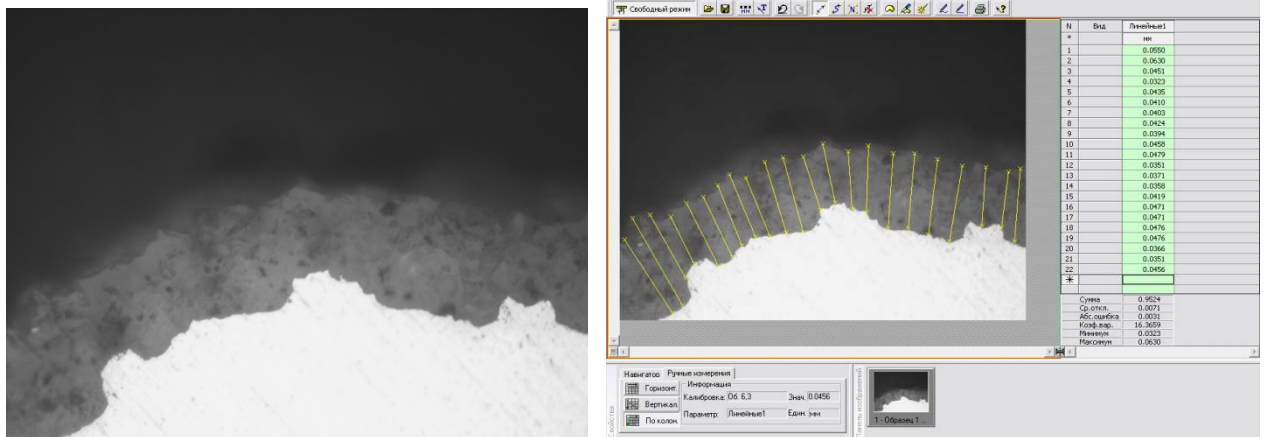
Рисунок 7 – Динамика процесса микроплазменного оксидирования за один период постоянного пульсирующего тока частотой 8 Гц, где U_a – амплитудное значение напряжения

При воздействии полярного импульсного тока на систему деталь-электролит, процесс микроплазменного оксидирования происходит только в анодном режиме (за полупериод переменного тока, когда обрабатываемое изделие является катодом, микроархразряды на поверхности детали отсутствуют), также при этом отсутствуют потери

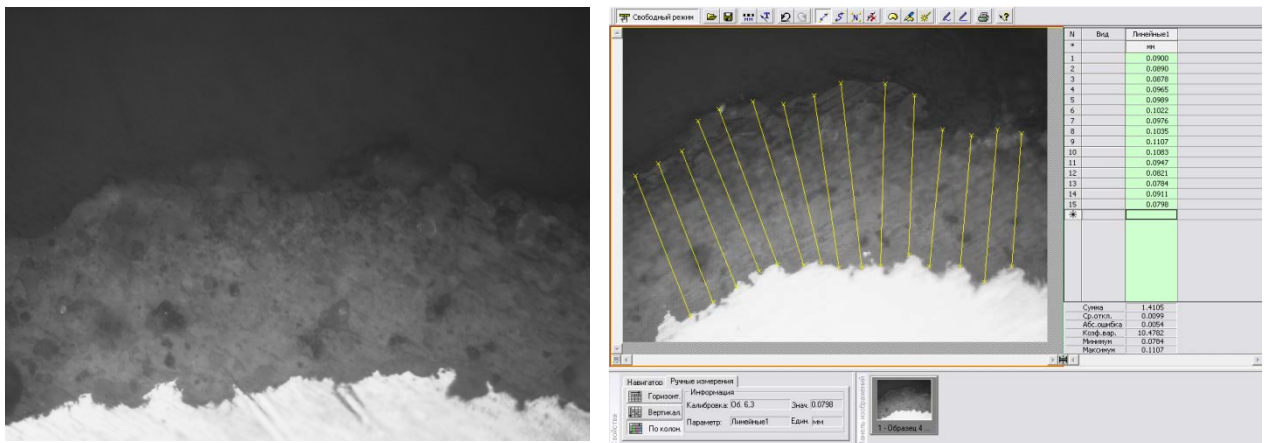
электрической энергии на сторонние процессы.

Выявлена взаимосвязь электрических параметров процесса микроплазменного оксидирования на частотах импульсов полярного электрического тока 50 – 15000Гц и плотности тока 20 А/дм² с толщиной и твердостью полученных оксидных покрытий.

На рисунке 8 показан листинг измерения толщины покрытия проводилось в программе «Видеотест – Металл 1.0» для наиболее характерных случаев.



а)



б)

Рисунок 8 –Микроструктура покрытия образца №1 (увеличение x475), измерение толщины покрытия в программе «Видеотест – Металл 1.0» (а); микроструктура покрытия образца №4 (увеличение x475), измерение толщины покрытия (б).

Графическая зависимость толщины покрытия от частоты импульсов электрического тока показана на рисунке 9.

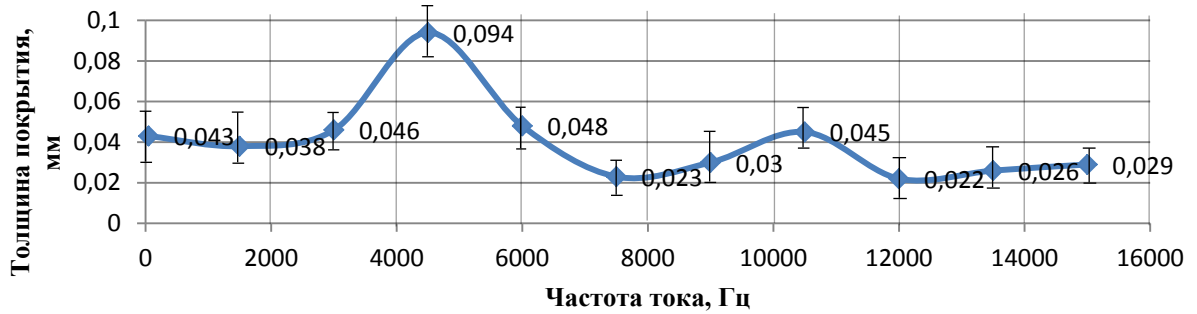


Рисунок 9 – Графическая зависимость толщины покрытия от частоты импульсов тока микроплазменного оксидирования

При увеличении частоты импульсного тока выше 1000 Гц, значение толщины уменьшается до 38 мкм в среднем, а затем, с повышением частоты до 3000 и 4500 Гц резко возрастает до 94 мкм. С дальнейшим повышением частоты, значение толщины падает до 48 мкм на частоте 6000 Гц, и 23 мкм при 7500 Гц. На частоте 10000 Гц наблюдается небольшой скачок значения толщины покрытия до 45 мкм, с дальнейшим уменьшением его значения, при увеличении частоты импульсов электрического тока цепи.

Результаты исследование зависимости микротвердости от частоты импульсов тока микроплазменного оксидирования, а также листинг измерений показаны на рисунке 10.

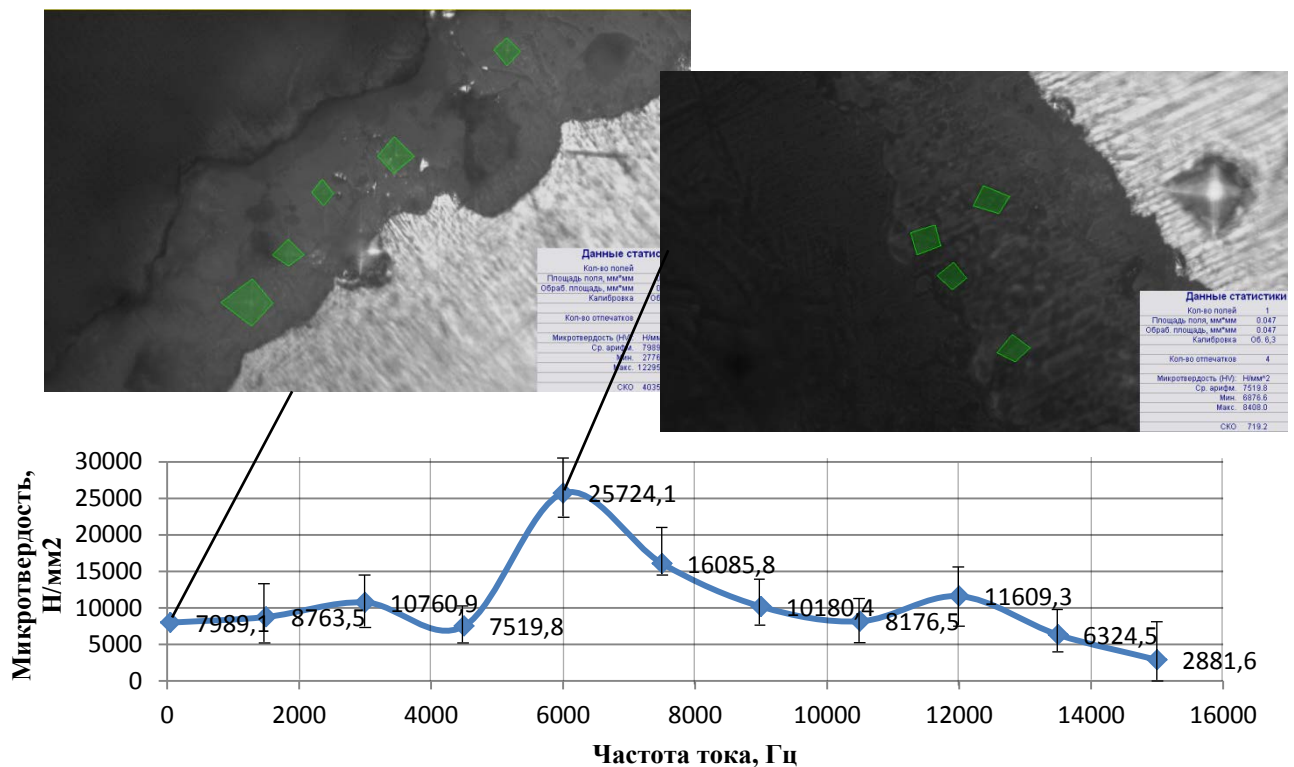


Рисунок 10 – Зависимость микротвердости покрытия от частоты импульсов тока микроплазменного оксидирования. Методика измерения микротвердости (увеличение $\times 475$)

При увеличении частоты выше 1000 Гц, значение микротвердости имеет небольшое увеличение до 8763,5 Н/мм², и достигает максимального значения 25724,1 Н/мм² (микротвердость рабочего слоя составляет около 32000 Н/мм²) на частоте

импульсов тока рабочей цепи 6000 Гц. С дальнейшим увеличением частоты, значение средней микротвердости снижается до 8176,5 Н/мм², с небольшим увеличением до 11603,3 Н/мм² на частоте 12000 Гц.

Таким образом, увеличение частоты импульсов электрического тока способствует повышению скорости образования покрытия практически в два раза, а микротвердости – в 4-6 раз. Кроме того, в данном исследовании были достигнуты значения микротвердости, превышающие ранее достигаемые значения в 1,5-2 раза.

Исследование пористости оксидных покрытий образцов показало, что наиболее крупные поры расположены в верхнем технологическом слое покрытия, существенной зависимости пористости от частоты не выявлено, что подтверждается снимками микроструктур образцов на рисунке 11.

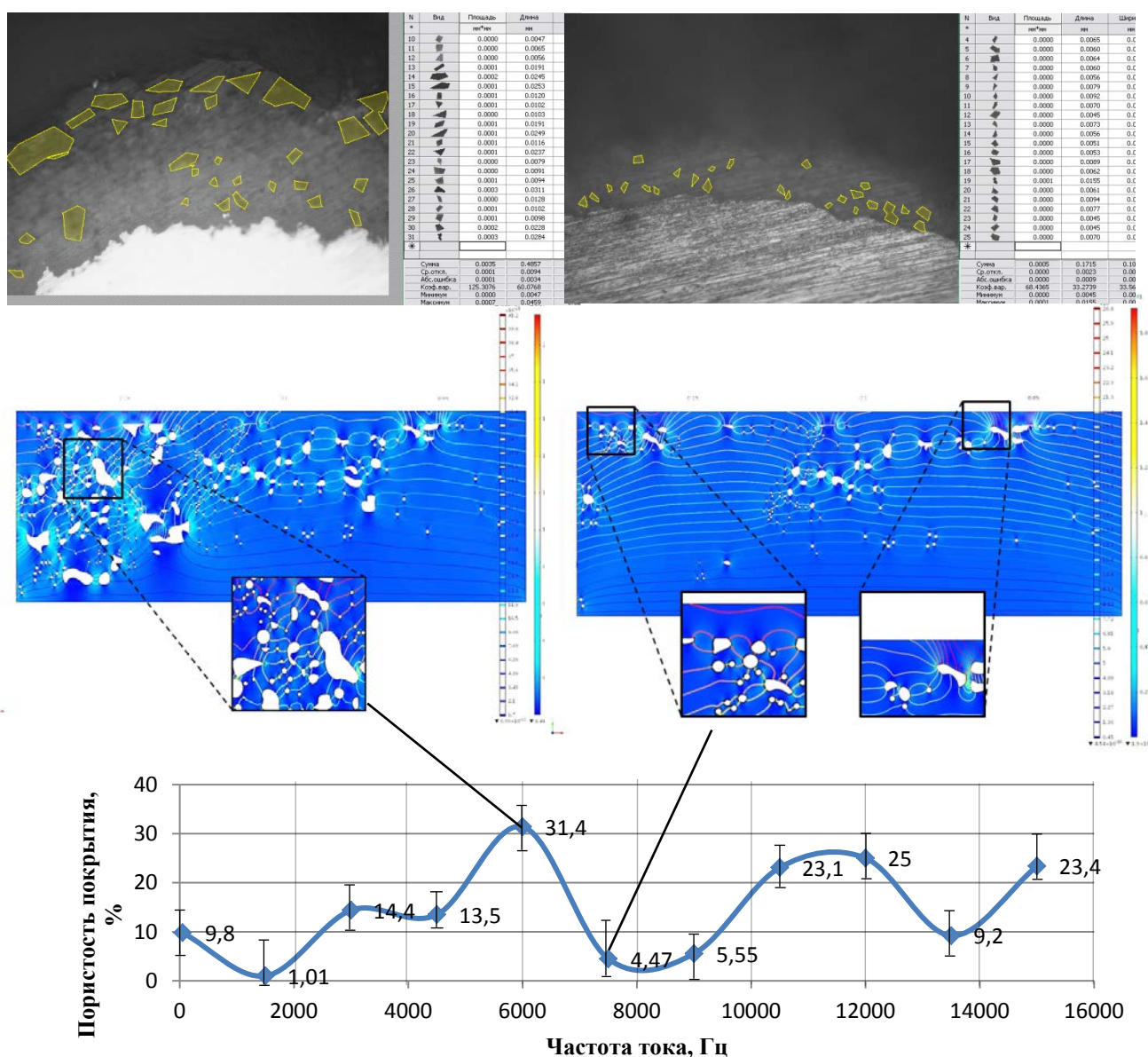


Рисунок 11 – Графическая зависимость пористости покрытия от частоты импульсов тока микроплазменного оксидирования. Методика измерения микротвердости (увеличение x475)

Химический состав покрытия образцов, обработанных микроплазменным

оксидированием на частотах 50-15000 Гц, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемой группы образцов с МПО покрытием

№ образца	Химический состав, масс. %								
	Al ₂ O ₃	Si	K	Mg	Cr	Fe	Mn	S	Ti
1	69.24	23.82	1.81	3.89	0.14	0.11	0.09	0.16	0.05
2	69.92	22.14	3.10	3.80	0.13	0.11	0.07	0.15	0.05
3	70.50	20.56	4.15	3.79	0.10	0.11	--	0.10	0.05
4	71.32	17.79	6.48	3.77	0.09	0.12	--	--	0.06
5	76.11	16.63	3.42	3.39	0.13	0.12	0.10	--	0.07
6	77.55	15.44	3.15	3.25	0.14	0.12	0.10	--	0.06
7	78.21	14.63	2.84	3.75	0.15	0.11	0.09	--	0.05
8	80.42	12.25	2.32	3.80	0.15	0.12	0.10	--	0.07
9	82.85	10.61	2.03	3.90	0.16	0.13	0.11	--	0.07
10	82.98	10.21	1.97	3.95	0.14	0.13	0.10	--	0.07
11	83.12	10.11	1.85	3.90	0.17	0.12	0.11	--	0.06

Результаты химического состава оксидного покрытия показали, что образцы, обработанные на частотах выше 4000 Гц, имеют повышенное содержание в составе покрытия оксида алюминия Al₂O₃. Общее содержание оксида алюминия в составе оксидного покрытия увеличилось с 69% до 83%. При этом заметно уменьшилось содержание кремния, а количество калия увеличивалось с 1,81 до 6,48 на частоте 3000 Гц, а затем уменьшалось до 1,93 до достижения частоты 15000 Гц. Графики зависимости содержания элементов химического состава оксидного покрытия от частоты импульсов тока микроплазменного оксидирования показаны на рисунке 12.

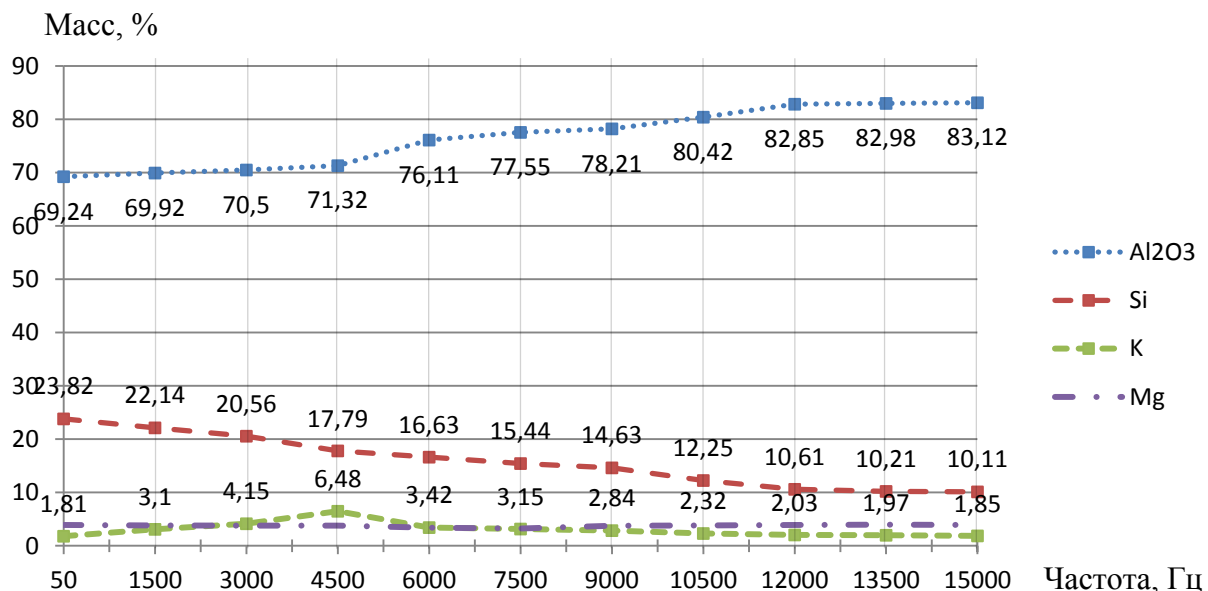


Рисунок 12 – Зависимость химического состава оксидных покрытий от частоты тока

Для оптимизации режимов процесса микроплазменного оксидирования применена методика планирования эксперимента. Параметрами эксперимента были плотность тока (10-30 А/дм²), частота импульсов полярного тока (50-1000 Гц), а также длительность процесса микроплазменного оксидирования (15-45 мин). Критерии оптимизации – толщина и микротвердость покрытия.

Математическая модель, описывающая зависимость толщины покрытия выглядит следующим образом:

$$S = 41.75 - 0.25 \cdot t + 5.08 \cdot j - 3.83 \cdot f - 15.42 \cdot t \cdot j - 4.67 \cdot t \cdot f + 5.00 \cdot j \cdot f - 1.33 \cdot t \cdot j \cdot f, \quad (2)$$

где t – длительность процесса микроплазменного оксидирования, мин; j – плотность электрического тока, А/дм^2 ; f – частота импульсов электрического тока, Гц.

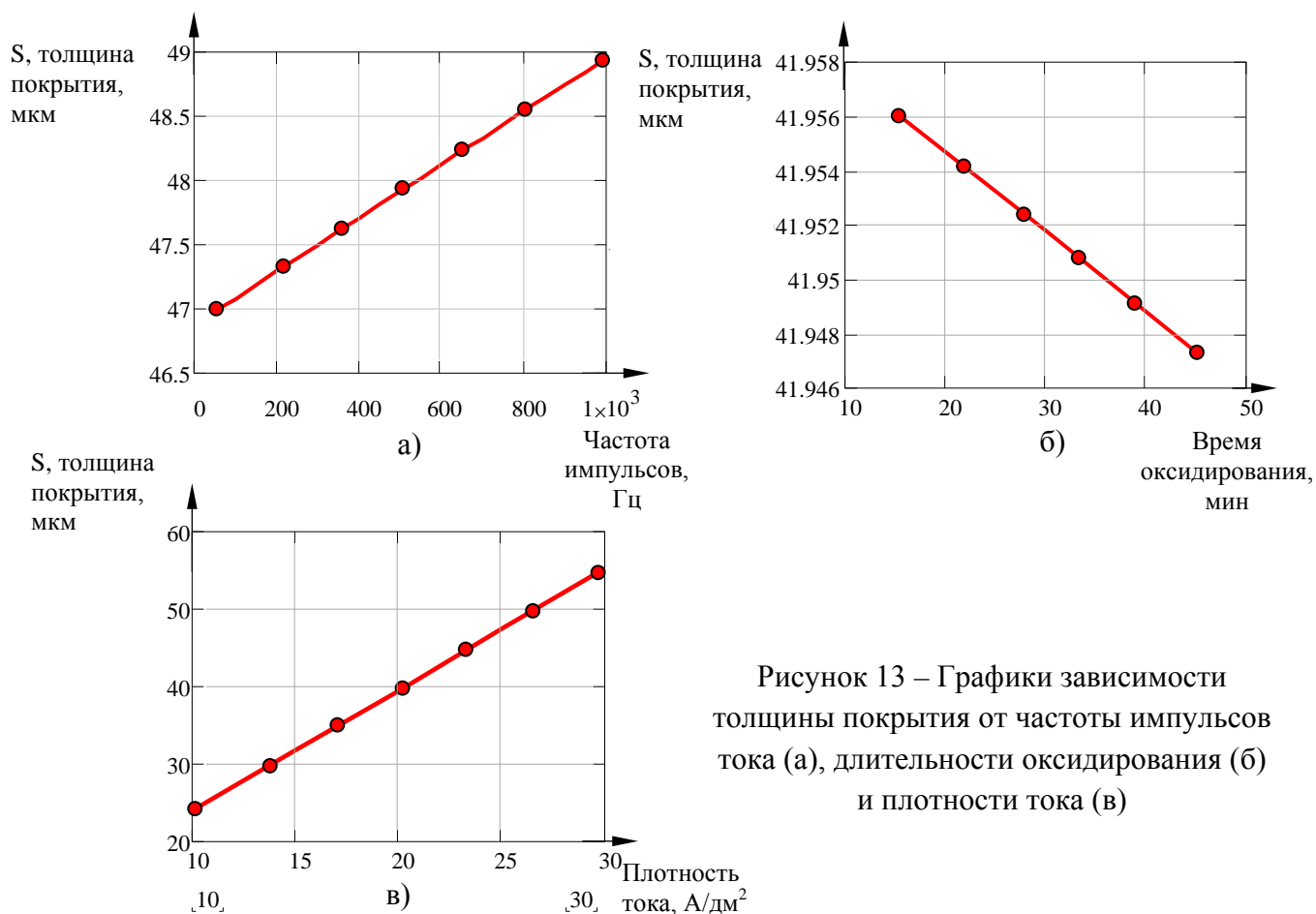


Рисунок 13 – Графики зависимости толщины покрытия от частоты импульсов тока (а), длительности оксидирования (б) и плотности тока (в)

Графики на рисунке 13 показывают, что наибольшее влияние на толщину оксидного покрытия оказывает плотность электрического тока. Так, при плотности тока 10 А/дм^2 толщина покрытия составляет около 25 мкм, тогда как при 30 А/дм^2 составляет около 55 мкм (при частоте 1000 Гц и длительности процесса 25 минут). При этом зависимость имеет характер, близкий к линейному. Частота электрического тока также оказывает влияние на скорость образования покрытия, при увеличении частоты импульсов тока до 1000 Гц, толщина покрытия возрастает до 49 мкм (при плотности тока 25 А/дм^2 и длительности процесса 25 минут).

График зависимости толщины от длительности процесса, при частоте импульсов тока 700 Гц и плотности тока 20 А/дм^2 , описанный данной моделью, имеет обратную зависимость: при увеличении длительности процесса, толщина получаемого покрытия незначительно уменьшается. Данный эффект может быть связан с переходом процесса микроплазменного оксидирования в стадию дуговых разрядов, характеризующимся отсутствием скорости образования покрытия и горением разрядов только в определенных точках покрытия, а также с математической погрешностью полученной модели.

Для оценки износостойкости покрытий, полученных микроплазменным оксидированием в диапазоне частот 50-15000 Гц, и плотности тока 20 А/дм² проводили испытания при длительности износа образцов - 1 мин, с одинаковой силой зажима образцов.

В результате работы устройства для проверки износостойкости, были получены канавки на поверхности оксидного покрытия. По геометрическим размерам канавок износа, была вычислена глубина износа оксидного покрытия. Сравнение полученного износа покрытия было проведено с результатами аналогичного износа образцов из следующих материалов: алюминиевый сплав АМг5, сталь 12Х18, сталь 40Х13.

Результаты измерений размеров износа показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Определение износостойкости образцов

Номер образца	Проволока АМг5 без оксидного покрытия		Проволока АМг5 с оксидным покрытием		Соотношение износа
	Ширина следа, w	Глубина износа, h	Ширина следа, w, мм	Глубина износа, h, мм	
1	0,264	0,018	0,250	0,0160	1,13
2			0,243	0,0150	1,20
3			0,150	0,0056	3,21
4			0,128	0,0041	4,39
5			0,088	0,0019	9,47
6			0,154	0,0059	3,05
7			0,185	0,0086	2,09
8			0,147	0,0054	3,33
9			0,229	0,0130	1,38
10			0,294	0,0120	1,50
11			0,185	0,0086	2,09
	Проволока 40Х13, диаметр 2 мм		Минимальное значение износа		
	0,304	0,006	0,088	0,0019	3,45

Графическая зависимость износостойкости оксидного покрытия образцов показана на рисунке 14.

Полученные результаты показывают, что значения износостойкости образцов достаточно различны. Так, количество снятого материала у образцов, обработанных на низких частотах практически равно количеству снятого материала с образца без покрытия. С увеличением частоты импульсов электрического тока микроплазменного оксидирования, количество снятого материала у образцов уменьшается. Так, износ покрытия у образцов с номерами 4 и 5 (образцы с наибольшей твердостью и толщиной покрытия) наименьший, соотношение износа с алюминиевым сплавом АМг5 составляет 4,39 и 9,47 соответственно. Соотношение износа материала с покрытием и сталью 40Х13 составляет 3,45 по ширине следа износа и 3,06 по длине.

В результате проведенных исследований был сделан вывод, что износостойкость образца, обработанного микроплазменным оксидированием на частоте электрических импульсов 6000 Гц (образец №5) значительно выше, чем у образцов, обработанных на других частотах, в 9 раз выше, чем у алюминиевого сплава АМг5 и в 3,45 раза выше, чем у нержавеющей стали 40Х13.

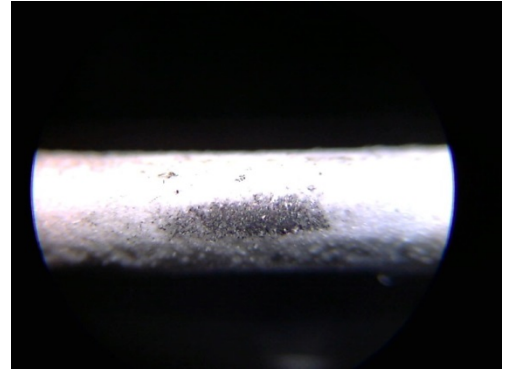


Рисунок 14 – Износостойкость оксидного покрытия образцов (а), снимок следа износа на образце, увеличение x160 (б)

Для оценки коррозионной стойкости МПО покрытий на сварных швах, группа образцов в виде участков сварных швов была обработана на частотах электрических импульсов 50-15000 Гц, а затем помещена в искусственно созданную среду, имитирующую работу участка сварного шва в реальных агрессивных средах. Ускорение процесса коррозии производилось путем увеличения концентрации агрессивных сред. Оценка степени коррозии образцов с оксидным покрытием производилась с помощью методики измерения веса образцов до воздействия агрессивной среды, и убыли веса после:

$$K = \frac{v_0 - v_1}{S \cdot t} \quad (3)$$

где K – весовой показатель коррозии ($\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$), v_0 – вес образца до воздействия агрессивной среды (г), v_1 – вес образца после воздействия агрессивной среды (г), S – площадь поверхности образца (мм^2), t – длительность воздействия агрессивной среды (ч).

Для всех образцов выдержка в химическом растворе, имитирующем агрессивную среду, составляла 12 часов. Химические составы применяемых растворов следующие:

- 1) 3 % NaCl с добавлением NaOH pH 12,6;
- 2) Na_2SO_4 - 1 моль/л, pH 2,5;

Полученные результаты о весовых показателях коррозии показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Весовые показатели коррозии образцов с МПО покрытием

Номер образца	Показатель коррозии в химическом растворе №1, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	Показатель коррозии в химическом растворе №2, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
Образец без покрытия	2,2	2,5
1 (50 Гц)	0,043	0,002
2 (1500 Гц)	0,054	0,004
3 (3000 Гц)	0,067	0,007
4 (4500 Гц)	0,045	0,004
5 (6000 Гц)	0,031	0,001
6 (7500 Гц)	0,034	0,003
7 (9000 Гц)	0,045	0,004
8 (10500 Гц)	0,059	0,007
9 (12000 Гц)	0,054	0,005
10 (13500 Гц)	0,095	0,009
11 (15000 Гц)	0,114	0,011

В результате проведенного исследования были сделаны выводы, что образцы с оксидным покрытием, полученные при высоких значениях импульсов электрического тока (4500-6000 Гц) значительно меньше подвержены коррозии в щелочных и кислотных растворах. Минимальный показатель коррозии группы образцов, помещенных в химическую среду №1, составляет $0,031 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$, для образцов второй группы, помещенных в кислую химическую среду №2 составляет $0,001 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$. Повышенные показатели коррозии образцов, обработанных на частотах (4500-6000 Гц) могут быть связаны с более высокой плотностью оксидной пленки.

Более высокий уровень показателя коррозии группы образцов, помещенных в раствор №1, связан с реакцией нейтрализации оксида алюминия в щелочной среде, аналогичной растворению естественной оксидной пленки алюминиевых сплавов. Низкая скорость растворения оксидного покрытия, в сравнении с естественной оксидной пленкой алюминиевого сплава, обуславливается его более плотной структурой.

Таким образом, был сделан вывод, что обработка поверхности сварных швов микроплазменным оксидированием в значительной степени повышает её коррозионную стойкость, более чем в 50 раз, что исключает необходимость применения различных термических способов обработки.

В **четвертой главе** диссертации предложены основные технические рекомендации по микроплазменному оксидированию поверхности сварных швов из алюминиевых сплавов.

Так как процесс микроплазменного оксидирования производится в среде электролитов, то для его осуществления на поверхности сварных швов могут применяться следующие способы обработки:

- Локальное микроплазменное оксидирование;
- Оксидирование с полным погружением сварного шва/свариваемой детали в электролит;

Процесс локального микроплазменного оксидирования заключается в использовании специального устройства подачи электролита на обрабатываемый участок (рисунок 15).

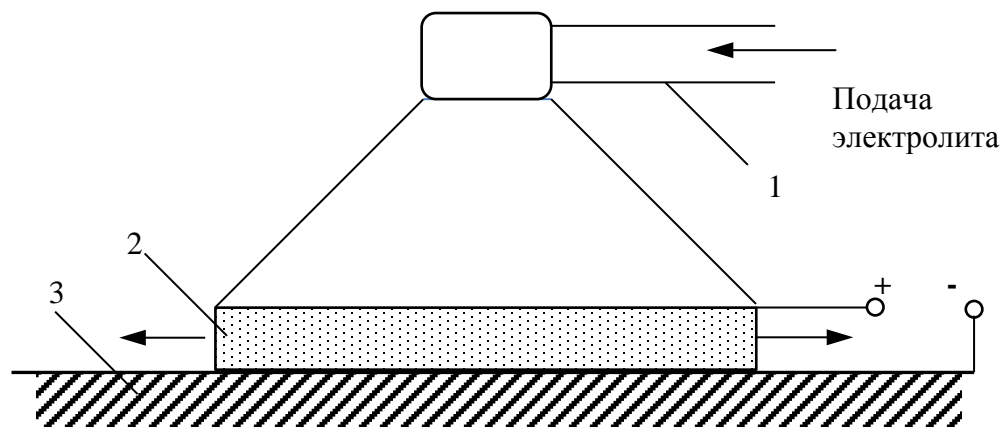


Рисунок 15 – Устройство подачи электролита для локального микроплазменного оксидирования: 1 – изолированная рукоятка с трубкой подачи электролита; 2 – волокнистый экран; 3 – обрабатываемое изделие

Использование данного типа обработки позволяет выполнять процесс

оксидирования локально на сварных швах конструкций, где оксидирование свариваемых деталей или швов с полным погружением в ванну невозможно. При этом, толщина оксидного слоя, кроме электрических параметров, зависит и от скорости перемещения рукоятки.

Для обработки сварных швов микроплазменным оксидированием с полным погружением свариваемых деталей в ванну с электролитом, участки деталей, не требующих обработки, покрываются или заклеиваются диэлектрическим материалом, не допускающим попадание электролита на поверхность. Таким образом, при полном погружении свариваемых деталей, обработка производится только на поверхности сварных швов. После обработки диэлектрические материалы со свариваемых деталей удаляются.

При микроплазменном оксидировании сварных швов наиболее эффективной является прямоугольная форма электрического тока. Наибольшая микротвердость покрытия достигается при частоте импульсов электрического тока 5000-6000 Гц, наибольшая толщина – 4500-5000 Гц.

Для источников питания микроплазменного оксидирования, работающих на частоте до 1000 Гц, наиболее производительным будет процесс при установке плотности тока выше 25 А/дм^2 и частоты импульсов тока 700-950 Гц.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые предложен и изучен процесс микроплазменного оксидирования для повышения коррозионных свойств сварных швов и зон, прилегающих к сварным швам, конструкций из алюминиевых сплавов, работающих в агрессивных средах и наиболее всего подверженных различным видам коррозии.

2. Впервые установлен механизм образования покрытия и влияния частоты импульсов переменного и полярного импульсного тока на процесс микроплазменного оксидирования алюминиевых сплавов, предложена физическая модель, визуализирующая динамику разрядов процесса микроплазменного оксидирования на различных стадиях развития микроарядов в поровых каналах покрытия.

3. Впервые получена закономерность влияния электрических параметров, таких как частота и плотность электрического тока микроплазменного оксидирования алюминиевых сплавов на механические свойства и толщину оксидного покрытия на сварных швах алюминиевых сплавов. Показано, что при увеличении частоты импульсов электрического тока процесса микроплазменного оксидирования, более чем в три раза увеличивается скорость образования покрытия, твердость повышается в 4-5 раз.

4. Установлено, что повышение частоты выше 4-5 кГц, при плотности тока 20-30 А/дм^2 , способствует образованию оксидного покрытия большой толщины (выше 100 мкм) за короткий промежуток времени (15-20 мин.), что значительно повышает энергетическую эффективность процесса, и способствует быстрому образованию покрытия необходимой толщины на различных типах сварных швов деталей из алюминиевых сплавов. Высокая скорость образования покрытия на частотах выше 4-5 кГц, при плотности тока 20-30 А/дм^2 , позволяет проводить процесс микроплазменного оксидирования на локальных участках швах, наиболее всего подверженных коррозии и износу, а также труднодоступных сварных швов больших конструкций.

5. Впервые получена математическая модель, описывающая зависимость толщины защитных оксидных покрытий на поверхности сварных швов из алюминиевых сплавов от

параметров микроплазменного оксидирования (длительность процесса, плотность тока, частота импульсов тока).

6. Установлено, что состав алюминиевого сплава практически не влияет на структуру и механические свойства оксидных покрытий, что подтверждается исследованием свойств покрытий, нанесенных на различные по составу алюминиевые сплавы АМг5 и Д16. Это позволяет выполнять микроплазменное оксидирование практически на всех видах алюминиевых сплавов без изменения механических свойств покрытия.

7. Впервые разработаны и предложены технологические рекомендации для процесса микроплазменного оксидирования, режимы оксидирования и техническая реализация процесса для получения защитных оксидных покрытий на поверхности сварных швов из алюминиевых сплавов.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

- статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК

1) Пономарев И.С. Механические характеристики оксидированной поверхности при различных режимах оксидирования / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова, А.И. Горчаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – №6 - 2. – С. 469-472 (0,31 п.л. / 0,1 п.л.).

2) Пономарев И.С. Особенности процесса микродугового оксидирования алюминиевых сплавов при работе с типовыми промышленными источниками питания / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16037> (дата обращения: 09.02.2015) (0,38 п.л. / 0,19 п.л.).

3) Пономарев И.С. Исследование динамики разряда при микродуговом оксидировании алюминиевого сплава Д16. / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова // Сварочное производство. – 2015. – №3 (964) (0,33 п.л. / 0,17 п.л.).

4) Пономарев И.С. Моделирование напряженного состояния в покрытиях при микроплазменном оксидировании алюминиевых сплавов / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, – №4. – С. 43-60 (0,81 п.л. / 0,41 п.л.).

5) Ponomarev I.S. Investigation of discharge dynamics in microarc oxidation of D16 aluminium alloy / **I.S. Ponomarev**, Е.А. Krivonosova, А.И. Gorchakov // Welding International – 2016. – Vol. 30, – Is.3, – pp. 244-246. DOI: [10.1080/09507116.2015.1044275](https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1044275). (0,33 п.л. / 0,11 п.л.)

Другие публикации:

6) Пономарев И.С. Влияние режимов оксидирования на микротвердость оксидированных покрытий / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова, А.И. Горчаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, №3. – С. 56-61. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.)

7) Пономарев И.С. Особенности влияния электрических режимов на процесс микродугового оксидирования / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова, А.И. Горчаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, №4. – С. 99-103 (0,28 п.л. / 0,09 п.л.).

8) Пономарев И.С. Особенности процесса микродугового оксидирования алюминиевого сплава Д16 / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова, А.И. Горчаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, №1. – С. 55-62 (0,31 п.л. / 0,1 п.л.).

9) Пономарев И.С. Влияние плотности электрического тока на покрытие алюминиевого сплава Д16 при поверхностной обработке микродуговым оксидированием / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, №2. – С. 15-20 (0,27 п.л. / 0,14 п.л.).

10) Пономарев И.С. Влияние электрических параметров на эффективность процесса микродугового оксидирования / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова // Сборник ИТММ-2014, ПНИПУ. – С. 144-147 (0,125 п.л. / 0,06 п.л.).

11) Ponomarev I.S. Features of the influence of electric modes on micro-arc oxidation process / **I.S. Ponomarev**, Е.А. Krivonosova, А.І. Gorchakov // IV Международная конференция «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности», ПНИПУ, – 2015 (0,13 п.л. / 0,04 п.л.).

12) Ponomarev I.S. Micro-arc oxidation of aluminum alloy / **I.S. Ponomarev**, Е.А. Krivonosova, А.І. Gorchakov // Electrotechnica & Electronica E+E. – 2014. – Vol. 49. – № 5-6. – pp. 352-356 (0,27 п.л. / 0,09 п.л.).

13) Пономарев И.С. Анализ производительности процесса микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова // Сборник 14-й международной научно-практической конференции «Сварка и диагностика». – 2014. – С. 151-155 (0,19 п.л. / 0,08 п.л.).

14) Пономарев И.С. Получение твердых защитных покрытий алюминиевых сплавов высокочастотным микроплазменным оксидированием / **И.С. Пономарев**, Е.А. Кривоносова // Сборник докладов международного форума «Сварка и диагностика», – 2015. – С. 81-86. (0,42 п.л. / 0,21 п.л.)

15) Пономарев И.С. Микродуговое оксидирование как метод упрочнения алюминия и алюминиевых сплавов / **И.С. Пономарев**, Т.А. Сарапулова, Е.А. Кривоносова // Техника и технологии машиностроения – 2015. – С. 216-219 (0,22 п.л. / 0,07 п.л.).