

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 627.7.015

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-33-40

КИНЕТИКА РОСТА МДО-ПОКРЫТИЯ ПРИ ВНЕВАННОМ ПРОЦЕССЕ

ЧАВДАРОВ АНАТОЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ , канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
info@firma-tom.ru 

ДЕНИСОВ ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник
va.denisov@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы формирования покрытия при вневанном способе микродугового окисления (МДО) применительно к точечному противозлектроду. Математически обоснованы зависимости скорости роста толщины покрытия от электрических, геометрических и химических параметров процесса МДО. Разработан алгоритм расчета производительности процесса МДО, обусловленный скоростью роста толщины покрытия. Проверка разработанной методики экспериментального выбора режимов вневанного МДО алюминиевых сплавов с электронейтральным соплом проводилась с целью получения покрытия на небольшом участке детали с плоской поверхностью. В эксперименте при неизменном расстоянии «Сопло-изделие», равном 10 мм, расстояние «Электрод-изделие» принимало значения 5, 10, 20, 30 мм. В качестве «плоской» поверхности принимался торец прутка диаметром 50 мм из сплава Д16Т на основе алюминия, электродом служил пруток из стали 08Х18Н10Т диаметром 6 мм. В качестве электролита применялся состав для ванного способа: 8 г КОН, 30...35 г Na₂SiO₃, 1 г нанопорошка искусственного алмаза на 6 л дистиллированной воды. Продолжительность процесса МДО составляла 120 мин. Экспериментально установлено, что увеличение расстояния «Электрод-изделие» снижает потенциал формирования покрытия, что вызывает снижение силы тока в электрохимической цепи. Анализ толщины МДО-покрытия выявил, что 5...15 мм – это оптимальное расстояние от электрода и сопла до изделия, при котором обеспечивается стабильная толщина покрытия более 100 мкм, на площади, равной и большей площади сечения сопла, подающего электролит. Экспериментально подтверждена целесообразность применения разработанной математической модели и методики выбора режимов процесса при вневанном способе микродугового окисления. Экспериментальными исследованиями установлено, что предлагаемая схема ведения процесса МДО обеспечивает увеличение производительности (скорости роста толщины) нанесения покрытия на 20% и снижение энергопотребления на 25%.

Ключевые слова: микродуговое окисление, вне ванный процесс, скорость роста толщины покрытий, математическое моделирование.

Формат цитирования: Чавдаров А.В., Денисов В.А. Кинетика роста МДО-покрытия при вневанном процессе // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 33-40. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-33-40.

© Чавдаров А.В., Денисов В.А., 2021



ORIGINAL PAPER

KINETICS OF THE MICROARC OXIDATION COATING GROWTH IN THE NO-BATH PROCESS

ANATOLIY V. CHAVDAROV , PhD (Eng), Key Research Engineer
info@firma-tom.ru 

VYACHESLAV A. DENISOV, DSc (Eng), Chief Research Engineer
va.denisov@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The authors consider theoretical foundations of the coating formation when using the no-bath method of microarc oxidation (MAO) as applied to a point counter electrode. The relationships between the growth rate of the coating thickness and the electrical, geometric and chemical parameters of the MAO process have been mathematically determined. An algorithm

for calculating the productivity of the MAO process, due to the growth rate of the coating thickness has been developed. The offered methodology for the experimental selection of modes of the no-bath MAO of aluminum alloys with an electrically neutral nozzle was verified to obtain a coating on a small area of a part with a flat surface. In the experiment, with a constant "Nozzle-Workpiece" distance equal to 10 mm, the distance "Electrode-Workpiece" took the values of 5, 10, 20, 30 mm. As a "flat" surface, the authors took the end face of a 50 mm rod made of the D16T alloy based on aluminum, and a rod made of the 08Kh18H10T steel with a diameter of 6 mm served as an electrode. Use was made of the composition applied in the bath method which included an electrolyte: 8 g of KOH, 30...35 g of Na₂SiO₃, 1 g of artificial diamond nanopowder per 6 liters of distilled water. The duration of the MAO process was 120 min. It has been experimentally established that an increase in the "Electrode-Workpiece" distance decreases the potential for coating formation, which decreases the current in the electrochemical circuit. The analysis of the MAO coating thickness has revealed that 5...15 mm is the optimal distance from the electrode and nozzle to the workpiece, which ensures a stable coating thickness of more than 100 microns on an area equal to or greater than the cross-sectional area of the nozzle supplying electrolyte. The expediency of using the developed mathematical model and the methodology for selecting the process modes with the no-bath method of microarc oxidation has been experimentally confirmed. The experimental studies have established that the proposed scheme of the MAO process provides an increase in the productivity (the thickness growth rate) of coating deposition by 20% and a decrease in energy consumption by 25%.

Key words: microarc oxidation, no-bath process, growth rate of coating thickness, mathematical modeling.

For citation: Chavdarov A.V., Denisov V.A. Kinetics of the microarc oxidation coating growth in the no-bath process. Agricultural Engineering, 2021; 4 (104): 33-40. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-33-40.

Введение. Использование технологии МДО для создания покрытий с заданными свойствами широко обсуждается в мировом научном сообществе применительно к различным металлам и сплавам. В работах [1-3] приведены данные об использовании МДО-процесса в аэрокосмической и других отраслях, отмечены особенности свойств покрытий при изменении состава основы материала и режимов МДО. Авторами установлены перспективы и области использования технологии МДО. Многие научные публикации описывают свойства покрытий применительно к исследуемой области и также отмечают перспективность и практическую значимость процесса МДО как в области машиностроения, так и в области медицины [4-9].

Целесообразность применения технологии МДО для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) подтверждена в работах [10-13]. Термостойкость МДО-покрытий для условий работы ДВС представлена исследованиями в работе [14]. Применительно к обработке методом МДО днищ автомобильных поршней для предотвращения прогара наиболее предпочтительным является вневаннный процесс МДО.

Цель исследований: изучение процесса образования МДО-покрытия при вневаннном способе с использованием математического и экспериментального аппаратов.

Материалы и методы. Процесс роста толщины МДО-покрытия рассматривался согласно разработанной математической модели.

Для качественного анализа процесса роста толщины покрытия при МДО-процессе используем выражение¹:

$$\frac{dU}{d\tau} = \left(\frac{dU}{dh}\right) \left(\frac{dh}{dm}\right) \left(\frac{dm}{d\tau}\right), \quad (1)$$

где U – потенциал формирования покрытия, В; τ – независимая переменная времени, с; h – толщина покрытия, м; m – масса покрытия, г;

$$\frac{dh}{dm} = \frac{I}{\left(\frac{dm}{dh}\right)} \cong \frac{I}{\gamma \cdot S(h)}, \quad (2)$$

где γ – среднеобъемная плотность покрытия, г/м³; $S(h)$ – площадь покрытия МДО как функция толщины покрытия, м².

Преобразуя выражение (1) с учетом выражения (2), получим:

$$\frac{dm}{d\tau} = \left(\frac{du}{d\tau}\right) \cdot \left(\frac{dm}{dh}\right) = \gamma \cdot S(h) \left(\frac{dU}{d\tau}\right) \left(\frac{dh}{dU}\right),$$

или

$$\frac{dm}{d\tau} = \gamma \cdot S(h) \cdot \left(\frac{dh}{d\tau}\right). \quad (3)$$

С другой стороны, масса выделившегося при электрохимической реакции вещества в соответствии с законом Фарадея определяется по формуле²:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{M}{F \cdot z} \cdot I, \quad (4)$$

где I – сила тока, А; M – молярная масса, г/моль; F – постоянная Фарадея, Кл/моль; z – эффективная валентность.

Приравняв выражения (3) и (4), получим:

$$\gamma \cdot S(h) \cdot \left(\frac{dh}{d\tau}\right) = \frac{M}{F \cdot z} \cdot I. \quad (5)$$

Технологический параметр процесса МДО – ток I , являющийся следствием суммарного сопротивления электрохимической цепи при практически стационарном потенциале процесса после выхода на режим в течение 2-4 мин. Поэтому переходными процессами (изменениями анодного и катодного напряжений и силы тока) в этот

¹ Беленький М.А., Иванов А.Ф. Электроосаждение металлических покрытий: Справочник. М.: Металлургия, 1985. 288 с.

² Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. 4-е изд. М.: Высшая школа, 1984. 509 с.

период можно пренебречь ввиду малой их длительности по сравнению с длительностью всего процесса, а потенциал МДО принимаем как

$$U = U_a + U_k, \quad (6)$$

где U_a – анодное падение напряжения, В; U_k – катодное падение напряжения, В.

Сопротивление электрохимической цепи (R_{Σ} , Ом) в процессе МДО можно вычислить как сумму активного сопротивления столба электролита (R_3 , Ом) между электродами и сопротивления слоя покрытия (R_n , Ом):

$$R_{\Sigma} = R_3 + R_n; \quad (7)$$

$$R_3 = \rho_3 \frac{\Delta}{S_c}, \quad (8)$$

где ρ_3 – удельное электросопротивление электролита в столбе между электродами, Ом·м; Δ – расстояние между электродом и деталью, м; S_c – площадь, которую «видит» электрод на детали, м².

При вневанном процессе МДО круглых плоских поверхностей –

$$S_c = \pi \cdot r_c^2, \quad (9)$$

где r_c – радиус сопла, подающего электролит.

Сопротивление слоя покрытия –

$$R_n = \rho_n \frac{h}{S(h)}, \quad (10)$$

где ρ_n – удельное электросопротивление покрытия, Ом·м.

Можно предположить, что удельное сопротивление столба электролита ρ_3 и покрытия ρ_n в процессе одного цикла МДО не меняется.

Подставляя выражения (8), (10) в (7), получим:

$$R_{\Sigma} = \rho_3 \cdot \frac{\Delta}{S} + \rho_n \cdot \frac{h}{S(h)}. \quad (11)$$

В выражении (5) технологический параметр I , то есть силу тока в электрохимической цепи, можно выразить через закон Ома:

$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}}. \quad (12)$$

Подставляя выражения (6), (11), (12) в уравнение (5), получим взаимосвязь технологических параметров процесса с изменением толщины покрытия МДО в функции времени:

$$\gamma \cdot S(h) \cdot \frac{dh}{d\tau} = \frac{M}{F \cdot z} \cdot \frac{U}{\left(\rho_3 \cdot \frac{\Delta}{S} + \rho_n \cdot \frac{h}{S(h)} \right)}, \quad (13)$$

которое после преобразования приобретает вид:

$$\gamma \cdot \rho_3 \cdot \frac{\Delta}{S} \cdot S(h) \cdot \frac{dh}{d\tau} + \gamma \cdot \rho_n \cdot h \cdot \frac{dh}{d\tau} = \frac{M}{F \cdot z} \cdot U; \quad (14)$$

$$\left(\gamma \cdot \rho_3 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 + \gamma \cdot \rho_n \cdot h \right) \cdot dh = \frac{M \cdot U}{F \cdot z} \cdot d\tau. \quad (15)$$

После интегрирования уравнения (15) окончательно получим:

$$\left(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \rho_n \cdot h^2 + \gamma \cdot \rho_3 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \cdot h \right) \Big|_{H_0}^H = \frac{M \cdot U}{F \cdot z} \cdot \tau. \quad (16)$$

Верхний предел интегрирования H можно определить, используя данные технологического оборудования для вневанного нанесения МДО по схеме с нейтральным соплом (рис 1).

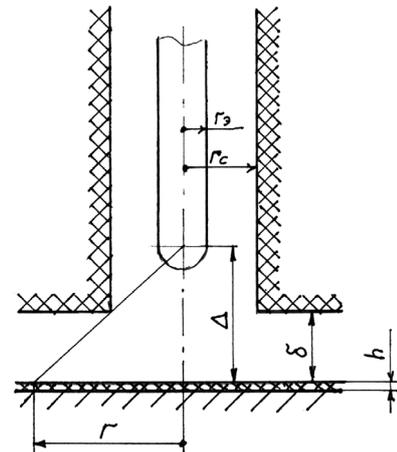


Рис. 1. Расчетно-экспериментальная диаграмма вневанного МДО с электронеутральным соплом

Fig. 1. Analytical-and-experimental diagram of no-bath micro-arc oxidation with an electrically neutral nozzle

Площадь покрытия $S(h)$ варьируется в зависимости от изменения расстояний δ и Δ . При точечном катоде покрытие, по нашему мнению, формируется (осаждается) в виде прямого кругового конуса с площадью основания S (площадь, которую «видит» электрод):

$$S = \pi \cdot r^2, \quad (17)$$

где r – радиус окружности (рис. 1):

$$r = \frac{\Delta + r_3}{\delta + r_3}. \quad (18)$$

Принимаем толщину покрытия за пределами области, ограниченной радиусом окружности, неизменной в процессе нанесения МДО и равной H_0 , то есть начальной толщине, если не производили специальной зачистки. При проведении зачистки, например, резанием, $H_0 = 0$. Высота конуса H , необходимая для обеспечения требуемой толщины покрытия, находится из выражения:

$$H = \frac{h}{I - \frac{r \cdot \delta + r_3}{r_c \cdot \Delta + r_3}}. \quad (19)$$

Как следует из рисунка 1, величины r_c, δ, Δ и r_3 определяют технологические факторы оснащения (электрода, сопла и их взаимного расположения относительно детали).

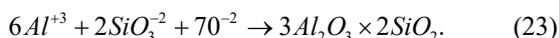
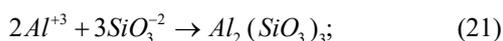
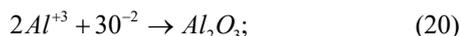
Подставляя выражение (19) в уравнение (16), можно оценивать режимы обработки процессом МДО,

спроектированным по схеме с нейтральным соплом, соплом-электродом и «микрованной», то есть методами вневанного МДО.

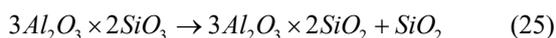
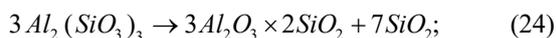
Технологическими параметрами, кроме указанных в выражении (19), являются U , ρ_s , характеризующие соответственно источник питания и применяемый электролит, а также продукты диссоциации и электрохимической анодной реакции, определяемые M , z и γ .

На аноде в полупериод, когда деталь является положительным электродом, идут электрохимические процессы с выделением комплексных оксидов: $Al_2O_3 \times 2SiO_2$, $Al_2O_3 \times SiO_2$, $3Al_2O_3 \times 2SiO_2$, Al_2O_3 , SiO_2 .

Основные реакции на аноде:



После смены полувольты и перемены заряда на детали продукты реакций (22), (23) разлагаются при охлаждении:



с образованием муллита $3Al_2O_3 \times 2SiO_2$ и тридилита SiO_2 в свободном виде.

Алгоритм расчетов производительности процесса, обусловленный скоростью роста покрытия, следующий:

1. По заданной толщине покрытия и месту расположения его на детали (то есть его геометрическим размерам) оценивают требуемые технологические параметры оснастки r_c , δ , Δ , r_s и необходимую высоту конуса H из выражения (19). Здесь можно проводить оптимизацию параметров нахождением минимума H путем дифференцирования по принятому параметру, не затрагивая h и r_n .

2. По реакциям (20)-(23) оценивают величины M , z , γ исходных веществ (SiO_3^{-2} , O^{-2} , «высаживаемых» на аноде.

3. Проводят расчет по уравнению (16), задавшись режимом МДО, то есть задавая напряжение U на источнике.

Ориентируясь на приведенный алгоритм расчетов, можно определить методику экспериментов для подтверждения полученных закономерностей, то есть выражений (16) и (19), и выявления недостающих для расчетов данных, не найденных в технической литературе.

Методика экспериментального определения режимов вневанного МДО алюминиевых сплавов с электронейтральным соплом. Реализацию схемы вневанного МДО алюминиевых сплавов проводили на экспериментальной установке (рис. 2).

В качестве сборника электролита использовали ванну объемом 10 л, в качестве источника энергии – анодно-катодный источник питания на основе батареи емкостей. Движение электролита через сопло обеспечивали центробежным насосом, позволяющим с помощью вентиля регулировать расход электролита в широком диапазоне.

Электронейтральное сопло 1 (рис. 2) было изготовлено из изоляционного материала. В качестве электрода 2 использовали пруток из стали 08X18H10T диаметром

6 мм, к которому подводили кабель от источника. Торцевой электрод, обращенный к поверхности изделия, обрабатываемой МДО, выполняли в форме полусферы. Электрод закрепляли в сопле с помощью винта 3.

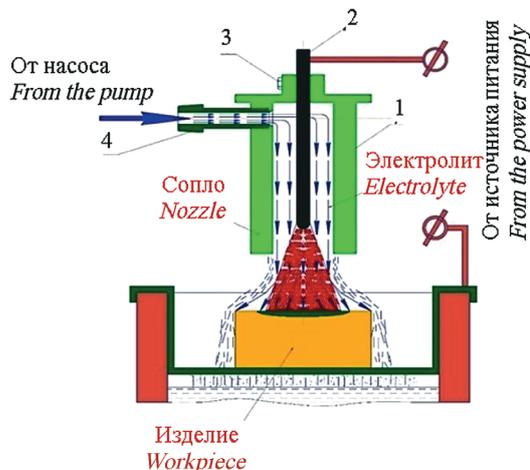


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – электронейтральное сопло; 2 – электрод; 3 – винт; 4 – подводящий штуцер

Fig. 2. Schematic illustration of the experimental installation:

1 – nozzle; 2 – electrode; 3 – screw; 4 – supply fitting

Подачу электролита в сопло осуществляли через шланг, закрепленный на подводящем штуцере 4 с внутренним диаметром канала 6 мм. Рабочий орган укрепляли на кронштейне таким образом, чтобы исключить короткое замыкание источника питания. Крепление рабочего органа позволяло изменять расстояние между электродом и изделием, а также торцом сопла и изделием – как совместно, так и независимо друг от друга, в интервале 0...350 мм.

Экспериментальный выбор режимов по схеме с электронейтральным соплом имел целью выявление возможности получения покрытия на небольшом участке детали.

Эксперимент проводили на образцах с плоской поверхностью и отсутствием перемещения электрода и изделия относительно друг друга в процессе МДО. Это, по нашему мнению, необходимо для исключения влияния неизвестных факторов на формирование покрытия МДО, связанных с относительным перемещением электрода и изделия, для сравнения эффективности процессов вневанного и ванного способов нанесения покрытий, для выявления закономерностей роста покрытия, наносимого вневанным МДО. При получении положительных результатов при вневанном нанесении покрытий при неподвижных электродах и изделии выявленные закономерности легко преобразуются для других видов поверхностей деталей: вал, шар, тор и т.п.

В качестве «плоской» поверхности принимали торцевую прутку \varnothing 50 мм из сплава Д16Т на основе алюминия. Торцевую прутку обрабатывали на токарном станке. Обрабатываемый торец прутки помещали над ванной с электролитом таким образом, чтобы при «обливе» обрабатываемого торца рабочим все брызги не выходили за пределы объема ванны. Образец с обрабатываемой поверхностью крепили к ванне винтом с резьбой М5. Рабочий

орган (сопло и электрод) укрепляли над обрабатываемым торцом прутка, по возможности соосно, на необходимом расстоянии. В процессе экспериментальной отработки режимов нанесения покрытия выявляли оптимальное расстояние между электродом, соплом и изделием, обеспечивающее необходимую площадь и толщину МДО покрытия.

Движение электролита через сопло устанавливали таким образом, чтобы вся внутренняя поверхность сопла была заполнена электролитом и электрод не имел бы несмоченных участков. Вытекание электролита из сопла имело по возможности ламинарный стабильный характер без нарушений сплошности струи и без изменения её сечения.

За критерий оценки качества покрытия, полученного вневанными способом, приняли покрытие с толщиной, равной или превышающей 100 мкм, которое, по мнению ряда исследователей, способно обеспечить эксплуатационные характеристики износостойкости для большинства известных в машиностроении конструкций.

В связи с отсутствием сведений о скорости роста покрытия при вневанном МДО выбрали продолжительность процесса 120 мин, так как при ванном способе в течение этого времени покрытие такой толщины получали с гарантией по всей поверхности обрабатываемых изделий. Предполагали, что в результате обработки в течение указанного времени возможно получение более толстых покрытий. Если этот результат будет достигнут, то возможна корректировка продолжительности оксидирования в сторону уменьшения длительности процесса.

При проведении эксперимента при постоянной величине расстояния «Сопло-изделие», равной 10 мм, расстояние «Электрод-изделие» соответствовало 5, 10, 20, 30 мм (рис. 1). Повторность эксперимента трехкратная. После нанесения покрытия измеряли его толщину толщиномером «Константа-5». В качестве электролита применялся состав для ванного способа: 8 г КОН, 30...35 г Na_2SiO_3 , 1 г нанопорошка искусственного алмаза на 6 л дистиллированной воды.

В связи с тем, что при расчетах по выражению (16) отсутствовали данные по удельным электросопротивлениям ρ_s и ρ_n , в ходе экспериментов измеряли ток электрохимической цепи, анодное и катодное падение напряжений U_a и U_k . Отсутствующие значения ρ_s и ρ_n определяли расчетом из системы уравнений для каждого конкретного эксперимента, используя выражения (8) и (10). Для проверки расчетов проведены замеры сопротивления непосредственно на эталоне: электронейтральная трубка длиной 1 м, заполненная электролитом. Измеряли напряжение, ток, сечение трубки и далее определяли сопротивление по формуле:

$$\rho_s = \frac{R \cdot S_{\text{тр}}}{l_{\text{тр}}} \quad (26)$$

Результаты исследований. На рисунке 3 показаны наиболее характерные изменения технологических параметров процесса при расстояниях «Электрод-изделие», равных 5, 10, 20, 30 мм.

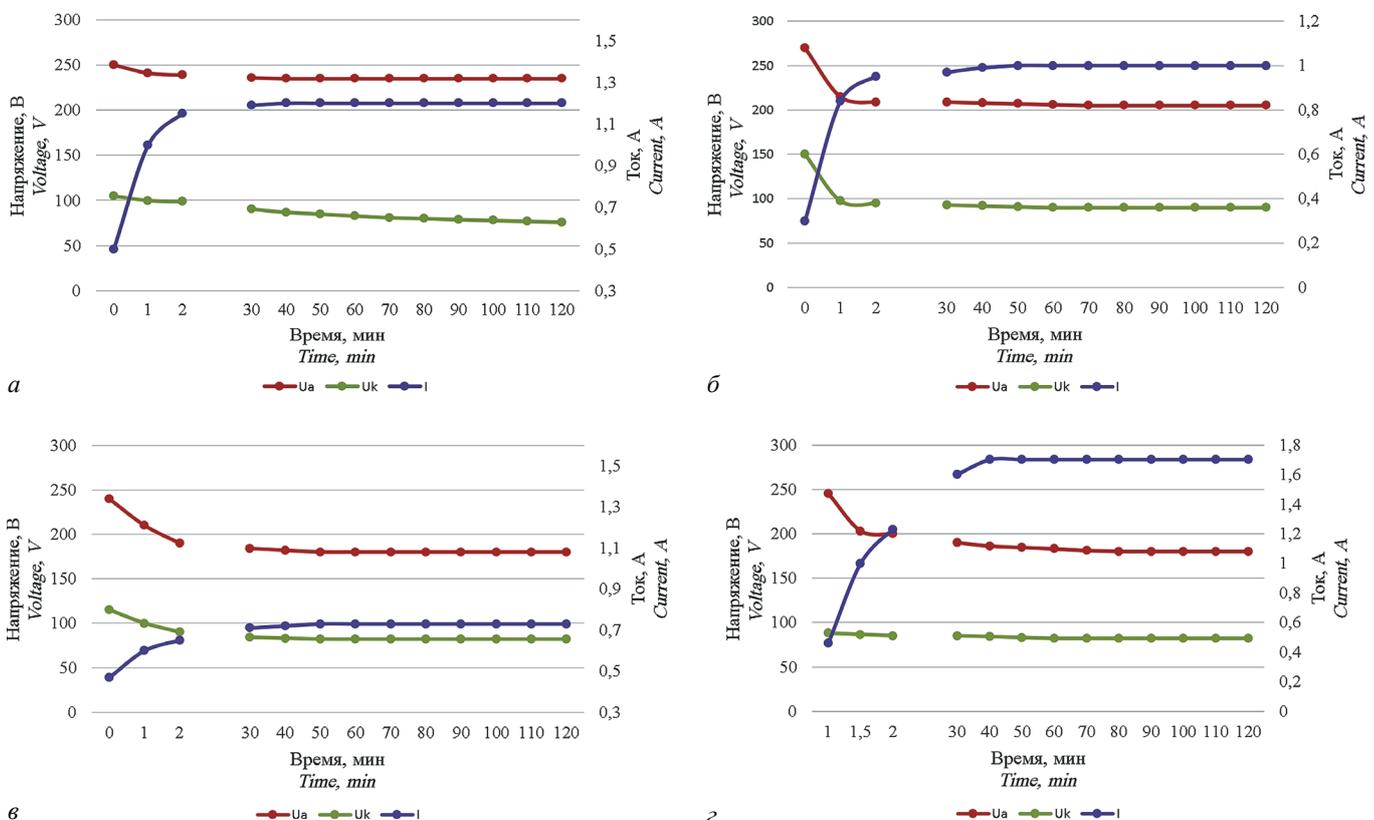


Рис. 3. Изменение анодного и катодного напряжений и тока во времени при определенном расстоянии «Электрод-изделие»: а – 5 мм; б – 10 мм; в – 20 мм; г – 30 мм

Fig. 3. Anode and cathode voltage and current variation over time for a certain “Electrode-Workpiece” distance: а – 5 mm; б – 10 mm; в – 20 mm; г – 30 mm

Можно отметить в каждом случае двух-, трехминутный выход на стационарный режим по анодному и катодному падению напряжения. Установлено, что увеличение расстояния «Электрод-изделие» увеличивает и продолжительность выхода на стационарный режим, особенно по катодному напряжению и силе тока.

Анализ расположения кривых изменения анодного и катодного падений напряжений показывает, что увеличение расстояния «Электрод-изделие» снижает потенциал формирования покрытия, и это вызывает снижение силы тока в электрохимической цепи.

Эксперимент подтвердил качественную модель, выведенную теоретически и представленную в правой части выражения (16).

На рисунке 4 приведено распределение толщины покрытия вневанного МДО по сечению образца с плоской поверхностью, полученное по вышеописанной схеме. Время процесса МДО составляло 120 мин, ёмкость конденсаторов – 100 мкФ, диаметр сопла – 13,8 мм, диаметр электрода – 6 мм. Характер распределения толщины свидетельствует о достаточно хорошей воспроизводимости процесса.

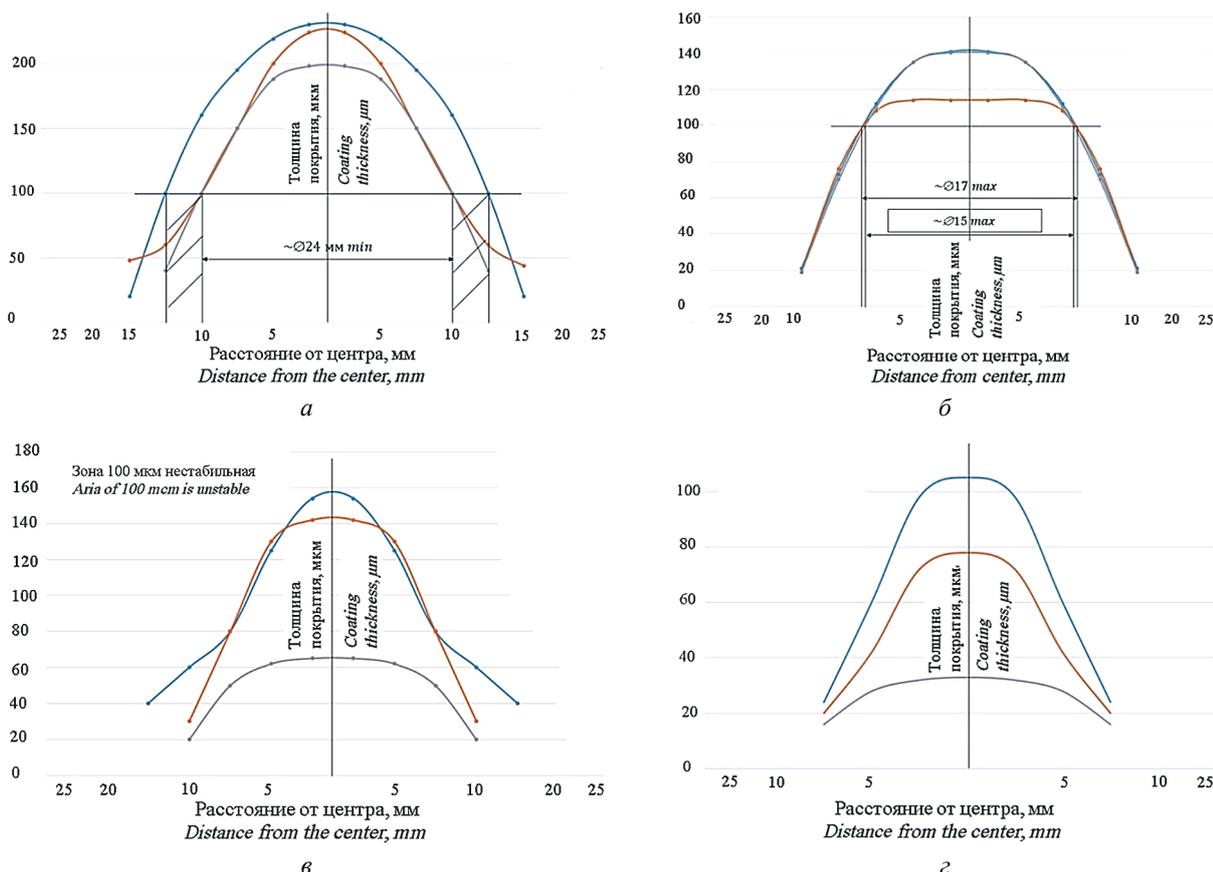


Рис. 4. Распределение толщины покрытия вневанного МДО при соответствующем расстоянии «Электрод-изделие»: а – 5 мм; б – 10 мм; в – 20 мм; г – 30 мм

Fig. 4. Coating thickness spreading of no-bath micro-arc oxidation at the corresponding “Electrode – Workpiece” distance: а – 5 mm; б – 10 mm; в – 20 mm; г – 30 mm

В случае расстояния «Электрод-изделие» 5 мм (рис. 4а) толщина покрытия на каждом из трех образцов составляла соответственно 194, 225 и 235 мкм. Толщина свыше 100 мкм образовывалась на площади, ограниченной минимальным диаметром 24 мм, при диаметре сопла 14 мм.

Увеличение расстояния «Электрод-изделие» в 2 раза сузило область образования покрытия с толщиной более 100 мкм до окружности диаметром 15 мм, толщина покрытия снизилась до 140, 140 и 112 мкм соответственно (рис. 4б).

Увеличение расстояния «Электрод-изделие» в 4 раза выявило нестабильность достижения принятого критерия в 100 мкм: на двух образцах толщина покрытий соответствовала 142 и 154 мкм, а зона покрытия сузилась

до 12 мм; на третьем образце толщина покрытия составила лишь 70 мкм (рис. 4в).

Дальнейшее увеличение расстояния «Электрод-деталь» до 20 мм не позволило достигнуть толщины в 100 мкм ни на одном из образцов (рис. 4г).

При ванном ведении процесса МДО на описанных выше режимах (плотность тока, соотношение анодного и катодного напряжений, аналогичный состав электролита) толщина покрытия составляет 110...120 мкм. Следовательно, для описанного способа вневанного ведения процесса для локальных поверхностей скорость роста покрытия увеличивается на 20...30%, что позволяет снизить энергетические затраты при получении покрытий. Именно эти затраты составляют основную часть в себестоимости получения МДО-покрытий.

Для оценки влияния положения сопла относительно электрода (и изделия) были выполнены две серии опытов по три образца в каждой, в которых сопло выставляли относительно электрода «в ноль», а электрод относительно изделия на расстоянии 5 мм в первом случае и 20 мм – во втором случае. Характер изменения параметров технологического процесса (анодного и катодного напряжений, силы тока) показал, что положение сопла влияет на выход объема покрытия и площадь, занимаемую покрытием, толщина которого превышает 100 мкм.

Таким образом, при расстоянии электрода и сопла от изделия 5...15 мм стабильно достигается толщина покрытия более 100 мкм на площади, равной и более площади сечения сопла, подающего электролит.

Визуальный анализ поверхностей, контактирующих с электролитом вне основной зоны микродуговых реакций, показал, что они подвергаются электрохимической коррозии общего характера с появлением темно-серых пятен (предположительно алюминатов калия и натрия).

По нашему мнению, при разработке технологических процессов МДО конкретных изделий следует организовать систему защиты необрабатываемых МДО поверхностей путем слива электролита в сборник.

Библиографический список

1. Famiyen L., Huang X. Plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloys: Microstructures, Properties, and Applications. *Modern Concepts in Material Science*. 2(1): 2019. MCMS.MS.ID.000526. DOI:10.33552/MCMS.2019.02.000526.
2. Zhang Y., Fan W., Du H.Q. et al. Corrosion behavior and structure of plasma electrolytic oxidation coated aluminum alloy. *International journal of electrochemical science*. 2017, 12: 6788-6800. DOI:10.20964/2017.07.70.
3. Miao J.G., Wu R., Hao K.D. et al. Effects of alloying elements on structure of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings on aluminum alloys. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 310: 85-89. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.310.85.
4. Shi-hang Kang, Wen-bin Tu, Jun-xiang Han et al. A significant improvement of the wear resistance of Ti6Al4V alloy by a combined method of magnetron sputtering and plasma electrolytic oxidation (PEO). *Surface and Coatings Technology*. 2019; 358: 879-890. DOI:10.1016/j.surfcoat.2018.12.025.
5. Guo Peitao, Tang Mingyang, Zhang Chaoyang. Tribological and corrosion resistance properties of graphite composite coating on AZ31 Mg alloy surface produced by plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 2019; 359: 197-205. DOI:10.1016/j.surfcoat.2018.12.073.
6. Bing Yin, Zhenjun Peng, Jun Liang et al. Tribological behavior and mechanism of self-lubricating wear-resistant composite coatings fabricated by one-step plasma electrolytic oxidation. *Tribology International*. 2016; 97: 97-107. DOI:10.1016/j.triboint.2016.01.020.
7. Pezzato L., Cerchier P., Brunelli K. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with fungicidal properties. *Surface Engineering*. 2019; 35(4): 325-333. DOI:10.1080/02670844.2018.1441659.
8. Jinhe Dou, Yang Chen, Huijun Yu et al. Research status of magnesium alloys by micro-arc oxidation: a review. *Surface Engineering*, 2017; 33(10): 731-738. DOI:10.1080/02670844.2017.1278642

Выводы

1. Разработанная математическая модель может быть применима к изменяющимся режимам МДО, составу электролита и геометрическим параметрам противозлектродов для анодно-катодного процесса.

2. Экспериментально подтверждена работоспособность схемы с электродом и электронейтральным соплом при вневанном (проточном) процессе МДО алюминиевых сплавов.

3. При расстояниях «Электрод-изделие» и «Сопло-изделие» 5...15 мм достигается выход объемов покрытия, обеспечивающих получение толщины покрытия более 100 мкм на площади, большей сечения сопла, подающего электролит. Получены оптимальные сочетания размеров рабочих органов и параметров режима технологического процесса для нанесения покрытия МДО на плоскую поверхность: расстояние «Электрод-изделие» – 10...15 мм; расстояние «Сопло-изделие» – 5...10 мм; соотношение диаметров сопла и изделия – 3:1; сила тока – 1А; процесс анодно-катодный.

4. Экспериментальными исследованиями установлено, что предлагаемая схема ведения процесса МДО обеспечивает увеличение производительности (скорости роста толщины) нанесения покрытия на 20% и снижение энергопотребления на 25%.

References

1. Famiyen L., Huang X. Plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloys: Microstructures, Properties, and Applications. *Modern Concepts in Material Science*. 2(1): 2019. MCMS.MS.ID.000526. DOI:10.33552/MCMS.2019.02.000526.
2. Zhang Y., Fan W., Du H.Q. et al. Corrosion behavior and structure of plasma electrolytic oxidation coated aluminum alloy. *International journal of electrochemical science*, 2017, 12: 6788-6800. DOI:10.20964/2017.07.70.
3. Miao J.G., Wu R., Hao K.D. et al. Effects of alloying elements on structure of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings on aluminum alloys. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 310: 85-89. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.310.85.
4. Shi-hang Kang, Wen-bin Tu, Jun-xiang Han et al. A significant improvement of the wear resistance of Ti6Al4V alloy by a combined method of magnetron sputtering and plasma electrolytic oxidation (PEO). *Surface and Coatings Technology*, 2019; 358: 879-890. DOI:10.1016/j.surfcoat.2018.12.025.
5. Guo Peitao, Tang Mingyang, Zhang Chaoyang. Tribological and corrosion resistance properties of graphite composite coating on AZ31 Mg alloy surface produced by plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 2019; 359: 197-205. DOI:10.1016/j.surfcoat.2018.12.073.
6. Bing Yin, Zhenjun Peng, Jun Liang et al. Tribological behavior and mechanism of self-lubricating wear-resistant composite coatings fabricated by one-step plasma electrolytic oxidation. *Tribology International*, 2016; 97: 97-107. DOI:10.1016/j.triboint.2016.01.020.
7. Pezzato L., Cerchier P., Brunelli K. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with fungicidal properties. *Surface Engineering*, 2019; 35(4): 325-333. DOI:10.1080/02670844.2018.1441659.
8. Jinhe Dou, Yang Chen, Huijun Yu et al. Research status of magnesium alloys by micro-arc oxidation: a review. *Surface Engineering*, 2017; 33(10): 731-738. DOI:10.1080/02670844.2017.1278642

9. Tongbo Wei, Fengyuan Yan, Jun Tian. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005; 389(1-2): 169-176. DOI: org/10.1016/j.jallcom.2004.05.084.

10. Malyshev V.N., Volkhin A.M. Antifriction properties increasing of ceramic MAO-coatings. Proceedings of the institution of Mechanical Engineers. Part: J. *Journal of Engineering Tribology*. 2014; 228(4): 435-444. DOI:10.1177/1350650113513570.

11. Лесневский Л.Н., Лежнёв Л.Ю., Ляховецкий М.А. Плазменные методы формирования износостойких покрытий элементов тепловых двигателей и установок // Вестник научно-технического развития. 2015. № 10. С. 31-43.

12. Киселева С.К., Зайнуллина Л.И., Абрамова М.М. и др. Микродуговое оксидирование высококремнистого алюминиевого сплава АК12Д // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 7. С. 115-128. DOI: 10.7463/0715.0779403

13. Криштал М.М., Ивашин П.В., Полунин А.В. и др. Повышение износостойкости деталей алюминий-кремниевых сплавов методом МДО для работы в экстремальных режимах трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 765-768.

14. Чавдаров А.В., Скоропупов Д.И., Милованов Д.А. и др. Исследование стойкости керамических МДО-покрытий при термоциклировании // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 298-302.

9. Tongbo Wei, Fengyuan Yan, Jun Tian. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005; 389(1-2): 169-176. DOI: org/10.1016/j.jallcom.2004.05.084.

10. Malyshev V.N., Volkhin A.M. Antifriction properties increasing of ceramic MAO-coatings. Proceedings of the institution of Mechanical Engineers. Part: J. *Journal of Engineering Tribology*, 2014; 228(4): 435-444. DOI:10.1177/1350650113513570.

11. Lesnevsky L.N., Lezhnev L.Yu., Lyakhovetsky M.A. Plazmennyye metody formirovaniya iznosostoykikh pokrytiy elementov teplovykh dvigateley i ustanovok [Plasma methods of forming wear-resistant coatings of the components of heat engines and installations]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2015; 10: 31-43. (In Rus.)

12. Kiseleva S.K., Zainullina L.I., Abramova M.M. et al. Mikrodugovoe oksidirovanie vysokokremnistogo alyuminiyevogo splava AK12D [Microarc oxidation of high-silicon aluminum alloy AK12D]. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2015; 7: 115-128. DOI: 10.7463/0715.0779403 (In Rus.)

13. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V. et al. Povyshenie iznosostoykosti detaley alyuminiyevo-kremniyevykh splavov metodom MDO dlya raboty v ekstremal'nykh rezhimakh treniya [Improving the wear resistance of parts of aluminum-silicon alloys by the MAO method for operation in extreme friction modes]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011; 13 (4-3): 765-768. (In Rus.)

14. Chavdarov A.V., Skoropupov D.I., Milovanov D.A. et al. Issledovanie stoykosti keramicheskikh MDO-pokrytiy pri termotsiklirovani [Study of the resistance of ceramic MAO coatings during thermal cycling]. *Trudy GOSNITI*, 2015; 121: 298-302. (In Rus.)

Критерии авторства

Чавдаров А.В., Денисов В.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Чавдаров А.В., Денисов В.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.03.2021

Одобрена после рецензирования 11.06.2021

Принята к публикации 11.06.2021

Contribution

A.V. Chavdarov, V.A. Denisov performed theoretical studies, and based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. A.V. Chavdarov, V.A. Denisov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 15.03.2021

Approved after reviewing 11.06.2021

Accepted for publication 11.06.2021