

Моделирование электрических параметров гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования

© 2023

*Печерская Екатерина Анатольевна*¹, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника и метрология»

Семёнов Анатолий Дмитриевич, доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология»

Голубков Павел Евгеньевич^{*2}, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология»

Пензенский государственный университет, Пенза (Россия)

*E-mail: iit@pnzgu.ru,
golpavpnz@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5657-9128>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-3181>

Поступила в редакцию 26.06.2023

Принята к публикации 11.12.2023

Аннотация: Микродуговое оксидирование является перспективной технологией получения износостойких антикоррозионных покрытий изделий из вентильных металлов и сплавов и применяется во многих отраслях промышленности. Одной из основных проблем данной технологии является низкая управляемость, обусловленная сложностью и взаимосвязанностью физико-химических явлений, происходящих в процессе нанесения покрытий. Для решения подобных проблем в настоящее время активно используются цифровые двойники. Исследование посвящено разработке математических моделей, которые целесообразно использовать в качестве структурных элементов цифрового двойника процесса микродугового оксидирования. Представлена электрическая схема замещения гальванической ячейки микродугового оксидирования, учитывающая сопротивление электролита, сопротивление покрытия детали в виде параллельного соединения нелинейного активного сопротивления и реактивного емкостного сопротивления. Предложена математическая модель, описывающая поведение электрической схемы замещения гальванической ячейки микродугового оксидирования. Разработана методика определения параметров указанной модели, включающая построение осциллограммы изменения сопротивления ячейки и ее аппроксимацию, оценку значений сопротивлений и емкости схемы замещения гальванической ячейки. Предложен способ расчета и разработана Simulink-модель процесса микродугового оксидирования, позволяющая имитировать осциллограммы тока и напряжения гальванической ячейки. Анализ модели показал, что модель устойчива, управляема и наблюдаема, но плохо обусловлена, что приводит к возникновению ошибок моделирования, максимальное значение которых составляет 7 % для напряжения и 10 % для тока. Методом параметрической идентификации с использованием экспериментальных осциллограмм тока и напряжения получены зависимости параметров схемы замещения гальванической ячейки от времени оксидирования. Установлено, что изменение среднего за период активного сопротивления гальванической ячейки коррелирует с толщиной покрытия.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование; электрическая схема замещения; математическая модель; Simulink-модель; сопротивление и емкость покрытия; адекватность модели.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 1022041100284-5-2.3.1.

Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

Для цитирования: Печерская Е.А., Семёнов А.Д., Голубков П.Е. Моделирование электрических параметров гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. № 4. С. 73–85. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-4-66-7.

ВВЕДЕНИЕ

Микродуговое оксидирование (МДО) применяется для улучшения механических и физико-химических свойств поверхностей деталей, выполненных из алюминиевых сплавов. Процесс применим не только к алюминию, но и к другим металлам вентильной группы, таким как Ti, Zr, Mg, Ta. Сочетание высокой микротвердости и износостойкости с коррозионной стойкостью покрытий, получаемых методом МДО, обеспечивает широкое применение изделий с такими покрытиями во многих отраслях промышленности [1; 2]. Однако в настоящее время имеется ряд нерешен-

ных вопросов, сдерживающих развитие технологии МДО, главными из которых являются высокая энергозатратность [3; 4] и низкая управляемость технологического процесса, связанная с совместным влиянием многих разнородных факторов на свойства формируемых покрытий [5; 6].

В настоящее время одним из перспективных способов управления сложными производственными процессами является использование цифровых двойников, которые позволяют имитировать и прогнозировать поведение реального объекта в виртуальном мире с помощью информации, поступающей с датчиков на объекте, на протяжении всего его жизненного цикла. При

этом, как правило, модели компонентов реальной системы известны или легко создаются с помощью САД-систем, как, например, 3D-модели на машиностроительных производствах [7]. Однако для сложных многофакторных технологических процессов, таких как МДО, процесс создания цифрового двойника значительно затруднен по причине несовершенства или отсутствия математических моделей некоторых физических явлений, приводящих к формированию оксидных покрытий. Большое количество работ посвящено исследованию механизма формирования покрытий при МДО [8; 9], однако лишь в некоторых из них приводится его аналитическое описание. Так, в обзорной статье [10], посвященной МДО титановых сплавов, имеется достаточно подробная математическая интерпретация механизма электролиза при высоком напряжении, однако не рассматриваются микроплазменные процессы. В [11] приводятся формулы для расчета электронной температуры плазмы микроразрядов при МДО в условиях локального термодинамического равновесия, однако связь с электрохимическими процессами не прослеживается. Более того, согласно [10; 12], фундаментальная теория плазменного электролиза, содержащая аналитическое описание разнородных явлений (электрохимических, микроплазменных и др.), происходящих в процессе МДО как единой взаимосвязанной системы, в настоящее время не разработана.

Таким образом, актуальной научной задачей является построение математической модели, которая могла бы служить основой цифрового двойника процесса МДО. В первом приближении данная модель должна производить оценку толщины формируемых покрытий на основе скрытой информации, содержащейся в осциллограммах тока и напряжения, измеренных в процессе МДО, путем идентификации параметров схемы замещения гальванической ячейки.

Цель исследования – выявление параметров электрической схемы замещения гальванической ячейки, коррелирующих с толщиной МДО-покрытий, и разработка методики определения этих параметров.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования получены 30 образцов МДО-покрытий на заготовках из технического алюминия марки АД31, ГОСТ 4784-97 (2000) (таблица 1), размером $20 \times 15 \times 2$ мм. МДО-покрытия формировались с помощью разработанной авторами автоматизированной установки МДО, содержащей источник технологического тока, измерительные каналы тока, напряжения и температуры электролита и модуль управления на основе микроконтроллера. Источник технологического тока данной системы представляет собой последовательное соединение батареи конденсаторов с регулируемой емкостью и гальванической ячейки. Питание источника технологического тока осуществляется синусоидальным напряжением от сети 220 В 50 Гц. Перед началом процесса МДО задавалось амплитудное значение тока через гальваническую ячейку путем изменения емкости батареи конденсаторов (подключения необходимого числа конденсаторов), которое оставалось постоянным до завершения МДО-обработки. МДО прово-

дилось при плотности тока 5 А/дм^2 в анодно-катодном режиме с соотношением анодного и катодного тока, равным 1, в электролите состава NaOH (2 г/л), Na_2SiO_3 (9 г/л) в течение 30 мин, причем первый образец обрабатывался 1 мин, второй – 2 мин и т. д. Каждую минуту измерялись осциллограммы двух периодов формовочного напряжения и тока в гальванической ячейке с помощью встроенных в установку МДО измерительных каналов с относительной погрешностью $\pm 0,5 \%$ и частотой дискретизации 128 точек за период, равный периоду напряжения питающей сети (20 мс). Температура электролита в процессе нанесения покрытий не превышала $30 \text{ }^\circ\text{C}$. После обработки образцы с МДО-покрытиями вынимались из гальванической ячейки, промывались дистиллированной водой и высушивались. Толщина покрытий измерялась на поперечных шлифах с помощью 3D-контурографа-профилометра Mitaka PF-60. Программная обработка полученных экспериментальных зависимостей осуществлялась в среде MATLAB+Simulink.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическая модель процесса микродугового оксидирования

На рис. 1 показан характерный вид экспериментально измеренных осциллограмм напряжения и тока гальванической ячейки. Отклонение формовочного напряжения от синусоидальной формы обусловлено несовершенством напряжения питающей сети, а также односторонней проводимостью системы «анод – покрытие – электролит – катод», в результате чего наблюдается выпрямление напряжения (так называемый «вентильный эффект»). Изломы осциллограммы напряжения в анодном полупериоде при напряжении около 320 и 370 В связаны с зажиганием и гашением микроразрядов. Отличие формы тока от синусоидальной (треугольные импульсы тока в анодном и катодном полупериодах) обусловлено электрическим пробоем оксидного слоя, который имеет место только на пике синусоиды, когда напряжение на образце превышает напряжение пробоя. Нелинейность вольтамперной характеристики свидетельствует о нелинейном характере процесса формирования покрытия, а наличие гистерезиса с характерной петлей указывает на емкостный характер нагрузки. Для построения математической модели процесса МДО воспользуемся разработанной в [13] нелинейной электрофизической моделью в виде электрической схемы замещения гальванической ячейки (рис. 2).

Сопrotивление электролита моделируется активным сопротивлением R_1 , сопротивление покрытия – параллельным соединением нелинейного активного сопротивления R_2 и реактивного сопротивления емкости C_2 . Емкость C_1 , подключенная последовательно с гальванической ячейкой, не относится к исследуемому образцу и предназначена для моделирования выходного сигнала источника технологического тока (ограничения тока в цепи).

Математическая модель, описывающая поведение электрической схемы замещения гальванической ячейки МДО (рис. 2), выглядит следующим образом:

Перейдем от модели (1) к модели в пространстве состояний:

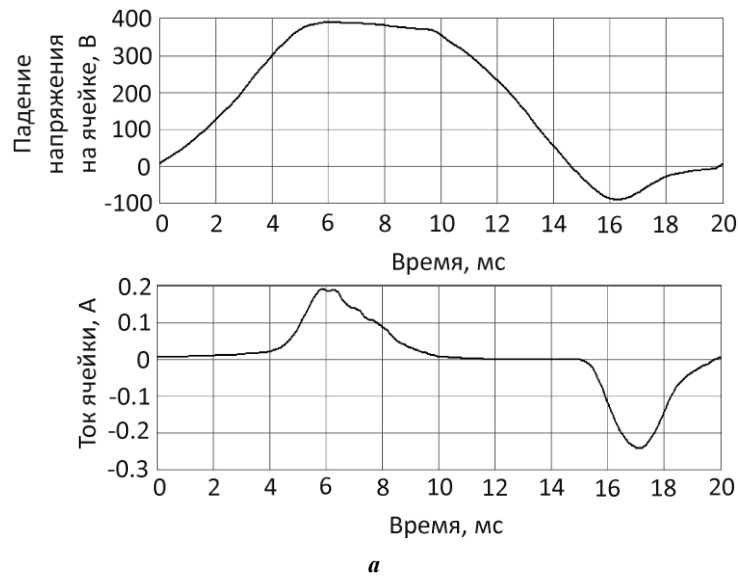
$$\begin{cases} \frac{1}{C_1} \int I_1 dt + R_1 I_1 + R_2 (U_1) I_2 = U \\ \frac{1}{C_2} \int I_3 dt - R_2 (U_1) I_2 = 0 \\ U_1 = U - \frac{1}{C_1} \int I_1 dt \\ I_1 = I_2 + I_3 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + BU \\ y = Cx + DU \end{cases} \quad (2)$$

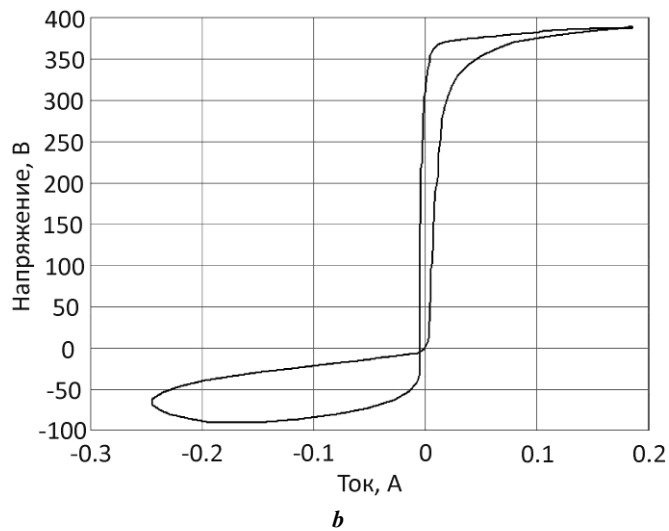
где $x = (I_1 \quad I_2)^T$;
 $y = I_1 + \frac{U}{R_1}$;

Таблица 1. Состав сплава АД31
 Table 1. AD31 alloy composition

Элемент	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Прочие	Al
Содержание, мас. %	0,2–0,6	0,5	0,1	0,1	0,45–0,9	0,1	0,2	0,15	0,15	Остальное



a



b

Рис. 1. Осциллограммы напряжения и тока гальванической ячейки (a) и ее вольтамперная характеристика (b)
 Fig. 1. Waveforms of voltage and current of a galvanic cell (a) and its current-voltage characteristics (b)

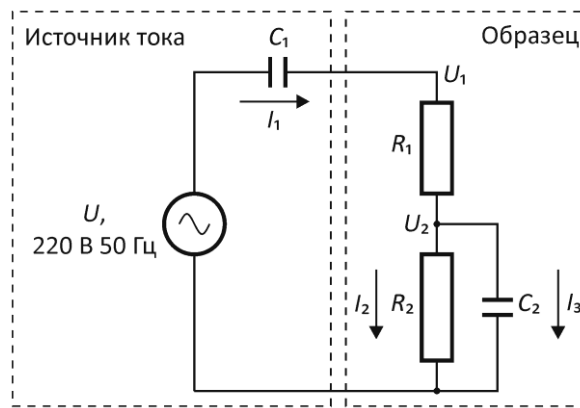


Рис. 2. Электрическая схема замещения процесса МДО
 Fig. 2. An equivalent electrical circuit of the MAO process

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R_1} & \frac{1}{C_2 R_1} \\ \frac{1}{C_2 R_2} & -\frac{1}{C_2 R_2} \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 \\ R_1 \\ 0 \end{pmatrix}; C = (0 \ 1);$$

$$D = 0; R_2 = f(U_1).$$

Выполним оценку параметров модели электрической схемы замещения гальванической ячейки МДО. Оценке подвергаются три параметра схемы замещения: активное сопротивление электролита R_1 , нелинейное активное сопротивление покрытия R_2 и его эквивалентная емкость C_2 .

Поскольку модель нелинейная, то использование традиционных методов идентификации нецелесообразно и может привести к недопустимым ошибкам в определении параметров модели. В связи с этим предлагается последовательная процедура определения параметров модели.

1. Построение осциллограммы изменения сопротивления ячейки и ее аппроксимация. Для построения осциллограммы изменения сопротивления ячейки найдем производную от вольтамперной характеристики:

$$R_1 + R_2 \approx \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}. \quad (3)$$

Осциллограммы напряжения U_1 , тока I_1 и суммарного сопротивления, рассчитанного по формуле (3), приведены на рис. 3. Видно, что осциллограмма суммарного сопротивления гальванической ячейки содержит четыре характерных участка. На первом участке ($\approx 2-7$ мс) происходит пробой покрытия положительной полярности приложенного к нему напряжения, сопротивление покрытия при этом резко падает до величины порядка 100 Ом. На втором участке ($\approx 7-13$ мс) ток в ячейке меняет полярность, и сопротивление покрытия восстанавливается до первоначальной величины примерно в 12 кОм.

На третьем участке ($\approx 13-17$ мс) происходит пробой покрытия отрицательным падением напряжения. На четвертом участке ($\approx 17-22$ мс) напряжение на ячейке меняет знак, и сопротивление покрытия восстанавливается.

Известно, что удельная проводимость электролита лежит в диапазоне $6,75 \dots 22,5$ мСм·см⁻¹ [14]. Полагая, что сопротивление электролита R_1 остается постоянным, можно считать, что сопротивление покрытия нелинейно зависит от приложенного к нему напряжения и протекающего по нему тока.

Полученные осциллограммы позволяют найти зависимость $R_1 + R_2 = f(U_1)$, которая показана на рис. 4. Значения аппроксимирующей кривой зависимости сопротивления ячейки от приложенного к ней напряжения сведены в таблицу 2.

На рис. 5 показана аппроксимация расчетной кривой сопротивления ячейки, представленной в таблице 2, уравнением косинуса вида

$$R_1 + R_2 = 70 \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{U_1 - 150}{96} \right) \right).$$

2. Оценка значения сопротивлений R_1 и R_2 . С учетом того, что после пробоя сопротивление покрытия R_2 близко к нулю, оценкой R_1 будет

$$R_1 = \min(R_n), \quad (4)$$

где R_n – множество полных сопротивлений гальванической ячейки, формируемых на участках пробоя покрытия.

На рис. 6 приведены участки низкого сопротивления ячейки, соответствующие интервалам времени от 2 до 7 и от 13 до 17 мс (см. рис. 3). Среднее значение сопротивления на этих участках равно $R_{2н} = 163$ Ом, что является оценкой низкого значения сопротивления R_2 . Оценкой высокого значения сопротивления R_2 может служить среднее значение сопротивлений, взятых из таблицы 2, что соответствует значению в $R_{2в} = 5,9$ кОм. В соответствии с (4) оценка сопротивления электролита R_1 будет равна $R_1 = 22$ Ом.

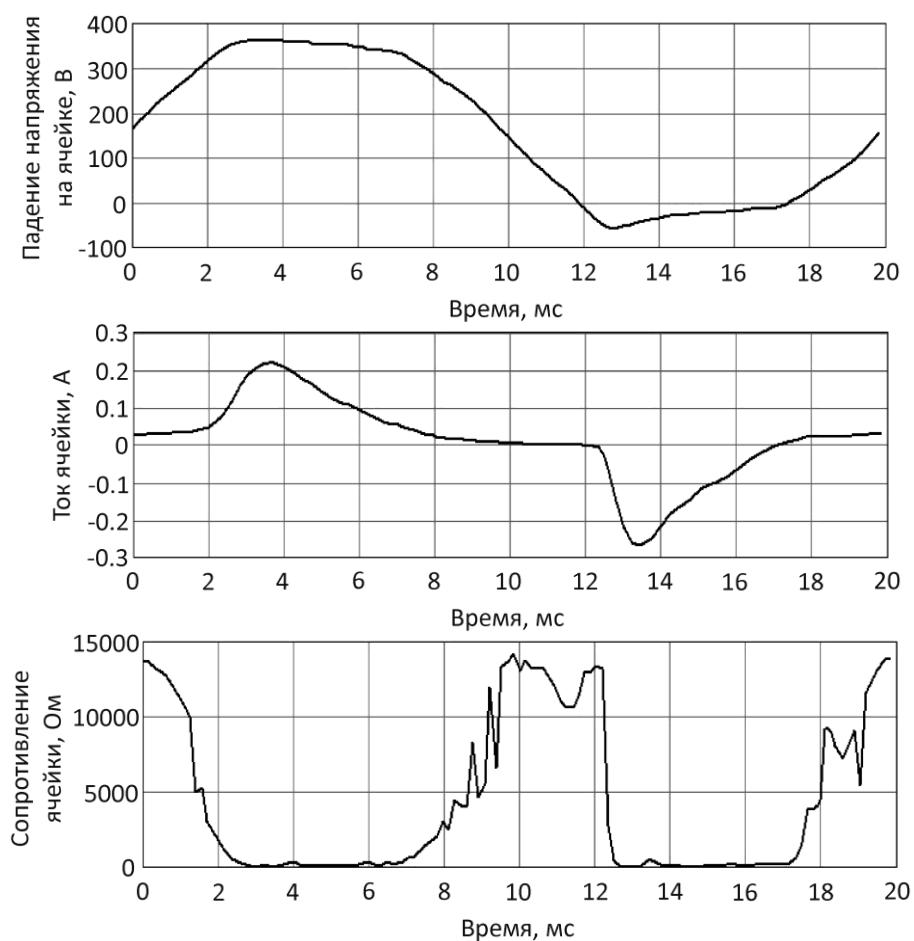


Рис. 3. Осциллограммы напряжения, тока и сопротивления гальванической ячейки
 Fig. 3. Waveforms of voltage, current and resistance of a galvanic cell

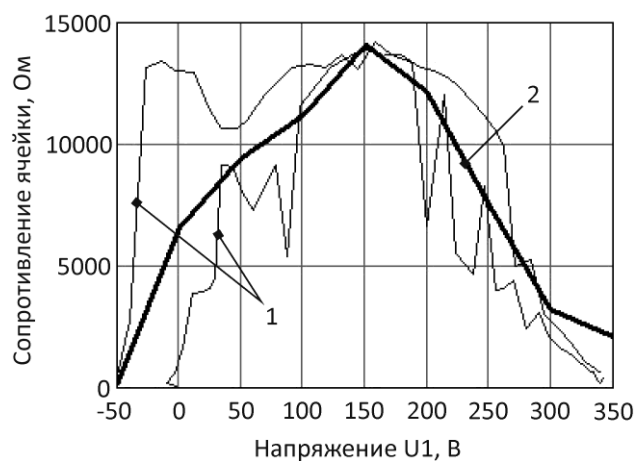


Рис. 4. Зависимости сопротивления ячейки от приложенного к ней напряжения
 Fig. 4. Dependences of cell resistance on voltage applied to it

Таблица 2. Значения аппроксимирующей кривой
Table 2. Approximating curve values

Напряжение, В	-100	-50	0	50	100	150	200	250	300	350	400
Сопротивление, кОм	0,15	0,15	6,6	9,4	11,2	14,1	12,2	7,5	3,2	2,1	0,15

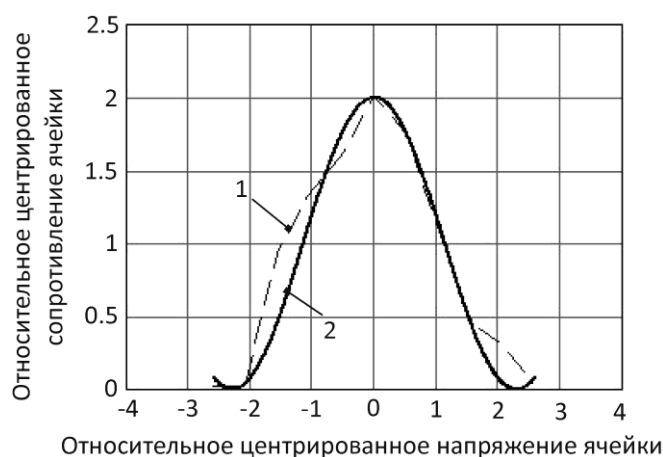


Рис. 5. Аппроксимация расчетной кривой сопротивления ячейки уравнением косинуса
Fig. 5. Approximation of the calculated curve of cell resistance by the cosine equation

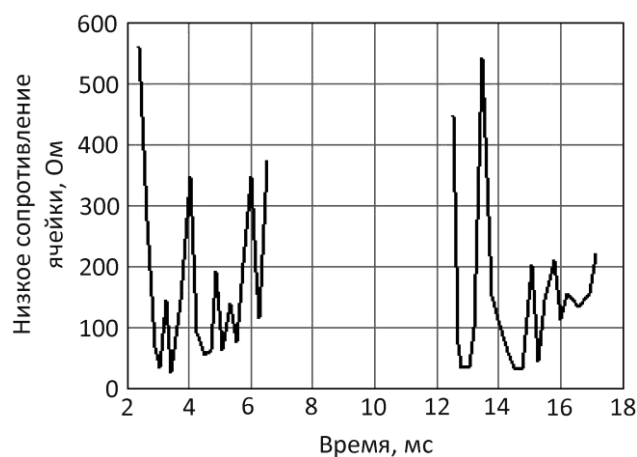


Рис. 6. Участки низкого сопротивления ячейки
Fig. 6. Cell low resistance areas

3. Оценка значения емкости ячейки C_2 . Для оценки C_2 запишем выражение для передаточной функции проводимости. Из (1) следует, что

$$W(p) = \frac{I_1(p)}{U_1(p)} = \frac{R_2 C_2 p + 1}{R_1 R_2 C_2 p + R_1 + R_2} \quad (5)$$

Найдем параметры передаточной функции проводимости ячейки, используя приложение MATLAB System

Identification Toolbox. В результате получены следующие постоянные времени передаточной функции:

$$\begin{aligned} T_1 &= R_1 R_2 C_2 = 0,002417 \text{ с} \\ T_2 &= R_2 C_2 = 0,0009829 \text{ с} \end{aligned} \quad (6)$$

Значение сопротивления R_2 примем равным его среднему значению за период питающего напряжения $R_{2c} = 4,4 \text{ кОм}$. Тогда оценка емкости C_2 согласно (6) будет равна $C_2 = 0,22 \text{ мкФ}$.

Расчет временных и частотных характеристик модели процесса микродугового оксидирования

Зная оценку параметров модели (2), нетрудно рассчитать и ее временные и частотные характеристики, используя приложение MATLAB Control System Toolbox. Были рассчитаны основные характеристики линеаризованной модели процесса МДО для режимов пробоя покрытия (короткое замыкание) и холостого хода, когда сопротивление покрытия высокое (рис. 7).

Передаточные функции проводимости по току I_2 имеют вид:

$$w_{i2} = \frac{46,957 \cdot s}{(s + 2,179 \cdot 10^5)(s + 48,97)};$$

$$w_{i2k} = \frac{46,957 \cdot (s - 5,639 \cdot 10^6)}{(s + 2,436 \cdot 10^5)(s + 11,82)},$$

где индексом k обозначена модель короткого замыкания.

Точность определения параметров схемы замещения гальванической ячейки методом параметрической идентификации оценивалась с точки зрения устойчивости, управляемости, наблюдаемости и обусловленности модели с использованием временных и частотных характеристик модели процесса МДО. Выявлено, что модель устойчива, поскольку корни характеристического уравнения отрицательны. Модель управляема и наблюдаема, поскольку ранги матриц управляемости и наблюдаемости равны порядку системы, однако модель плохо обусловлена, что может привести к существенным ошибкам при ее параметрической идентификации. Числа обусловленности для модели холостого хода R_{xx} и короткого замыкания R_{kz} равны 8410 и 317 соответственно. Большое значение числа обусловленности модели говорит о ее плохой обусловленности, т. е. малое изменение входного сигнала может привести к достаточно большому изменению выходного сигнала, что вносит ошибку в результаты моделирования.

Моделирование осциллограмм тока и напряжения в процессе МДО

Построение математической модели (1) процесса МДО и оценка ее параметров позволяют перейти к моделированию рассматриваемого процесса. Моделирование процесса МДО осуществлялось в Simulink. Результаты моделирования представлены на рис. 8. Установлено, что максимальная ошибка моделирования напряжения по отношению к амплитудному значению U_{\max} не превышает 7 %, максимальная ошибка моделирования тока по отношению к амплитудному значению I_{\max} не превышает 10 %.

Методика определения значимых параметров схемы замещения гальванической ячейки процесса МДО

На основе предложенных математических моделей разработана методика, которая позволяет установить, какие параметры схемы замещения гальванической ячейки наиболее значительно изменяются с ростом толщины покрытий в процессе МДО. Методика реализуется следующим образом.

1. В процессе формирования МДО-покрытия последовательно через каждую минуту происходит регистрация 30 осциллограмм падения напряжения и тока гальванической ячейки.

2. В каждом опыте вычисляют $R_{1i} + R_{2i}$ по формуле (3) и находят оценку $R_1 = \min(R_{1i} + R_{2i})$.

3. Вычисляют мгновенное значение сопротивления R_2 в каждом опыте:

$$R_1 + R_{2i} \approx \frac{\Delta U_{li}}{\Delta I_{li}}.$$

4. Строят временную зависимость среднего за период значения сопротивления R_2 (рис. 9).

5. В каждом опыте, используя приложение MATLAB System Identification Toolbox, вычисляют параметры передаточной функции (5).

6. По формулам (6), принимая $R_2 = 4400$ Ом, вычисляют емкость C_2 , график изменения которой представлен на рис. 10.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанные модели процесса МДО позволяют методом параметрической идентификации оценить численные значения параметров нелинейной электрической схемы замещения гальванической ячейки, а также выявить наиболее значимые параметры, коррелирующие с толщиной покрытий.

Использованная в расчетах нелинейная электрофизическая модель в виде электрической схемы замещения гальванической ячейки является упрощенной и не учитывает некоторые особенности процесса формирования МДО-покрытий. Одним из источников погрешности модели является использование для моделирования оксидного слоя идеальной емкости C , в то время как в электрохимических процессах обычно используют элементы постоянной фазы СРЕ с разложением на частотно-независимый фактор Q и показатель степени гетерогенности системы n [15; 16]. Тем не менее модель дает удовлетворительные результаты (максимальная ошибка моделирования вольтамперной характеристики составляет по напряжению не более ± 7 %, по току – не более ± 10 %) и в первом приближении может быть использована для формализации процесса нанесения покрытий.

Разработанная методика последовательного определения параметров схемы замещения гальванической ячейки является физически обоснованной, поскольку форма полученной осциллограммы изменения суммарного сопротивления ячейки подтверждает имеющиеся представления о механизме процесса МДО [17; 18]. Например, на рис. 3 отчетливо видны участки низкого сопротивления гальванической ячейки при максимальном анодном и катодном напряжении, соответствующие диэлектрическому пробое покрытия с последующим зажиганием микроразрядов.

Как видно на рис. 4, величина сопротивления покрытия составляет 12–15 кОм. С другой стороны, известно, что модуль импеданса оксидных слоев на алюминиевых сплавах достигает значений 20–200 МОм·см², а сопротивление поляризации – до 130–150 МОм·см² и выше [15; 19]. Выявленное расхождение в значениях сопротивления

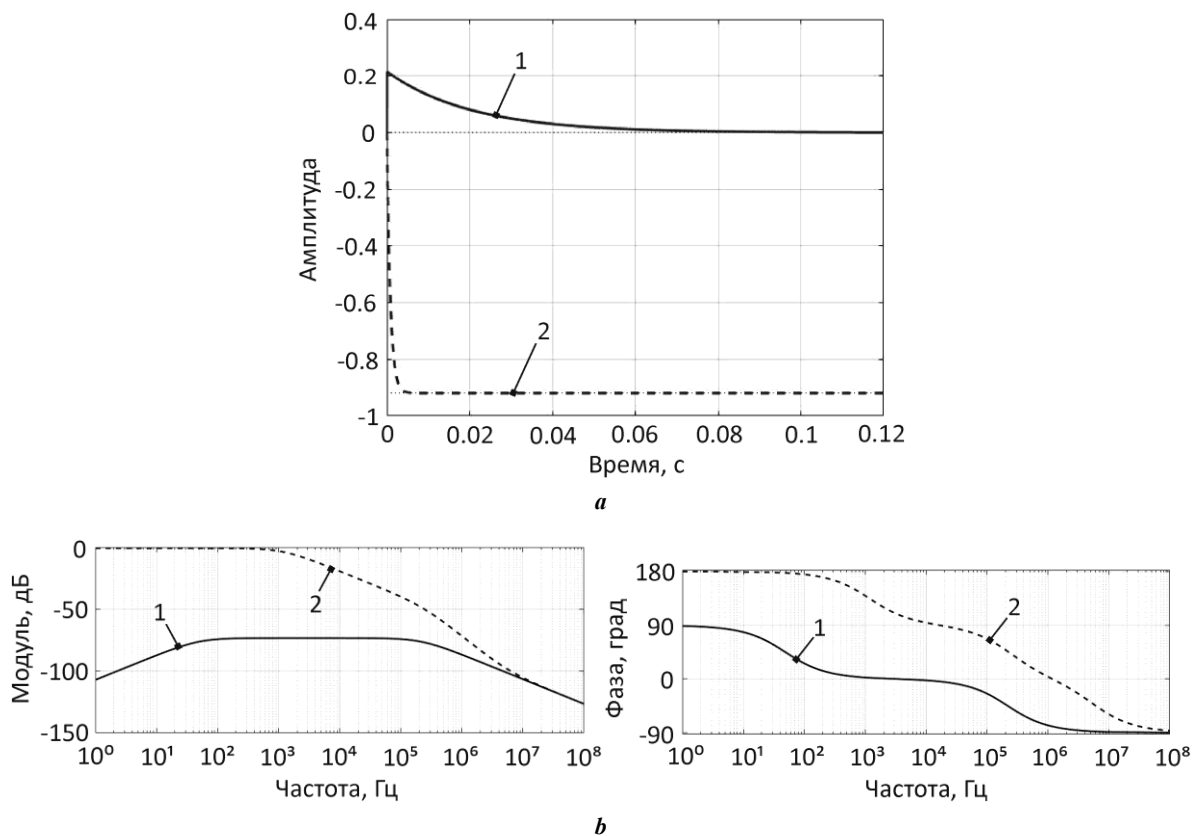


Рис. 7. Временные (а) и частотные характеристики (b) модели процесса МДО
 Fig. 7. Time (a) and frequency characteristics (b) of the MAO process model

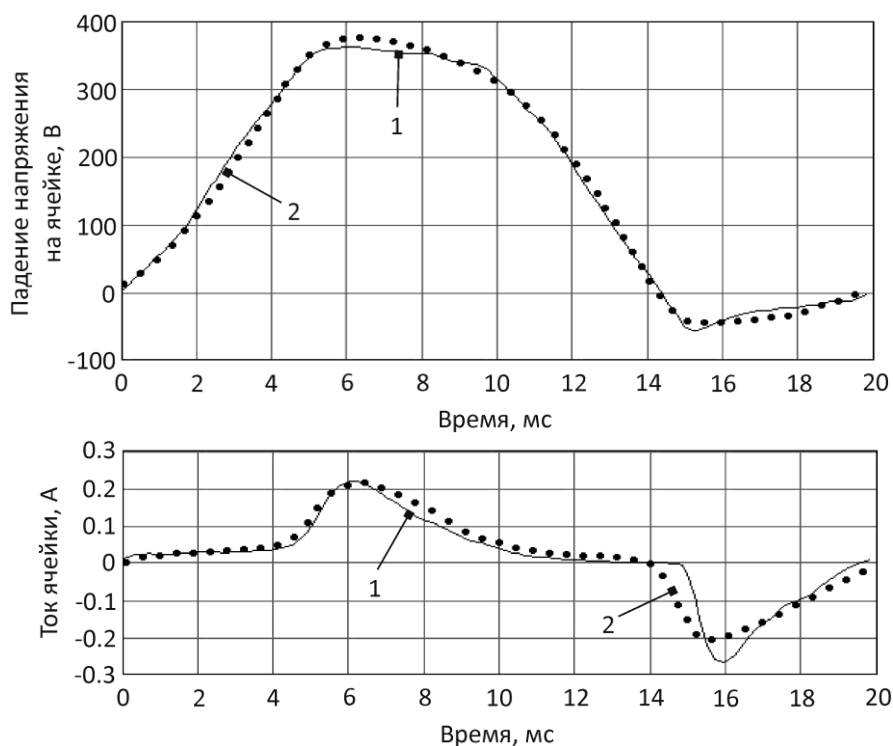


Рис. 8. Экспериментальные и расчетные осциллограммы напряжения и тока гальванической ячейки
 Fig. 8. Experimental and calculated waveforms of galvanic cell voltage and current



Рис. 9. Изменение за период среднего значения сопротивления R_2 в каждом опыте
Fig. 9. Change in the period average value of R_2 resistance in each experiment

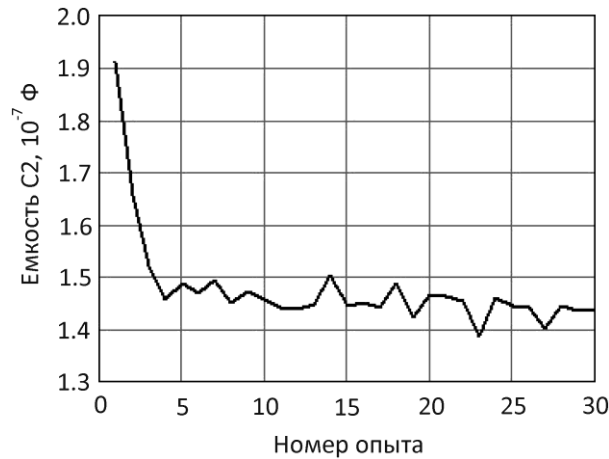


Рис. 10. Изменение емкости C_2
Fig. 10. Change in capacitance C_2

покрытия объясняется тем, что известные значения модуля импеданса получены на низкой частоте (до 10 Гц), а в данном исследовании расчет импеданса производился по вольтамперным характеристикам, измеренным при частоте 50 Гц. Согласно имеющимся данным [16], на этой частоте модуль импеданса покрытия имеет величину порядка 10^4 – 10^5 Ом/см², что согласуется с результатами экспериментов.

На графике зависимости сопротивления гальванической ячейки от формовочного напряжения (рис. 4) наблюдается максимум, наличие которого определяется выбором относительно простой аппроксимирующей функции (уравнения косинуса) и не связано с физическими явлениями, происходящими в гальванической ячейке. Выбор простой аппроксимирующей функции улучшает обусловленность изначально плохо обусловленного уравнения динамики процесса МДО. Фактически резкое уменьшение сопротивления барьерного слоя R_2 обусловлено его элек-

трическим пробоем как положительной, так и отрицательной полуволной прикладываемого к гальванической ячейке напряжения. В положительный полупериод пробой происходит при напряжении около +320 В, в отрицательный полупериод – около –40 В. Электрический пробой барьерного слоя на дне пор при обеднении электролита ионами приводит к вскипанию электролита, возникновению парогазового пузырька и зажиганию в нем микродугового разряда. Восстановление сопротивления барьерного слоя связано с гашением микродугового разряда, которое происходит в результате увеличения размеров и выхода за пределы поры парогазового пузырька и сопутствующего падения напряженности поля в нем [16; 20]. Таким образом, сложная форма изменения сопротивления барьерного слоя R_2 обусловлена сочетанием разнородных физических и химических процессов, возникающих в поровых каналах барьерного слоя в процессах его пробоя и восстановления.

Результаты моделирования осциллограмм тока и напряжения гальванической ячейки в среде Simulink представлены на рис. 8. Видно, что расчетная зависимость хорошо аппроксимирует экспериментальную кривую в анодном полупериоде, тогда как в катодном полупериоде расхождение между этими кривыми становится существенным. Это связано с тем, что предложенная электрическая схема замещения гальванической ячейки не полностью отражает поведение реальной электрохимической системы, а также с погрешностью метода параметрической идентификации и плохой обусловленностью модели.

Результаты применения разработанной методики определения значимых параметров схемы замещения гальванической ячейки процесса МДО представлены на рис. 9 и 10. Для выявления степени взаимосвязи сопротивления и емкости с толщиной покрытия выполнен корреляционный анализ, в ходе которого получены точечные и интервальные оценки коэффициента корреляции по критерию Фишера с доверительной вероятностью 95 %. Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 11 и в таблице 3. Видно, что имеет место сильная прямая корреляция между сопротивлением и толщиной покрытия; в случае емкости имеет место обратная корреляция, но она выражена слабее (возможно, это связано с особенностями схемы замещения гальванической ячейки и с погрешностью модели). Таким образом, в качестве значимого параметра для определения толщины покрытий в процессе МДО целесообразно использовать сопротивление покрытия,

рассчитанное по предложенной методике с помощью вольтамперных характеристик гальванической ячейки.

С учетом вышесказанного можно заключить следующее. Предложенная математическая модель принципиально обеспечивает возможность определения толщины покрытий в процессе МДО, несмотря на невысокую точность. Кроме того, модель позволяет воспроизводить осциллограммы тока и напряжения гальванической ячейки, которые удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные. Усовершенствование модели с учетом электрохимических импедансов позволит повысить точность моделирования, воспроизводимость результата и его сходимость с экспериментом, а использование в расчетах экспериментальных осциллограмм из пополняемой базы данных обеспечит возможность прогнозирования толщины покрытий для различных режимов МДО-обработки.

Результаты исследования могут быть использованы как в научных исследованиях при разработке цифровых двойников и автоматизированных систем управления процессом МДО, так и на производстве при отработке технологии нанесения микродуговых оксидных покрытий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенная математическая модель на основе электрической схемы замещения гальванической ячейки отражает связь между током и напряжением в гальванической ячейке и позволяет моделировать осциллограммы тока и напряжения в процессе МДО

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа
Table 3. Correlation analysis results

Параметр покрытия	Коэффициент корреляции	Доверительный интервал
Сопротивление	0,968	[0,93; 0,98]
Емкость	-0,611	[-0,80; -0,30]

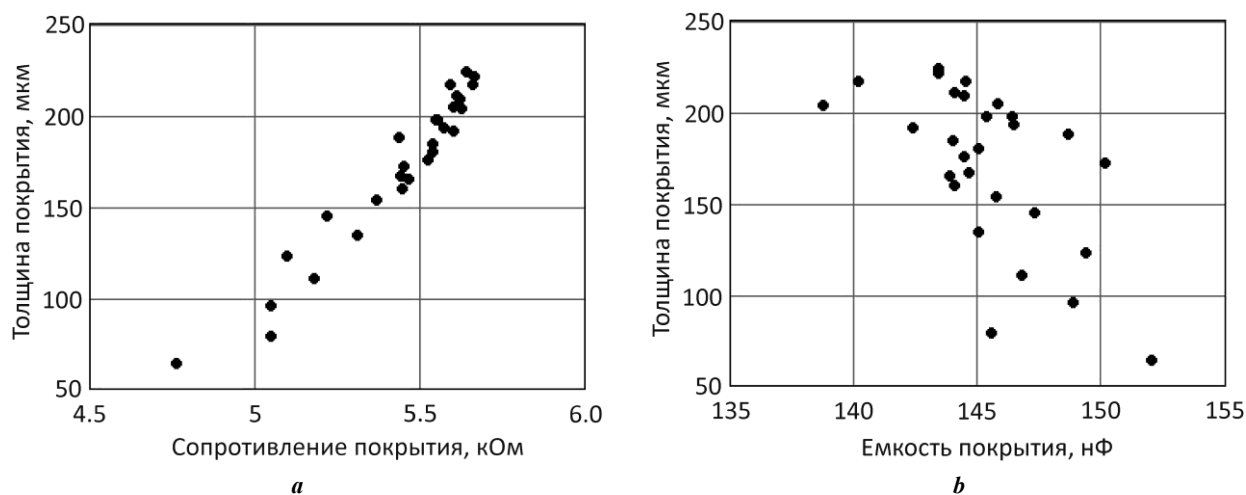


Рис. 11. Диаграммы рассеяния для сопротивления (а) и емкости (b) покрытия
Fig. 11. Scattering graphs for coating resistance (a) and capacitance (b)

с погрешностью не более $\pm 10\%$. Модель является упрощенной и не учитывает некоторые физико-химические закономерности формирования оксидных покрытий, что является ее недостатком. Тем не менее модель имеет удовлетворительную точность, что позволяет использовать результаты расчета в качестве начального приближения при оценке электрических параметров покрытий.

Разработанная методика идентификации параметров предложенной модели позволяет по экспериментальным полученным осциллограммам тока и напряжения в гальванической ячейке определить временные зависимости сопротивления и емкости покрытия в ходе процесса МДО. Методом корреляционного анализа установлена степень взаимосвязи этих параметров с толщиной покрытия. Обнаружена сильная корреляция между сопротивлением и толщиной покрытия, что позволяет использовать сопротивление покрытия в качестве значимого параметра для оценки толщины покрытия в процессе его формирования.

С помощью разработанной методики идентификации выявлены параметры электрической схемы замещения гальванической ячейки, коррелирующие с толщиной МДО-покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Yu Ji-Min, Choe Han-Cheol. Morphology Changes and Bone Formation on PEO-treated Ti-6Al-4V Alloy in Electrolyte Containing Ca, P, Sr, and Si Ions // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 477. P. 121–130. DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.11.223](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.223).
- Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke Th. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation – An Overview of the Process and Applications // *Coatings*. 2020. Vol. 10. № 7. Article number 628. DOI: [10.3390/coatings10070628](https://doi.org/10.3390/coatings10070628).
- Troughton S.C., Nomine A., Nomine A.V., Henrion G., Clyne T.W. Synchronised electrical monitoring and high speed video of bubble growth associated with individual discharges during plasma electrolytic oxidation // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 359. P. 405–411. DOI: [10.1016/j.apsusc.2015.10.124](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.124).
- Yang Kai, Zeng Jiaquan, Huang Haisong, Chen Jiadui, Cao Biao. A Novel Self-Adaptive Control Method for Plasma Electrolytic Oxidation Processing of Aluminum Alloys // *Materials*. 2019. Vol. 12. № 17. Article number 2744. DOI: [10.3390/ma12172744](https://doi.org/10.3390/ma12172744).
- Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В., Артамонов Д.В., Сафронов М.И., Печерский А.В. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2019. Т. 24. № 4. С. 363–369. DOI: [10.24151/1561-5405-2019-24-4-363-369](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-4-363-369).
- Tu Wenbin, Zhu Zhunda, Zhuang Xiujian, Cheng Yingliang, Skeldon P. Effect of frequency on black coating formation on AZ31 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation in aluminate-tungstate electrolyte // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 372. P. 34–44. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.012).
- Botin-Sanabria D.M., Mihaita A.-S., Peimbert-Garcia R.E., Ramirez-Moreno M.A., Ramirez-Mendoza R.A., Lozoya-Santos J.J. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. № 6. Article number 1335. DOI: [10.3390/rs14061335](https://doi.org/10.3390/rs14061335).
- Zhu Lujun, Ke Xiaoxing, Li Jingwei, Zhang Yuefei, Zhang Zhenhua, Sui Manling. Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al // *Surfaces and Interfaces*. 2021. Vol. 25. Article number 101186. DOI: [10.1016/j.surfint.2021.101186](https://doi.org/10.1016/j.surfint.2021.101186).
- Rogov A.B., Huang Yingying, Shore D., Matthews A., Yerokhin A. Toward rational design of ceramic coatings generated on valve metals by plasma electrolytic oxidation: The role of cathodic polarization // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. № 24. P. 34137–34158. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.08.324](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.324).
- Aliofkhaezrai M., Macdonald D.D., Matykina E., Parfenov E.V., Egorkin V.S., Curran J.A., Troughton S.C., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V., Lampke T., Simchen F., Nabavi H.F. Review of plasma electrolytic oxidation of titanium substrates: Mechanism, properties, applications and limitations // *Applied Surface Science Advances*. 2021. Vol. 5. Article number 100121. DOI: [10.1016/j.apsadv.2021.100121](https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100121).
- Hussein R.O., Nie X., Northwood D.O., Yerokhin A., Matthews A. Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010. Vol. 43. № 10. Article number 105203. DOI: [10.1088/0022-3727/43/10/105203](https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/10/105203).
- Clyne T.W., Troughton S.C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 64. № 3. P. 1–36. DOI: [10.1080/09506608.2018.1466492](https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492).
- Голубков П.Е., Печерская Е.А., Артамонов Д.В., Зинченко Т.О., Герасимова Ю.Е., Розенберг Н.В. Электрофизическая модель процесса микродугового оксидирования // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2019. Т. 62. № 11. С. 166–171. DOI: [10.17223/00213411/62/11/166](https://doi.org/10.17223/00213411/62/11/166).
- Mengesha G.A., Chu Jinn P., Lou Bih-Show, Lee Jyh-Wei. Corrosion performance of plasma electrolytic oxidation grown oxide coating on pure aluminum: effect of borax concentration // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 4. P. 8766–8779. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.06.020](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.020).
- Sowa M., Olesinski A., Szumski B., Maciej A., Bik M., Jelen P., Sitarz M., Simka W. Electrochemical characterization of anti-corrosion coatings formed on 6061 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation in the corrosion inhibitor-enriched aqueous solutions // *Electrochimica Acta*. 2022. Vol. 424. Article number 140652. DOI: [10.1016/j.electacta.2022.140652](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140652).
- Polunin A.V., Cheretaeva A.O., Borgardt E.D., Rastegaev I.A., Krishtal M.M., Katsman A.V., Yasnikov I.S. Improvement of oxide layers formed by plasma electrolytic oxidation on cast Al-Si alloy by incorporating TiC nanoparticles // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 423. Article number 127603. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2021.127603](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127603).
- Moga S.G., Negrea D.A., Ducu C.M., Malinovsky V., Schiopu A.G., Coaca E., Patrascu I. The Influence of Processing Time on Morphology, Structure and Func-

- tional Properties of PEO Coatings on AZ63 Magnesium Alloy // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 24. Article number 12848. DOI: [10.3390/app122412848](https://doi.org/10.3390/app122412848).
18. Mortazavi G., Jiechao Jiang, Meletis E.I. Investigation of the plasma electrolytic oxidation mechanism of titanium // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 488. P. 370–382. DOI: [10.1016/j.apsusc.2019.05.250](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.250).
 19. Egorin V.S., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyaliy I.E., Gnedenkov A.S., Chizhikov R.G. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 334. P. 29–42. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2017.11.025](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.025).
 20. Kaseem M., Fatimah S., Nashrah N., Ko Young Gun. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance // *Progress in Materials Science*. 2021. Vol. 117. Article number 100735. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2020.100735](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735).
- ### REFERENCES
1. Yu Ji-Min, Choe Han-Cheol. Morphology Changes and Bone Formation on PEO-treated Ti-6Al-4V Alloy in Electrolyte Containing Ca, P, Sr, and Si Ions. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 477, pp. 121–130. DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.11.223](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.223).
 2. Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke Th. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation – An Overview of the Process and Applications. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 7, article number 628. DOI: [10.3390/coatings10070628](https://doi.org/10.3390/coatings10070628).
 3. Troughton S.C., Nomine A., Nomine A.V., Henrion G., Clyne T.W. Synchronised electrical monitoring and high speed video of bubble growth associated with individual discharges during plasma electrolytic oxidation. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 359, pp. 405–411. DOI: [10.1016/j.apsusc.2015.10.124](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.124).
 4. Yang Kai, Zeng Jiaquan, Huang Haisong, Chen Jiadiu, Cao Biao. A Novel Self-Adaptive Control Method for Plasma Electrolytic Oxidation Processing of Aluminum Alloys. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 17, article number 2744. DOI: [10.3390/ma12172744](https://doi.org/10.3390/ma12172744).
 5. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V., Artamonov D.V., Safronov M.I., Pecherskiy A.V. Study on Effects of Technological Parameters of Micro-Arc Oxidation on Properties of Oxide Coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika*, 2019, vol. 24, no. 4, pp. 363–369. DOI: [10.24151/1561-5405-2019-24-4-363-369](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-4-363-369).
 6. Tu Wenbin, Zhu Zhunda, Zhuang Xiujuan, Cheng Yingliang, Skeldon P. Effect of frequency on black coating formation on AZ31 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation in aluminate-tungstate electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 372, pp. 34–44. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.012).
 7. Botin-Sanabria D.M., Mihaita A.-S., Peimbert-Garcia R.E., Ramirez-Moreno M.A., Ramirez-Mendoza R.A., Lozoya-Santos J.J. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 6, article number 1335. DOI: [10.3390/rs14061335](https://doi.org/10.3390/rs14061335).
 8. Zhu Lujun, Ke Xiaoxing, Li Jingwei, Zhang Yuefei, Zhang Zhenhua, Sui Manling. Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al. *Surfaces and Interfaces*, 2021, vol. 25, article number 101186. DOI: [10.1016/j.surfin.2021.101186](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101186).
 9. Rogov A.B., Huang Yingying, Shore D., Matthews A., Yerokhin A. Toward rational design of ceramic coatings generated on valve metals by plasma electrolytic oxidation: The role of cathodic polarization. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 24, pp. 34137–34158. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.08.324](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.324).
 10. Aliofkhazraei M., Macdonald D.D., Matykina E., Parfenov E.V., Egorin V.S., Curran J.A., Troughton S.C., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V., Lampke T., Simchen F., Nabavi H.F. Review of plasma electrolytic oxidation of titanium substrates: Mechanism, properties, applications and limitations. *Applied Surface Science Advances*, 2021, vol. 5, article number 100121. DOI: [10.1016/j.apsadv.2021.100121](https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100121).
 11. Hussein R.O., Nie X., Northwood D.O., Yerokhin A., Matthews A. Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, vol. 43, no. 10, article number 105203. DOI: [10.1088/0022-3727/43/10/105203](https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/10/105203).
 12. Clyne T.W., Troughton S.C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International Materials Reviews*, 2018, vol. 64, no. 3, pp. 1–36. DOI: [10.1080/09506608.2018.1466492](https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492).
 13. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Artamonov D.V., Zinchenko T.O., Gerasimova Yu.E., Rozenberg N.V. Electrophysical model of micro-arc oxidation process. *Russian Physics Journal*, 2020, vol. 62, no. 11, pp. 2137–2144. DOI: [10.1007/s1182-020-01958-z](https://doi.org/10.1007/s1182-020-01958-z).
 14. Mengesha G.A., Chu Jinn P., Lou Bih-Show, Lee Jyh-Wei. Corrosion performance of plasma electrolytic oxidation grown oxide coating on pure aluminum: effect of borax concentration. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 8766–8779. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.06.020](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.020).
 15. Sowa M., Olesinski A., Szumski B., Maciej A., Bik M., Jelen P., Sitarz M., Simka W. Electrochemical characterization of anti-corrosion coatings formed on 6061 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation in the corrosion inhibitor-enriched aqueous solutions. *Electrochimica Acta*, 2022, vol. 424, article number 140652. DOI: [10.1016/j.electacta.2022.140652](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140652).
 16. Polunin A.V., Cheretaeva A.O., Borgardt E.D., Rastegaev I.A., Krishtal M.M., Katsman A.V., Yasnikov I.S. Improvement of oxide layers formed by plasma electrolytic oxidation on cast Al-Si alloy by incorporating TiC nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 423, article number 127603. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2021.127603](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127603).
 17. Moga S.G., Negrea D.A., Ducu C.M., Malinovsky V., Schiopu A.G., Coaca E., Patrascu I. The Influence of Processing Time on Morphology, Structure and Functional Properties of PEO Coatings on AZ63 Magnesium Alloy. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 24, article number 12848. DOI: [10.3390/app122412848](https://doi.org/10.3390/app122412848).
 18. Mortazavi G., Jiang Jiechao, Meletis E.I. Investigation of the plasma electrolytic oxidation mechanism of tita-

- nium. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 488, pp. 370–382. DOI: [10.1016/j.apsusc.2019.05.250](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.250).
19. Egorkin V.S., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyalyiy I.E., Gnedenkov A.S., Chizhikov R.G. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 334, pp. 29–42. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2017.11.025](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.025).
20. Kaseem M., Fatimah S., Nashrah N., Ko Young Gun. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 117, article number 100735. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2020.100735](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735).

Simulation of electrical parameters of a galvanic cell in the process of microarc oxidation

© 2023

Ekaterina A. Pecherskaya¹, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair “Information and Measuring Equipment and Metrology”

Anatoly D. Semenov, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Information and Measuring Equipment and Metrology”

Pavel E. Golubkov*², PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Information and Measuring Equipment and Metrology”

Penza State University, Penza (Russia)

*E-mail: iit@pnzgu.ru,
golpavpnz@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5657-9128>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-3181>

Received 26.06.2023

Accepted 11.12.2023

Abstract: Microarc oxidation is a promising technology for producing wear-resistant anticorrosive coatings for goods made of valve metals and alloys and is used in many industries. One of the main problems of this technology is low controllability caused by the complexity and interconnectedness of physical and chemical phenomena occurring during the coating process. To solve such problems, digital twins are currently actively used. The paper covers the development of mathematical models that are advisable to use as structural elements of the digital twin of the microarc oxidation process. An equivalent electrical circuit of a galvanic cell of microarc oxidation is given, which takes into account the electrolyte resistance, the part coating resistance in the form of a parallel connection of nonlinear active resistance and capacitive reactance. The authors propose a mathematical model describing the behaviour of the equivalent electrical circuit of a galvanic cell of microarc oxidation. A technique for determining the parameters of this model was developed, including the construction of a waveform of changes in the resistance of the cell and its approximation, estimation of the values of resistances and capacitance of the galvanic cell equivalent circuit. The authors proposed a calculation method and developed a Simulink model of the microarc oxidation process, which allows simulating the current and voltage waveforms of a galvanic cell. The analysis of the model showed that the model is stable, controllable and observable, but poorly conditioned, which leads to modelling errors, the maximum value of which is 7 % for voltage and 10 % for current. By the parametric identification method using experimental current and voltage waveforms, the dependences of the parameters of the galvanic cell equivalent circuit on the oxidation time are obtained. It is found that the change in the period average of the galvanic cell active resistance correlates with the coating thickness.

Keywords: microarc oxidation; equivalent electrical circuit; mathematical model; Simulink model; coating resistance and capacitance; model adequacy.

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 1022041100284-5-2.3.1.

The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

For citation: Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Golubkov P.E. Simulation of electrical parameters of a galvanic cell in the process of microarc oxidation. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 4, pp. 73–85. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-4-66-7.