

На правах рукописи



Сулина Ольга Владимировна

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И СПОСОБЫ
ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА
ТИТАНОВЫХ ДЕТАЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ
ГЕОМЕТРИИ МИКРОДУГОВЫМ
ОКСИДИРОВАНИЕМ**

Специальность: 01 04 07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2013

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шаталов Валерий Константинович

Официальные оппоненты: Мамонов Андрей Михайлович,
доктор технических наук,
профессор, «МАТИ» РГТУ
имени К. Э. Циолковского, профессор

Травин Всеволод Вениаминович,
кандидат технических наук,
ОАО «Калужский турбинный завод»,
ведущий специалист

Ведущая организация: ОАО «Калужское опытное
бюро моторостроения»

Защита состоится «18» сентября 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Автореферат разослан «18» ~~сентября~~ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Лоскутов С.А.



2851

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Качество поверхностного слоя деталей машин в значительной степени определяет износостойкость, коррозионную стойкость, прочность и другие эксплуатационные свойства изделий.

Создание и исследование способов нанесения защитных покрытий на металлы вентильной группы является одним из важнейших направлений физики конденсированного состояния. Оно прочно завоевало себе место в производственной практике и привлекает все большее внимание теоретиков. Микродуговое оксидирование (МДО), отличаясь простотой и возможностью управлять энергетическими характеристиками процесса, позволяет получать прочные и надежные оксидные покрытия на поверхностях деталей различных конфигураций и размеров.

Из всех освоенных в производстве способов МДО получение оксидных покрытий с применением подвижного электрода на поверхностях крупногабаритных изделий, изделий в собранном виде является единственно возможным способом обработки. Отличительными особенностями МДО подвижным электродом являются малая энергоемкость и возможность транспортировки в условиях механосборочного производства. Такой способ не заменяет оксидирование в электролитных ваннах, может являться дополнением, поскольку обладает рядом преимуществ при обработке деталей сложной формы или больших размеров.

Преимуществом МДО подвижным электродом является то, что таким способом можно наносить оксидные покрытия на сварные и паяные конструкции из различных титановых сплавов. Как правило, этот процесс используется при обработке сплошных и полых удлиненных изделий типа валов, осей, втулок и им подобных.

За последние годы выполнены значительные экспериментально-исследовательские работы по изучению МДО поверхностей деталей из титановых сплавов, в частности для решения проблем энергетического машиностроения.

Возможность оксидирования крупногабаритных титановых конструкций представляет исключительный интерес для производителей энергетического оборудования, авиационной и другой техники, работающих в условиях слабой агрессивной и морской среды. Оксидные покрытия незаменимы при обеспечении противозадирных свойств контактирующих поверхностей из титановых сплавов. В настоящей работе рассматриваются основные технологические схемы обработки различных поверхностей деталей, в том числе и местное оксидирование; приводятся конструкции и расчеты приспособлений и технологического оборудования; показывается влияние режимов обработки на качество оксидного слоя и эксплуатационные свойства. По результатам обобщения научных, производственных и литературных данных в работе приводятся все необходимые сведения по выбору способов и режимов обработки деталей.

Работ по микродуговому оксидированию изделий больших размеров вне ванны пока что мало, поэтому проблема формирования оксидных покрытий на

разнообразных поверхностях крупногабаритных изделий еще не достаточно изучена.

Прогноз применения МДО показал, что внедрение этого способа в производство обеспечивает значительный экономический эффект. Для широкомасштабного внедрения МДО, в частности для оксидирования различных поверхностей крупногабаритных конструкций, необходимы теоретическое рассмотрение и экспериментальное исследование структуры и физических свойств реальных оксидных покрытий, полученных МДО.

Целью диссертационной работы является уточнение физических основ и изыскание способов формирования оксидных покрытий на различных поверхностях деталей микродуговым оксидированием и разработка технологии, обеспечивающей качество, производительность и экологическую безопасность.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Обобщить и проанализировать известные данные и результаты исследований.
2. Выявить и уточнить закономерности и соотношение транспортных и реакционных процессов в анодно-искровой области электродов.
3. Разработать оборудование и оснастку для формирования оксидного покрытия на поверхностях деталей разнообразной формы.
4. Определить оптимальную область режимов МДО для формирования оксидного слоя подвижным электродом на поверхностях тел вращения в обобщенных координатах.
5. Обеспечить качественный переход процесса МДО от традиционно-го оксидирования в электролитических ваннах к оксидированию разнообразных поверхностей крупногабаритных конструкций вне ванны.
6. Сформировать требования к качеству поверхностного слоя на различных деталях, обработанных МДО.
7. Разработать технологические способы для формирования оксидного покрытия на поверхностях разнообразных крупногабаритных деталей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях:

1. Всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2009, 2010, 2011).
2. Региональных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2012, 2013).

Научная новизна работы:

1. Дано теоретическое обоснование способа обработки МДО тел вращения подвижным электродом, копирующим кривизну обрабатываемой поверхности, повышающего производительность процесса.
2. Разработана математическая модель и экспериментально подтверждена взаимосвязь формы и размеров подвижного электрода с формой и раз-

мерами обрабатываемой детали, позволяющая определить влияние энергетических и скоростных режимов обработки на толщину оксидного слоя.

3. Установлена взаимозависимость технологических факторов и характеристик качества оксидного слоя, показана принципиальная разница микрогеометрии поверхностного слоя, полученного различным способом.

4. Вычислена поправка к теоретическим данным расчета толщины слоя с учетом межэлектродного расстояния.

5. Впервые на основе полученных взаимозависимостей (пп. 1-4) уточнены физические основы и разработана конструктивно-технологическая классификация способов МДО элементов поверхностей крупногабаритных конструкций, что позволяет наглядно представлять и реализовывать наиболее эффективный процесс формирования оксидного покрытия.

Практическая значимость. Использование сформулированных физических основ позволяет реализовать способы МДО поверхности крупногабаритных конструкций в производственной практике, что подтверждает проведенное опытно-промышленное апробирование:

- разработано и успешно апробировано оборудование и оснастка для МДО различных поверхностей на широкой номенклатуре деталей. Технологические процессы позволяют получать оксидные слои на больших площадях деталей, используя оборудование малой мощности;

- внедрено в серийное производство МДО подвижными электродами, обработанные детали прошли контроль на отработку и находятся в длительных эксплуатационных испытаниях;

- предложенная конструкторско-технологическая классификация способов МДО возможна к применению в производственной практике и при обучении студентов.

Результаты диссертационной работы можно использовать на предприятиях, проектирующих и изготавливающих изделия из титановых сплавов для морской и авиационной техники, работающей в слабоагрессивных средах: «Электросила», ОАО СПБМ «Малахит», ЦНИИ КМ «Прометей» г. Санкт-Петербург, ОАО «КТЗ» г. Калуга, а также в учебных целях ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана». Имеется акт внедрения в производство ОАО «Калужский турбинный завод» технологии МДО крупногабаритных деталей от 25.01.12 г. Имеется акт внедрения КФ ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана» установки для микродугового оксидирования подвижным электродом деталей из титановых сплавов от 01.09.12 г.

Достоверность экспериментальных результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается применением современных апробированных средств контроля, выбором адекватных моделей и сравнением полученных результатов с данными исследований зарубежных и отечественных авторов, которые с ними согласуются, корректной статистической обработкой значений эксперимента.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель микродугового оксидирования подвижным электродом поверхностей различной геометрии крупногабаритных конструк-

ций из титановых сплавов и расчет толщины оксидного слоя в зависимости от технологических параметров процесса, обеспечивающие получение высококачественного поверхностного слоя.

2. На основании полученных закономерностей — конструктивно-технологическая классификация способов формирования оксидного слоя микродуговым оксидированием элементов поверхностей крупногабаритных конструкций.

3. Результаты экспериментальных исследований физических свойств оксидного слоя на деталях, обработанных микродуговым оксидированием подвижным электродом.

Личный вклад автора состоит в разработке модели транспортно-реакционного процесса МДО, схем оборудования и оснастки. Результаты исследования получены автором самостоятельно, а также в сотрудничестве с научным руководителем. Автор принимал непосредственное участие в их обобщении и формировании научных положений и выводов.

Публикации. По материалам диссертации имеется 10 работ, из которых 3 в рецензируемых журналах перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, общих выводов и приложения. Общий объем составляет 144 страницы, включая 64 рисунка и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 95 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении показана актуальность решаемой проблемы, обоснована необходимость теоретического рассмотрения и экспериментальных исследований в области оксидирования различных поверхностей крупногабаритных конструкций, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены результаты апробации и реализации.

Первая глава посвящена обзору и анализу литературы. Рассматриваются ранее выполненные работы по микродуговому оксидированию, в которых изложены теоретические и экспериментальные результаты, полученные применительно к изучению процессов МДО сплавов вентильной группы. В последние годы такие процессы, позволяющие наносить оксидные покрытия, стали называть электролитно-плазменной обработкой (ЭПО). Обобщаются разрозненные экспериментальные данные и обсуждаются теоретические исследования по изучению анодно-искрового процесса в электролитах.

В настоящее время прикладные и фундаментальные исследования искрового, микродугового, дугового, анодно-катодного электролизов ведутся многими научными группами, учеными в разных странах мира. Значительный вклад внесли работы П. С. Гордиенко, Г. А. Маркова, Л. А. Снежко, И. В. Суминова, А. В. Эппельфельда, В. И. Черненко С. В. Гнеденкова, А. Г. Ракоча, В. А. Баутина, И. В. Бардина, Б. В. Шандрова, Л. Л. Одынец, В. В. Баконец и других авторов. Накопленный экспериментальный материал, сделанные заключения, разработанные процессы и технологии частично систематизированы и обобщены в ряде статей и монографий.

В заключительной части главы описаны результаты ранее выполненных экспериментальных работ по анализу служебных свойств покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на титановых сплавах. Результатом МДО является формирование поверхностных слоев, обладающих высоким уровнем физико-химических и эксплуатационных характеристик. МДО-покрытия увеличивают коррозионномеханическую прочность материала, обладают пониженной газопроницаемостью по водороду. Показано влияние на антиобрастающие свойства МДО-слоев, на интенсивность процесса солеотложения, на триботехнические характеристики деталей из титановых сплавов.

Анализ научных работ показал, что получение оксидных слоев с заданными свойствами на титановых сплавах в электролитах микродуговым оксидированием является основной конечной целью исследований, и этим объясняется необходимость глубокого, всестороннего изучения всех вопросов, касающихся механизма, условий и технологических приемов формирования покрытий.

Во второй главе описана техника эксперимента, используемая при выполнении диссертационной работы: дана подробная характеристика применяемых сплавов, электролитов, подробно описаны разработанное оборудование, экспериментальные приборы.

В первом разделе этой главы показано, что комплекс особых свойств сплавов 5В и ПТ-3В делает их перспективными применительно для деталей морской техники, оборудования и систем. Выбранные сплавы широко применяются в технике, работающей в экстремальных условиях эксплуатации в агрессивных средах, обеспечивают стабильную структуру (чистую α -структуру) при сварке и длительной работе при повышенных (до 350°C) температурах.

На основе анализа литературных исследований выбран состав электролита $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (12 г/л) + NaAlO_2 (2 г/л), который позволяет получать покрытия микродуговым оксидированием на титановых сплавах, обладающие высокими электроизоляционными свойствами, термостабильностью, газопроницаемостью, повышенной коррозионно-механической прочностью и небольшой твердостью.

Во втором разделе главы описана разработанная экспериментальная установка для формирования многофункциональных оксидных покрытий на локальных участках крупногабаритных деталей из титана и его сплавов. В процессе микродугового анодирования специальное устройство — электрод-катод с пористым экраном, пропускающим электролит; перемещается по всей оксидируемой поверхности, огибая ее, обрабатываемая деталь является анодом. Экспериментальная установка разработана в КФ ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана. Работы на установке выполняются как в стационарном состоянии, так и в транспортируемом варианте. Схема установки для МДО деталей подвижным электродом приведена на рис. 1. На рис. 2 показано разработанное устройство для микродугового оксидирования поверхностей с изменяющейся кривизной. Это устройство применяется при обработке наружных поверхностей тел вращения типа: валы, валопроводы, цапфы. При обработке таким устройством

обеспечивается равный межэлектродный зазор по всей поверхности контакта, что способствует повышению производительности процесса обработки и получению равномерной толщины слоя.

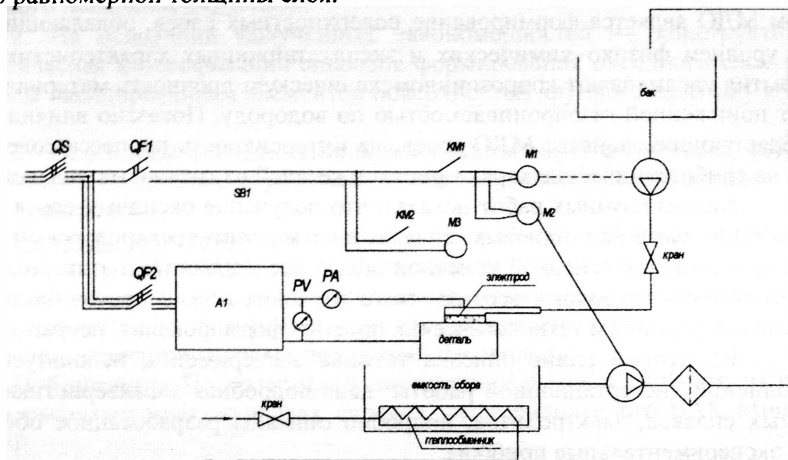


Рис. 1. Принципиальная схема микродугового оксидирования деталей подвижным электродом: QS – рубильник; QF1 – автоматический выключатель 15 А; QF2 – автоматический выключатель 50 А; А1 – преобразователь ТП4-200/460Н-2-2УХЛ4; КМ1 – пускатель магнитный; КМ2 – пускатель магнитный; М1 – насос; М2 – насос; МЗ – вентилятор; РА – амперметр; PV – вольтметр

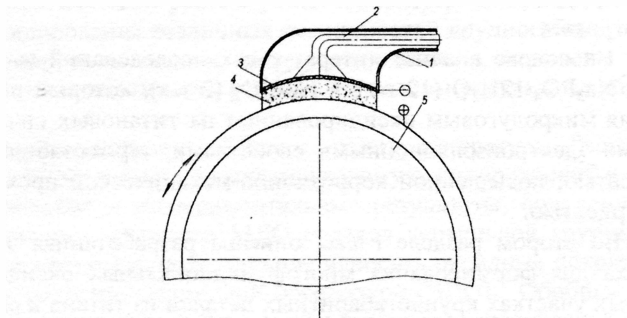


Рис. 2. Устройство для микродугового оксидирования деталей подвижным электродом: 1 – корпус; 2 – трубка подачи электролита; 3 – электрод-катод; 4 – волокнистый экран; 5 – деталь

В заключительной части второй главы описаны приборы и методы исследования основных характеристик покрытий, полученных микродуговым оксидированием, применяемые в данной работе.

Третья глава диссертации посвящена исследованию физических характеристик процесса локального микродугового оксидирования деталей из титановых сплавов.

В первой части этой главы процесс локального микродугового оксидирования рассмотрен как совокупность транспортно-реакционных взаимосвязанных процессов. Оценку эффективности микродугового оксидирования подвижным электродом E с параллельным потоком молекул воды на плоскость предлагается выполнять с использованием транспортно-реакционной модели, показанной на рис. 3.

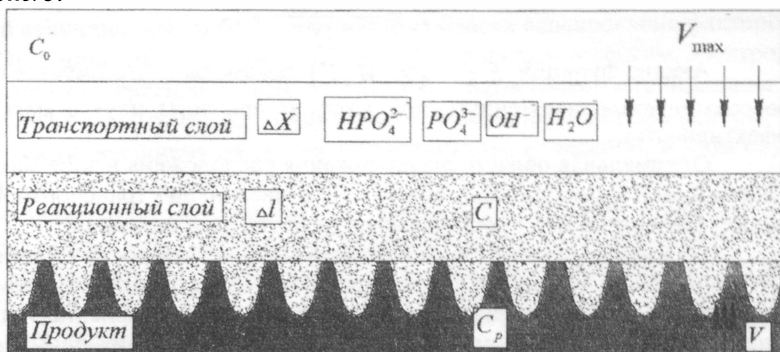


Рис. 3. Модель транспортно-реакционного процесса МДО: $V_{\max}$ — скорость потока молекул воды; C_p — равновесная концентрация исходного продукта, соответствующая условиям процесса; C_0 — начальная концентрация исходного продукта; C — концентрация в реакционном слое; V — скорость роста оксида; $C - C_p$ — концентрационный напор в реакционном слое; $C_0 - C$ — концентрационный напор в транспортном слое; $C_0 - C_p = \Delta C$ — полный концентрационный напор; ΔX — величина транспортной области; Δl — величина реакционной области

Эффективность транспортно-реакционных процессов E можно оценивать по следующей зависимости в безразмерном виде:

$$E = -\frac{AMT}{AM^2 + T},$$

где A — безразмерный комплекс, определяющий соотношение между зоной транспортировки и технологической зоной переработки исходных элементов. В транспортно-реакционных задачах такими размерами могут быть толщины транспортной и реакционной области:

$$A = \frac{\Delta l}{\Delta X}.$$

M — безразмерный комплекс, определяющий соотношение между технологическими параметрами транспортировки и переработки. Такими параметрами могут быть коэффициент диффузии D и константа скорости процесса K :

$$M = \Delta X \sqrt{\frac{K}{D}},$$

T — безразмерный комплекс, учитывающий дополнительное влияние целевой скорости движения $V_{\max}$ на транспортировку вещества в результате случайного процесса, например при транспортно-реакционных процессах:

$$T = \frac{\Delta X V_{\max}}{D} + 1,$$

Анализ функции $E = f(A, M, T)$ показывает, что имеется оптимальное соотношение переменных, при котором процессы идут с максимальной эффективностью.

Оптимальная область оксидирования расположена в зоне максимально приближенной к реакционной области, т. е. увеличение транспортной области снижает эффективность процесса микродугового оксидирования.

Во втором разделе главы рассмотрена кинетика роста толщины оксидного покрытия на титановых сплавах микродуговым оксидированием подвижным электродом. Полученное ранее Шаталовым В. К. уравнение толщины оксидного слоя от напряжения формирования, скорости движения электрода и его размеров не учитывает процессы, связанные с транспортировкой веществ в реакционную область. В результате проведения регрессионного анализа экспериментов была получена зависимость толщины оксидного слоя с учетом величины межэлектродного расстояния:

$$h = \left[h_c - (h_c - h_0) e^{\left(-\kappa \frac{a}{v} \right)} e^{(-rU)} \right] 4,979 e^{-0,107l},$$

где h_c , мкм — толщина пленки в стационарном режиме оксидирования; h_0 , мкм — исходная толщина оксидной пленки; k — постоянная, определяющая кинетику роста пленки; a , мм — размер подвижного электрода в направлении движения; v , мм/мин — скорость перемещения электрода; r — экспериментальная постоянная, зависящая от состава электролита; U , В — напряжение формирования оксидной пленки; l , мм — расстояние от анода до катода.

Экспериментально определенные значения для микродугового оксидирования в электролите $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (12 г/л) + NaAlO_2 (2 г/л):

$$h_c = 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}; k = (3,59 \pm 0,001) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \text{ с}; r = (1,165 \pm 0,003) 10^{-4} \text{ В}^{-1}$$

В третьей части главы смоделирован процесс микродугового оксидирования подвижным электродом сплавов. Изучалось качество поверхностного слоя: глубина оксидного слоя и электрическое сопротивление оксидного слоя. С помощью многофакторных экспериментов 2^3 были получены уравнения регрессии. Интерпретация результатов позволяет сделать вывод о том, что количество проходов и расстояние между электродом и обрабатываемой поверхностью оказывают наиболее сильное влияние на толщину слоя. С увеличением скоро-

сти движения электрода глубина оксидного слоя уменьшается, а с увеличением напряжения она увеличивается.

Доминирующее влияние на сопротивление слоя оказывает расстояние между электродами, оно почти в два раза сильнее влияния числа проходов и в 6 раз сильнее влияния напряжения формирования. Полученные уравнения регрессии в натуральных значениях факторов позволяют предсказать значения выходной величины для любой точки внутри области варьирования факторов.

При микродуговом оксидировании подвижным плоским электродом деталей типа тел вращения была установлена неравномерность толщины оксидного слоя в разных местах обработанной поверхности детали, которая выявляется как по внешнему виду, так и результатами измерений, в этом случае электрод-катод расположен касательно к обрабатываемой поверхности, следовательно, происходят неравномерные изменения состояния поверхностного слоя на различных участках изделия: неравномерность токораспределения приводит к разнотолщинности покрытия. Толщина покрытия в контролируемом месте h_i на деталях типа тел вращения при МДО плоским электродом определяется с учетом схемы на рис. 4 по формуле:

$$h_i = \left[9 \cdot 10^{-6} - (9 \cdot 10^{-6} - h_0) e^{\left(-3,5 \cdot 10^{-3} \frac{a}{v} \right)} e^{\left(-1,165 \cdot 10^{-4} U \right)} \right] 4,979 e^{-0,107 \left(l_0 + R - \sqrt{R^2 - \frac{X_i^2}{4}} \right)},$$

где R мм — радиус обрабатываемой формообразующей поверхности детали; X_i , мм — расстояние от «центра» электрода: изменяется от 0 до $c/2$; c , мм — ширина катода.

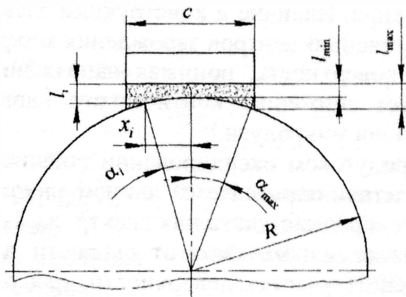


Рис. 4. Расчетная схема МДО тела вращения подвижным плоским электродом: $\alpha_i, ^\circ$ — центральный угол: от $\alpha_{\min} = 0^\circ$ до $\alpha_{\max}$; $l_{\min} = l_0$, мм — толщина экрана; $l_{\max}$, мм — максимальное межэлектродное расстояние l_i мм — межэлектродное расстояние на локальном участке поверхности детали

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для равномерного распределения оксидного слоя на поверхности детали требуется частое смещение электрода по окружности детали и перемещение в осевом направлении.

Другой путь получения равномерного слоя — это обеспечение одинакового сопротивления в межэлектродном зазоре за счет профилирования элек-

трода-катода соответственно геометрии детали по схеме на рис. 2. Таким образом, обеспечивается равное расстояние между катодом и обрабатываемой поверхностью, следовательно, можно значительно повысить производительность процесса. Соответственно в выполняемой работе и производственной практике применяются профилированные электроды.

Результаты исследования влияния режимов технологического воздействия на параметры МДО-процесса и оксидного слоя показали, что решающее влияние оказывают состав электролита, электрические и временные параметры режима оксидирования и состав обрабатываемого сплава. Управление перечисленными факторами дает возможность получать модифицированные поверхности с определенными необходимыми свойствами (в соответствии с техническими требованиями) – износостойкие, коррозионно-защитные, теплостойкие, электроизоляционные и др.

Обработке подвергались цилиндрические заготовки диаметром 180 – 200 мм из сплава 5В и ПТ-3В. Заготовки предварительно полировали до шероховатости $Ra = 0,63$ затем обезжиривали. Оксидирование проводили в потенциостатическом режиме при анодной поляризации заготовок. Скорость движения электрода огибающей формы $v = 0,005$ м/с, размер электрода в направлении движения 100 мм, размер электрода по дуге 150 мм. Выполняли однократное прохождение электродом обрабатываемой поверхности.

На рис. 5 показано влияние потенциала формирования на толщину оксидного слоя. До напряжений близких к 270 В наблюдается пропорциональная зависимость роста толщины слоя от напряжения формирования. В области потенциалов микродуги наблюдается степенная зависимость толщины слоя от внешнего напряжения. Наличие в конструкции электрода волокнистого экрана способствует увеличению центров зарождения микродуг путем воздействия на обрабатываемую поверхность, понижая напряжение искрения. Волокнистый экран способствует снижению критического напряжения, увеличению длительности во времени микродуги.

При микродуговом оксидировании подвижным электродом время обработки участка детали определяется длиной электрода (размером в направлении движения) и скоростью движения электрода. На рис. 6 представлена зависимость толщины оксидного слоя от скорости движения электрода-катода. Время оксидирования участка поверхности, для определения скорости перемещения электрода, фиксировали по секундомеру. Можно отметить, что с увеличением скорости движения электрода уменьшается время пребывания участка поверхности под электродом, соответственно снижается рост толщины оксидного слоя и тем самым снижается эффективность процесса. На рис. 7 показано влияние длины электрода на толщину оксидного слоя при различных скоростях движения электрода-катода. Увеличение времени экспозиции способствует росту толщины оксидного слоя.

На рис. 8 приведена зависимость толщины оксидного слоя от числа проходов электродом обрабатываемой поверхности.

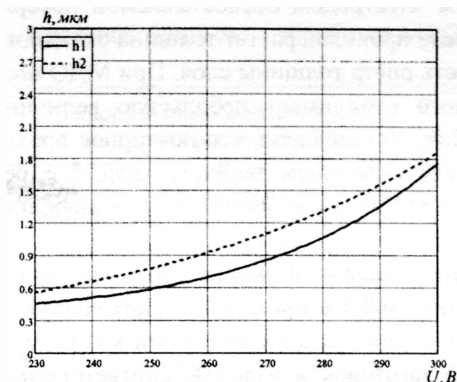


Рис. 5. Влияние потенциала формирования на толщину оксидного слоя:
 h_1 — для сплава 5В,
 h_2 — для сплава ПТ-3В

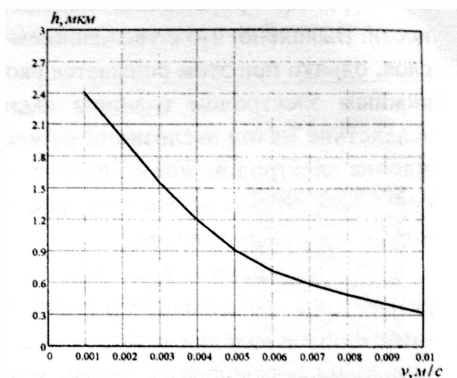


Рис. 6. Влияние скорости перемещения электрода на толщину оксидного слоя

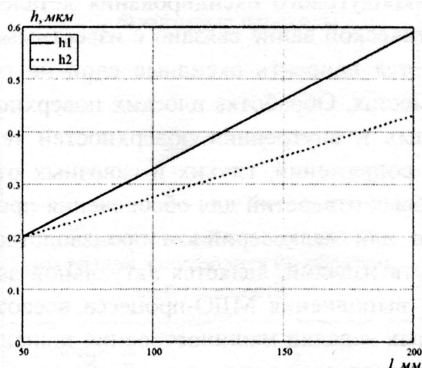


Рис. 7. Влияние длины электрода на толщину оксидного слоя:
 h_1 — при скорости движения электрода $v = 0,005$ м/с, h_2 — при скорости движения электрода $v = 0,009$ м/с,

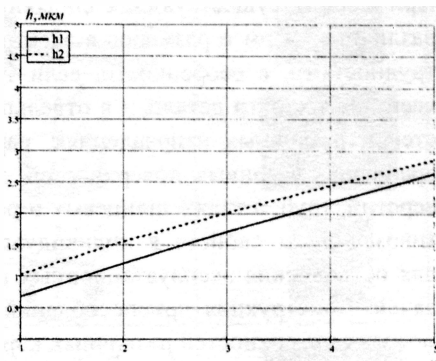
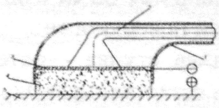
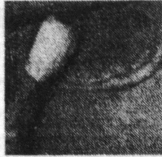
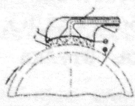
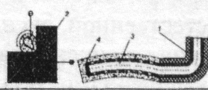
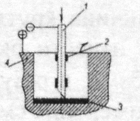
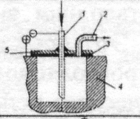
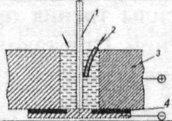
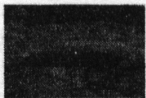
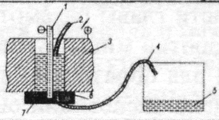
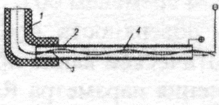
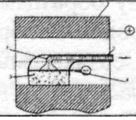


Рис. 8. Зависимость толщины оксидного слоя от числа проходов электродом по обрабатываемой поверхности при $v = 0,005$ м/с,
 $U = 260$ В, h_1 — для сплава 5В, h_2 — для сплава ПТ-3В

Для получения больших толщин защитного покрытия необходимо многократное прохождение подвижным электродом обрабатываемой поверхности. Выявлено, что с увеличением числа проходов растет толщина оксидного слоя, однако при этом снижается скорость роста толщины слоя. При МДО подвижным электродом толщина оксидного слоя имеет небольшую величину вследствие малой экспозиции по времени. Установлено, что повторное прохождение электродом можно выполнять как движением двойного хода, т. е. без перерыва, так и с перерывом, например для охлаждения детали или выполнения контрольных замеров.

Четвертая глава посвящена промышленной апробации и внедрению результатов исследований по применению МДО в промышленность. Разработаны приспособления и устройства для обработки деталей разной конфигурации МДО. Разнообразие конфигураций заготовок и изделий, соответственно технологических приемов их изготовления, применяемой оснастки их обработки МДО определяет рациональный выбор способа обработки с учетом производительности, возможностей производства, экономической эффективности. Применение существующих способов микродугового оксидирования деталей различных форм и размеров в электролитической ванне связано с известными трудностями, в особенности, если требуется наносить оксидные слои не по всей поверхности детали, а в отдельных местах. Обработка плоских поверхностей в различных направлениях, наружных и внутренних поверхностей тел вращения, фасонных поверхностей, мест сопряжений, глухих и сквозных отверстий, труб, а также шлицевых и резьбовых отверстий для обеспечения противозадирных свойств в индивидуальном или мелкосерийном производстве, для обеспечения эксплуатационных свойств изделий, является актуальной задачей. Конструкция приспособлений для выполнения МДО-процесса всевозможных поверхностей различных корпусных изделий машиностроения зависит от многих факторов и может значительно различаться даже при обработке одних и тех же форм поверхностей. Используемая оснастка закрепляется непосредственно на крупногабаритной конструкции (детали, изделия) или крепится в специальном приспособлении. Способ установки оснастки определяется технологическими особенностями обработки, формой конструкции, расположением обрабатываемых поверхностей. В условиях индивидуального и мелкосерийного производства закрепление оснастки производится непосредственно на обрабатываемой конструкции с помощью различного рода крепежных комплектов. В таблице 1 приведена классификация схем обработки МДО различных поверхностей деталей.

Классификация схем обработки МДО различных поверхностей деталей

Типоразмеры поверхностей деталей для обработки МДО	Схема установки для обработки	Изображение
Наружные и внутренние плоские поверхности, поверхности тел вращения диаметром более 500 мм, обработка отверстий малого диаметра, до 20 мм и глубиной до одного диаметра		
Наружные поверхности тел вращения диаметром до 500 мм		
Фланцевые переходы		
Глухие отверстия		
Глухие отверстия, где недопустим разлив электролита по образующей плоскости		
Сквозные отверстия		
Сквозные отверстия диаметром до 200 мм с неполной оксидируемой поверхностью		
Трубы, имеющие превалирующий линейный размер		
Внутренние цилиндрические поверхности диаметром от 200 мм до 2000 мм		

Во второй части главы рассмотрены физические свойства оксидированных поверхностей деталей из титановых сплавов. Для анализа влияния оксидного слоя на антифрикционные характеристики материалов изучалась работоспособность резьбовых соединений на макетных образцах крупногабаритных фланцевых соединений после обработки подвижным электродом. Определение характеристик свинчивания выполняли на крепеже "болт-гайка" М22×2, изготовленных из сплава титана 5В. Оксидирование образцов проводилось по установленным режимам: $j = 6 \text{ А/дм}^2$, $U = 260 \text{ В}$, $t = 10 \text{ мин}$ в растворе три-натрийфосфата. Для сравнения были взяты четыре вида образцов после точения, имеющие на рабочей поверхности:

- болт, гайка, втулка — естественную оксидную пленку;
- болт — естественную оксидную пленку, гайка и втулка — оксидную пленку после обработки МДО;
- гайка — естественную оксидную пленку, болт и втулка — оксидную пленку после обработки МДО;
- болт, гайка, втулка — оксидную пленку после обработки МДО.

Из анализа экспериментальных данных сделан вывод о том, что в резьбовых соединениях с естественной оксидной пленкой в период приработки требуется для отворачивания прикладывать больший крутящий момент. В то время как при работе с креплениями, подвергнутыми МДО при первом ослаблении усилия затяжки величина крутящего момента ниже, чем при затяжке. Отмечаем, что достаточно нанести оксидное покрытие на одну деталь пары вышеприведенными способами, в результате обеспечится 12÷25 кратная разъемность соединения без применения смазки.

Исследования подтвердили высокие эксплуатационные качества оксидных покрытий в работе. Это, прежде всего отсутствие схватывания, переноса металла, задиров, электроизоляционные свойства. Вместе с тем выявлены факты, важные для практического использования. Среди них отметим способность к стабилизации силы трения при реверсивном трении после трех-пяти циклов затяжек-ослаблений. При такой «тренировке» происходит пластическое деформирование микронеровностей со сглаживанием их пиков, а также внедрение смазки во впадины микропрофиля.

В последней части главы рассмотрена шероховатость оксидированной поверхности после обработки микродуговым оксидированием. Микроскопический анализ проводили для образцов из титановых сплавов 5В, подвергнутых МДО в ванне при времени экспозиции 60 с и МДО подвижным электродом с эквивалентном расчетным временем 60 с.

Шероховатость поверхности после МДО-процесса подвижным электродом или в электролитической ванне при времени обработки эквивалентном 60 с имеет схожие значения параметра Ra. Основное различие в топографических изображениях между образцами, на которых оксидный слой был создан МДО подвижным электродом и образцами, которые оксидировались в ванне, состоит в том, что слой, создаваемый движущимся электродом, выглядит как множество вытянутых кластеров, а не как совокупность близкорасположенных

кратеров. Это связано с изменением стабильности разряда. Условия протекания разряда постоянно изменяются, разряд быстрее меняет свое положение, чем при стационарной обработке.

В приложении приведен регрессионный анализ, обработка многофакторного эксперимента, а также акты об использовании результатов диссертационной работы на ОАО «Калужский турбинный завод» и КФ ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н. Э. Баумана».

Основные выводы и рекомендации

1. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель комплексного физического процесса микродугового оксидирования титановых сплавов.

2. Установлена взаимосвязь формы и размеров электрода-катода с формой и размерами обрабатываемой поверхности детали. Обоснован способ МДО тел вращения подвижным электродом-катодом, воздействующем на транспортно-реакционные процессы в зоне формирования оксидного слоя.

3. Предложены принципиальные схемы МДО-процесса исследуемым способом с применением электрода-катода, перемещаемого по криволинейной поверхности. Разработана, изготовлена и внедрена в производство мобильная установка для формирования оксидных покрытий на поверхностях крупногабаритных конструкций.

4. Уточнены физические основы и параметры технологического процесса нового способа МДО поверхностей тел вращения. Разработана конструкция перемещаемого электрода, приведены примеры оснастки для оксидирования широко используемых типоразмеров деталей. Применение электрода, копирующего кривизну обрабатываемой поверхности, повышает производительность процесса обработки в два раза по сравнению с обработкой плоским электродом-катодом.

5. Установлены закономерности МДО-процесса перемещаемым электродом: влияние ВАХ, межэлектродного зазора, продолжительности обработки на формирование параметров качества оксидного покрытия. Получены регрессионные математические модели для скорости роста слоя. Получено оптимальное соотношение формирующего оксидное покрытие напряжения, скорости перемещения электрода и межэлектродного зазора.

6. Впервые разработана конструктивно-технологическая классификация способов МДО с учетом мест обрабатываемых поверхностей деталей, объединенных в группы по геометрии и размерам поверхностей. Классификация позволяет составить представление об основных способах формирования оксидных покрытий на поверхностях различных конструкций.

7. Даны технологические рекомендации для применения МДО-процесса при изготовлении деталей из титановых сплавов для энергетического оборудования, работающего в условиях морской среды. Подтверждена эффективность новых технологий в производстве, проведена экономическая оценка результатов исследований. Объем выполненных работ за

два года по нанесению оксидных покрытий микродуговым оксидированием составил 6 392 630 руб.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Шаталов В. К., Лысенко Л. В., Сулина О. В. Технология микродугового оксидирования различных поверхностей крупногабаритных конструкций // Вакуумная плазменная и твердотельная электроника. 2012. Т. 13, № 2. С.35-41.
2. Способы микродугового оксидирования поверхностей деталей из титановых сплавов / О. В. Сулина [и др.] // Наука и образование: научно-технический электронный журнал. 2013. № 7.
3. Наплавочная проволока для титановых сплавов / О. В. Сулина [и др.] // Научные технологии. 2010. Т. 11, № 7. С. 13-16.
4. Шаталов В. К., Сулина О. В. Повышение эффективности наплавки на титановые сплавы // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2011. Т. 1. С. 17-20.
5. Шаталов В. К., Лысенко Л. В., Сулина О. В. Новые технологии микродугового оксидирования поверхностей крупногабаритных конструкций // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2010. Т. 1. С. 17-19.
6. Шаталов В. К., Сулина О. В. Оснастка для МДО поверхностей крупногабаритных конструкций // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Региональной научно-технической конференции. М., 2012. Т. 1. С. 15-18.
7. Шаталов В. К., Сулина О. В. Оснастка и приемы МДО поверхностей фланцев // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2011. Т. 1. С. 21-22.
8. Сулина О. В., Шаталов В. К. Перспективные пути получения изделий из титановых сплавов с применением технологии микродугового оксидирования конструкций // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Региональной научно-технической конференции. М., 2013. Т. 1. С. 18-21.
9. Шаталов В. К., Сулина О. В., Карабахина Т.Ю. Исследование микрорельефа поверхности, обработанной микродуговым оксидированием // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. Т. 1. С. 8-10.
10. Шаталов В. К., Сулина О. В. Микрогеометрия поверхности при микродуговом оксидировании // Научные технологии в приборостроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2010. Т. 1. С. 13-16.