

УДК 621.794.61

Микродуговое оксидирование поверхностей изделий вне ванны

Шаталов В. К.^{1,*}, Штокал А. О.¹,

[*vkshatalov@yandex.ru](mailto:vkshatalov@yandex.ru)

Блатов А. А.¹

¹Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

Разработка новых прогрессивных технологий обеспечения противозадирных свойств и коррозионной стойкости конструкционных материалов является актуальной научной и технической задачей, эффективное решение которой реализуется с помощью развития различных плазменных способов. Один из них – микродуговое оксидирование (МДО), получил распространение для обработки титановых сплавов. Показана возможность применения микродугового оксидирования для формирования оксидных покрытий вне ванны с электролитом, на различных поверхностях изделий из титановых сплавов. Приведена классификация способов обработки микродуговым оксидированием поверхностей изделий с использованием специальной оснастки. Это способствует формированию более равномерного оксидного слоя по обработанной поверхности, повышению производительности обработки. Полученные результаты позволят повысить качество изделий, работающих в слабых агрессивных средах.

Ключевые слова: титан, микродуговое оксидирование, покрытие, электрод, электролит

Введение

Применение титановых сплавов в различных конструкциях, работающих в условиях морской среды, предъявляет особые требования к качеству материала сопрягаемых деталей. Высокий электродный потенциал с естественной оксидной пленкой на поверхности титана обуславливает коррозионное разрушение деталей из других металлов. Распространенным способом защиты от гальванокоррозии деталей из других сплавов, обеспечения противозадирных свойств является нанесение устойчивых оксидных покрытий на изделия из сплавов титана [1–7].

Определенную трудность при получении защитных покрытий электрохимическим способом доставляют крупногабаритные детали, узлы, изделия объемом до 6 м³, когда применение традиционных способов анодирования, в электролитной ванне, затруднено и приходится изыскивать различные технические приёмы.

Трудоемкость процесса МДО и способ формирования оксидного слоя зависит от конструктивного оформления обрабатываемого изделия (соотношения размеров

характеризующих поперечное сечение и высоту детали; конфигурации), габаритных размеров, наличия сварных соединений различных сплавов, формирования покрытия на всей поверхности детали, или в отдельных местах, а также при выполнении ремонтных работ, восстановлении утраченного покрытия, или повторного нанесения покрытия. Разнообразие конфигураций изделий, соответственно, технологических приёмов их изготовления, применяемой оснастки для обработки МДО, определяет рациональный выбор способа обработки. 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, в целях выполнения технических требований и эксплуатационных свойств изделий, является актуальной задачей.

Особенностью местного МДО является то, что при оксидировании отдельных участков поверхности не отмечается ослаблений в местах сопряжений оксидируемой и не оксидируемой поверхности. Это выгодно отличает, например, от термического оксидирования, при котором зона перехода упрочненного слоя в неупрочненный обладает различными механическими свойствами.

Одно из решений задачи обеспечения технических требований к изделиям, работающим в условиях морской среды, изготовленным из титановых сплавов, улучшения их качества связано как с совершенствованием технологии микродугового оксидирования, так и с совершенствованием применяемого оборудования, а также конструктивных решений элементов технологической оснастки. 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. Поэтому выбору схемы обработки и конструкции приспособлений необходимо уделять большое внимание [8–13].

Для решения перечисленных выше задач в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана впервые предложены способы формирования МДО-покрытий на отдельных поверхностях крупногабаритных деталей с использованием перемещаемых и стационарных электродов.

Для дальнейшего развития предложенных способов обработки и для скорейшего их внедрения в реальное производство необходимо решить следующие важные задачи:

1) Сформировать методику расчёта расхода электролита, исходя из режимов формирования МДО-покрытия, конструктивных особенностей перемещаемого электрода и физико-химических процессов, происходящих при микродуговом оксидировании.

2) Составить конструктивно обоснованную наглядную классификацию способов микродугового оксидирования отдельных поверхностей крупногабаритных деталей на основании геометрии покрываемой поверхности, конструкции используемого электрода и способа формирования электролитической ванны.

1. Расчёт расхода электролита

Особенностью рассматриваемых способов обработки МДО поверхностей деталей различных форм и размеров, является ведение процесса вне ванны, в протекающем электролите. Получение качественного оксидного слоя с хорошим сцеплением с металлом-основой, возможно при поддержании температуры электролита до 30°C. Проведенные эксперименты показали, что при оксидировании перемещаемым электродом температура поверхностного слоя детали на глубине 0,1 мм достигает 90°C. Следовательно, для поддержания оптимальной температуры в зоне формирования оксидного слоя, требуется обеспечение необходимого расхода электролита, достаточного для рассеивания тепла, выделяющегося на поверхности детали в процессе МДО [14].

Для расчета расхода электролита выбрали режим формирования МДО-покрытия: напряжение – $U = 280$ В, сила тока в начале процесса – $I = 12$ А, в конце процесса – 7 А. Время формирования покрытия – 5 мин. Площадь перемещаемого электрода – 1 дм².

Общее количество теплоты, выделяющееся в процессе микродугового оксидирования, которое необходимо отвести из зоны обработки электролитом, складывается из количества теплоты, выделяющегося при прохождении электрического тока, и количества теплоты, выделяющегося в процессе окисления титана:

$$Q_1 + Q_2 = Q_{эл}$$

Исходя из закона Джоуля-Ленца, количество теплоты, выделяющееся при прохождении электрического тока, выражает формула:

$$Q_1 = UIt ,$$

где U - напряжение, подводимое к детали и электроду, $U = 280$ В ;

I - сила тока, возьмём максимальную силу тока $I=12$ А;

t - время, в течение которого формируется МДО-покрытие, с .

Количество теплоты, выделяющееся в процессе окисления титана, выражает формула:

$$Q_2 = qkv ,$$

где $q = 218 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$ - теплотворная способность титана;

$k = 4186,8 \frac{\text{Дж}}{\text{ккал}}$ - переводной коэффициент;

V - количество вещества титана, *МОЛЬ*.

Известно, что

$$v = \frac{m_1}{M},$$

где m_1 - масса окисленного титана, *КГ*;

$$m_1 = \rho_1 A v_S t,$$

где $\rho_1 = 4540 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность титана;

A - площадь электрода, м^2 , для перемещаемого волокнистого электрода и перемещаемого электрода с эластичным экраном $A = 1 \text{ дм}^2 = 10^{-2} \text{ м}^2$;

v_S - скорость роста толщины МДО-покрытия, для данных условий формирования

$$v_S = \frac{10}{5} = 2 \frac{\text{мкм}}{\text{мин}} = 3,33 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

t - время, в течение которого формируется МДО-покрытие, *С*;

$$M - \text{молярная масса титана, } M = 47,867 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 4,7867 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Количество теплоты, поглощённое электролитом, определяется по формуле

$$Q_{\text{эл}} = C m \Delta T,$$

где C - массовая теплоёмкость электролита; т.к. основная составляющая электролита - вода, принимаем для расчётов $C = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

m - масса нагреваемого электролита,

$$m = \rho V,$$

где ρ - плотность электролита, $\rho \approx 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V - объём электролита, который можно представить как объём цилиндра, площадь основания которого равна площади сечения входного отверстия электрода диаметром d , а высота которого равна произведению скорости течения электролита v на время t , в течение которого формируется МДО-покрытие, таким образом

$$V = \pi \frac{d^2}{4} v t,$$

где d - диаметр входного отверстия электрода, $d = 0,013 \text{ м}$;

v - скорость течения электролита, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;

t - время, в течение которого формируется МДО-покрытие, с ;

ΔT - допустимое изменение температуры электролита, примем $\Delta T = 10 \text{ К}$ с 20°C до 30°C .

Если пренебречь количеством теплоты, расходуемым на нагрев электрода и детали, тогда

$$UIt + qk \frac{\rho_1 A v_s t}{M} = C \rho \pi \frac{d^2}{4} v t \Delta T$$

Выразим из данной формулы искомую скорость течения электролита

$$v = \frac{4 \left(UI + qk \frac{\rho_1 A v_s}{M} \right)}{C \rho \pi d^2 \Delta T}$$

Таким образом, скорость течения электролита для перемещаемого волокнистого электрода и перемещаемого электрода с эластичным экраном

$$v = \frac{4 \left(280 \cdot 12 + 218 \cdot 4186,8 \cdot \frac{4540 \cdot 10^{-2} \cdot 3,33 \cdot 10^{-8}}{4,7867 \cdot 10^{-2}} \right)}{4200 \cdot 1000 \cdot \pi \cdot 0,013^2 \cdot 10} = 0,608 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Расход электролита определим по формуле

$$P = 60000 \pi \frac{d^2}{4} v,$$

для перемещаемого волокнистого электрода и перемещаемого электрода с эластичным экраном

$$P = 60000 \cdot \pi \cdot \frac{0,013^2}{4} \cdot 0,608 = 4,842 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Полученные результаты подтверждены практикой проведения работ и, в зависимости от обрабатываемой детали, расход электролита составляет $4 - 6 \frac{\text{л}}{\text{мин}}$.

2. Конструкторско-технологическая классификация способов обработки деталей микродуговым оксидированием различных поверхностей деталей

Таблица 1. Классификация способов обработки МДО различных поверхностей деталей

№ п.п.	Типоразмеры поверхностей деталей для обработки	Схема установки электродов	Изображение
1	Наружные и внутренние плоские поверхности, поверхности тел вращения диаметром более 500 мм, обработка отверстий малого диаметра, до 20 мм и глубиной до одного диаметра		
2	Наружные поверхности тел вращения диаметром до 500 мм		
3	Поверхности в отверстиях диаметром от 200 мм до 2000 мм		
4	Фланцевые переходы		
5	Глухие отверстия		
6	Глухие отверстия, при недопустимом разливе электролита по изделию		
7	Сквозные отверстия		
8	Сквозные отверстия диаметром до 200 мм с неполной оксидируемой поверхностью		
9	Внутренние поверхности трубок		

2.1. Обработка поверхностей перемещаемым плоским электродом

Предлагаемую схему 1, приведённую в таблице 1, с использованием перемещаемого устройства с плоским электродом применяют при обработке наружных и внутренних плоских поверхностей, а также поверхностей тел вращения диаметром более 500 мм [15]. В устройстве электролит прокачивается через электрод-катод и эластичный экран, контактирующий с деталью-анодом. Толщина эластичного экрана не менее 15 мм.

Расход электролита регулируется и составляет в рассматриваемых способах 3 – 6 л/мин, в зависимости от площади обрабатываемой поверхности. Стекающий электролит по поверхностям конструкции попадает в противень. Электрод перемещается со скоростью 5 – 20 мм/с. Обработка чистых поверхностей деталей с естественной оксидной пленкой вызывает большие токи, до 30 А/дм², что может привести к оплавлению контактирующей поверхности материала эластичного экрана. Вначале проводится анодирование поверхности. Напряжение увеличивается на каждый новый проход на 50 В и доводится до 240 – 260 В, вызывающего появление микродугового процесса. Плотность тока устанавливается 5 – 7 А/дм². Снижается скорость перемещения электрода по поверхности до 5 – 8 мм/с.

Таким образом, следует различать два основных режима МДО: 1) начальный анодный режим; 2) рабочий микродуговой режим.

Для получения толщины оксидного слоя 4 мкм требуется 5 – 6 кратное повторное прохождение по обрабатываемой поверхности. Изменением роста толщины слоя можно управлять, варьируя скорость перемещения электрода.

В процессе МДО идёт обильное тепловыделение в зоне обработки. При многократном прохождении электрода температура на поверхности детали в зоне обработки может достигать 90°C, несмотря на отвод тепла в деталь, а также стекающим электролитом. Появляется паро- и газовыделение в зоне обработки. Для снижения температуры электролита дают возможность детали остыть, останавливая процесс, или охлаждают деталь водой. При проведении МДО для устранения дискомфорта исполнителям необходимо вентилирование места работы.

2.2. Обработка внешних поверхностей тел вращения

Рассматриваемая схема 2 применяется при обработке наружных поверхностей тел вращения, типа: валы, валопроводы, цапфы. Обработка выполняется аналогично вышеописанной схеме 1. Отличие состоит лишь в том, что в данном случае, исходя из рассеивающей способности электролита, применяется электрод, копирующий кривизну поверхности. При обработке по такой схеме обеспечивается равный межэлектродный зазор по всей поверхности контакта.

2.3. Обработка отверстий большого диаметра

Схему 3 применяют при нанесении оксидных покрытий на внутренние поверхности отверстий с использованием перемещаемого электрода-катода. По данной схеме

выполняют оксидирование поверхностей тел вращения диаметром от 300 до 2000 мм. Поскольку такие поверхности имеют малую кривизну, то обработка возможна плоским перемещаемым электродом. Процесс получения оксидного слоя на таких поверхностях деталей аналогичен процессу обработки плоских поверхностей.

2.4. Обработка фланцевых переходов

Приведенная схема 4 применяется при обработке фланцевого перехода. Особенностью обработки детали имеющей фланец, соответственно цилиндрическую и торцовую поверхности, является получение покрытия по схемам 1 и 2. Поскольку пластмассовый корпус электродного устройства, упираясь в сопрягаемую поверхность, как со стороны цилиндра, так и со стороны торца, не обеспечивает на переходной поверхности формирование качественного оксидного покрытия, то в данном случае применяют трубчатый изогнутый электрод из нержавеющей стали. Перемещая электрод по окружности, ведут обработку переходной поверхности от цилиндра к торцу.

2.5. Обработка отверстий

Для получения равномерного оксидного покрытия по длине отверстия требуется вводить электрод-катод в отверстие. В корпусных крупногабаритных конструкциях обработка отверстий малого диаметра, до 20 мм и глубиной до одного диаметра, возможна по схеме 1. По приведённой в таблице 1 схеме 5 применяют нанесение оксидных покрытий на стенки поверхностей глухих отверстий. На дно отверстия детали устанавливается изолирующая пластина из текстолита или винипласта. Катод – труба из нержавеющей стали со срезанной на угол передней частью вводится в отверстие. На трубе возможна установка изолирующих колец, предотвращающих короткое замыкание при случайном смещении катода и контакте с деталью.

Электролит поступает в отверстие от насоса. Расход электролита 5 л/мин обеспечивает температуру в отверстии до 30 °С. Напряжение на электродах доводится до напряжения формирования оксидного слоя и выдерживается необходимое время.

Таким способом обрабатывают резьбовые и шлицевые отверстия.

2.6. Обработка отверстий на изделиях

Схема 6 применяется при нанесении оксидных покрытий на поверхности глухих отверстий в тех случаях, когда не допускается разлив электролита по поверхности обрабатываемой крупногабаритной конструкции или изделия в сборе. Катод – трубка из нержавеющей стали вваривается в заглушку. К заглушке также приварена отводящая электролит труба. Заглушка с электродом через герметизирующую прокладку прижимается к детали. Электролит поступает в отверстие от насоса и по отводящей трубе и шлангу отводится в охлаждающий бак.

2.7. Обработка сквозных отверстий

Схема 7 применяется при нанесении оксидных покрытий на стенки поверхностей сквозных отверстий. Электрод – катод стержень или трубка, в зависимости от диаметра отверстия, приваренный к заглушке, устанавливается в отверстие и прижимается через прокладку к обрабатываемому корпусу – аноду. Электролит из расходного бака насосом (или самотёком) по шлангу поступает в отверстие и стекает свободно в противень.

2.8. Микродуговое оксидирование поверхностей в отверстиях

Схема 8 применяется при нанесении оксидных покрытий на стенки поверхностей сквозных глубоких отверстий деталей типа валопроводов, муфт и др. В таких отверстиях, диаметром до 200 мм, поверхность оксидируется не полностью, а только шлицевая или резьбовая часть.

Катод – трубка из нержавеющей стали приваривается в заглушке. К заглушке также приварена отводящая электролит трубка со шлангом. Заглушка с электродом через герметизирующую прокладку прижимается к детали. Электролит поступает в отверстие от насоса и по шлангу отводится в охлаждающий бак. Уровень электролита в обрабатываемом отверстии выдерживается подъемом или опусканием отводящего шланга. Постепенно повышая напряжение анодирования, доводят до напряжения формирования МДО-процесса и выдерживают время, необходимое для получения требуемой толщины слоя.

2.9. Обработка внутри трубы

Схема 9 применяется при нанесении оксидных покрытий на внутренние поверхности отверстий титановых труб. Катод изготавливают из прутка, или проволоки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для предотвращения контакта проволоки с анодом – трубой, в качестве изолятора, на проволоку наматывается спираль из прутка винипласта. Спираль из винипласта обеспечивает свободное протекание электролита по трубе. Трубу с катодом вставляют в корпус, через который подают насосом электролит. Напряжение подают на анод и катод – проволоку со стороны выходного отверстия трубы. Расход электролита 5 – 6 л/мин.

Выводы

1. Получение оксидных покрытий на поверхностях крупногабаритных изделий или изделий в сборе при единичном или мелкосерийном типе производства другими способами не представляется возможным.

2. Сформирована методика расчёта расхода электролита при обработке крупногабаритных деталей с использованием перемещаемого электрода, учитывающая режимы формирования МДО-покрытия и конструкцию перемещаемого электрода. При обработке поверхности площадью 1 дм² в зависимости от режимов формирования МДО-

покрытия и конструкции перемещаемого электрода расход электролита составит 4 – 6 л/мин.

3. Сформирована наглядная конструкторско-технологическая классификация способов микродугового оксидирования отдельных поверхностей крупногабаритных деталей на основании геометрии покрываемой поверхности, конструкции используемого электрода и способа формирования электролитической ванны.

4. Классифицированные способы могут быть успешно использованы в технологиях создания крупногабаритных изделий из титановых сплавов, а предложенная таблица полезна как специалистам, так и студентам при изучении электрохимических способов обработки.

Список литературы

1. Гордиенко П.С., Гнеденков С.В. Микродуговое оксидирование титана и его сплавов. Владивосток: Дальнаука, 1997. С. 179.
2. Harbcz H., Lewandowska M. Microstructural changes during oxidation of titanium alloys // *Materials Chemistry and Physics*. 2003. Vol. 61, no. 2-3. P. 542–547. DOI: [10.1016/S0254-0584\(03\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00070-1)
3. Tinoco J.C., Estrada M., Romero G. Room temperature plasma oxidation mechanism to obtain ultrathin silicon oxide and titanium // *Microelectronics Reliability*. 2003. Vol. 43, no. 6. P. 895–903. DOI: [10.1016/S0026-2714\(03\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00098-2)
4. Krupa D., Baszkiewicz J., Sobesak J.W., Bilinski A., Barcz A. Modifying the properties of titanium surface with the aim of improving its bioactivity and resistance // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143-144. P. 158–163. DOI: [10.1016/S0924-0136\(03\)00398-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00398-4)
5. Жуков С.В., Кантаева О.А., Желтухин Р.В., Эпельфельд А.В., Бер Л.Б. Исследование физико-механических свойств, структуры и фазового состава покрытий, полученных методом микродугового оксидирования // *Приборы*. 2008. № 4. С. 28–32.
6. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Крит Б.Л., Борисов А.М., Дунькин О.Н. Модификация поверхностей авиационных изделий в плазме // *Авиационная промышленность*. 2002. № 2. С. 54–57.
7. Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Синебрюхов С.Л., Пузь А.В., Гнеденков А.С. Композиционные защитные покрытия на поверхности никелида титана // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. № 2. С. 20-25.
8. Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Формирование оксидных покрытий на крупногабаритных изделиях из титановых сплавов // *Судостроение*. 2005. № 1. С. 58–60.
9. Шаталов В.К., Лысенко Л.В., Сулина О.В. Технология микродугового оксидирования различных поверхностей крупногабаритных конструкций // *Наукоемкие технологии*. 2012. Т. 13, № 2. С. 35–41.

10. Эпельфельд А.В. Технология и оборудование микродугового оксидирования // Квалификация и качество. 2002. № 4. С. 33–37.
11. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
12. Пономарев И.С., Кривоносова Е.А., Горчаков А.И. Особенности влияния электрических режимов на процесс микродугового оксидирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15, № 4. С. 99–103.
13. Эпельфельд А.В. Технология микродугового оксидирования. Часть 2 // Научные труды МАТИ им. К.Э. Циолковского (Вестник МАТИ). 2001. № 4 (76). С. 185–192.
14. Шаталов В.К., Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. Применение методов микродугового оксидирования при создании конструктивных элементов космических аппаратов // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 6. С. 183-192. DOI: [10.7463/0614.0712840](https://doi.org/10.7463/0614.0712840)
15. Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Способ получения защитных покрытий на поверхности металлов и сплавов: пат. 2194804 РФ. 2002.

Microarc Oxidation of Product Surfaces without Using a Bath

V.K. Shatalov^{1,*}, A.O. Shtokal¹, A.A. Blatov¹

[*vkshatalov@yandex.ru](mailto:vkshatalov@yandex.ru)

¹Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russia

Keywords: titanium, microarc oxidation, coating, electrode, electrolyte

While using an electrochemical method to cover the large-sized work-pieces, units, and products up to 6 m³ by protective coating, there is a certain difficulty to apply traditional anodizing techniques in a plating vat, and it is necessary to find various processing techniques.

To use the existing micro-arc oxide coating (MOC) methods for work-pieces of various forms and sizes in a plating vat is complicated in case it is required to provide oxide layers in separate places rather than over entire surface of a work-piece. The challenge is to treat flat surfaces in various directions, external and internal surfaces of rotation bodies, profiled surfaces, intersections, closed and through holes, pipes, as well as spline and thread openings for ensuring anti-seize properties in individual or small-scale production to meet technical requirements and operational properties of products.

A design of tools to provide MOC-process of all possible surfaces of various engineering box-type products depends on many factors and can be considerably different even when processing the surfaces of the same forms. An attachment to be used is fixed directly on a large-sized design (a work-piece, a product) or fastened in the special tool. The features of technological process, design shape, and arrangement of the processed surfaces define a fastening method of the attachment. Therefore it is necessary to pay much attention to a choice of the processing pattern and a design of tools.

The Kaluga-branch of Bauman Moscow State Technical University is an original proposer of methods to form MOC-coatings on the separate surfaces of large-sized work-pieces using the moved and stationary electrodes to solve the above listed tasks.

The following results of work will have an impact on development of the offered processing methods and their early implementation in real production:

1. To provide oxide coatings on the surfaces of large-sized products or assemblies in a single or small-scale type of production by the other methods is impossible.
2. There is a developed method to calculate volume electrolyte velocity while processing the large-sized work-pieces by means of moved electrode, taking into consideration the modes of MOC-coating formation and a design of the moved electrode. When processing a surface of

1dm² depending on the modes of MOC-coating formation and a design of the moved electrode the volume electrolyte velocity will make 4 – 6 l/min.

3. A descriptive design-engineering classification of methods for micro-arc oxide coating of separate surfaces of large-sized work-pieces is created on the basis of coated surface geometry, used electrode design, and formation method of a plating vat.

4. The classified methods can be successfully used in creating technologies of large-sized products from titanitic alloys, and the offered table is useful both for experts, and for students when studying electrochemical methods of processing.

References

1. Gordienko P.S., Gnedenkov S.V. *Mikrodogovoe oksidirovanie titana i ego splavov* [Microarc oxidation of titanium and its alloys]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1997. 179 p. (in Russian).
2. Harbcz H., Lewandowska M. Microstructural changes during oxidation of titanium alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, vol. 61, no. 2-3, pp. 542–547. DOI: [10.1016/S0254-0584\(03\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00070-1)
3. Tinoco J.C., Estrada M., Romero G. Room temperature plasma oxidation mechanism to obtain ultrathin silicon oxide and titanium. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, no. 6, pp. 895–903. DOI: [10.1016/S0026-2714\(03\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00098-2)
4. Krupa D., Baszkiewicz J., Sobesak J.W., Bilinski A., Barcz A. Modifying the properties of titanium surface with the aim of improving its bioactivity and resistance. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 143-144, pp. 158–163. DOI: [10.1016/S0924-0136\(03\)00398-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00398-4)
5. Zhukov C.B., Kantaeva O.A., Zheltukhin R.V., Epel'fel'd A.B., Ber L.B. Investigation of physical and mechanical properties, structure and phase composition of the coatings obtained by the method of microarc oxidation. *Pribory = Devices*, 2008, no. 4, pp. 28–32. (in Russian).
6. Suminov I.V., Epel'fel'd A.B., Krit B.L., Borisov A.M., Dun'kin O.N. Plasma surface modification of aviation items. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation industry*, 2002, no. 2, pp. 54–57. (in Russian).
7. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Sinebryukhov C.L., Puz' A.V., Gnedenkov A.S. Composite protective coating on the surface of titanium nickelide. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: Materials, Protection*, 2007, no. 2, pp. 20-25. (in Russian).
8. Shatalov V.K., Lysenko L.V. Forming of oxide coatings upon large-dimension products made of titanium alloys. *Sudostroenie = Shipbuilding*, 2005, no. 1, pp. 58–60. (in Russian).
9. Shatalov V.K., Lysenko L.V., Sulina O.V. Microarc oxidation of various surfaces of large size structures. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*, 2012, vol. 13, no. 2, pp. 35–41. (in Russian).
10. Epel'fel'd A.B. Technology and equipment for micro-arc oxidation. *Kvalifikatsiya i kachestvo = Qualification and quality*, 2002, no. 4, pp. 33–37. (in Russian).

11. Suminov I.V., Epel'fel'd A.V., Liudin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. *Mikrodugovoe oksidirovanie (teoriia, tekhnologiia, oborudovanie)* [The micro-arc oxidation (theory, technology, equipment)]. Moscow, EKOMET Publ., 2005. 368 p. (in Russian).
12. Ponomarev I.S., Krivonosova E.A., Gorchakov A.I. Features of the influence of electric modes on micro-arc oxidation process. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Vestnik PSTU*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 99–103. (in Russian).
13. Epel'fel'd A.B. Micro-arc oxidation technology. Part 2. *Nauchnye trudy MATI (Vestnik MATI)*, 2001, no. 4 (76), pp. 185–192. (in Russian).
14. Shatalov V.K., Shtokal A.O., Rykov E.V., Dobrosovestnov K.B. Application of micro-arc oxidation methods in making the structure elements of spacecraft. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 6, pp. 183-192. DOI: [10.7463/0614.0712840](https://doi.org/10.7463/0614.0712840) (in Russian).
15. Shatalov V.K., Lysenko L.V. *Sposob polucheniya zashchitnykh pokrytiy na poverkhnosti metallov i splavov* [The method of obtaining protective coatings on the surface of metals and alloys]. Patent RF, no. 2194804. 2002. (in Russian).