

*Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин,
Г. В. Козлов, Т. О. Зинченко, В. В. Смогунов*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, СИНТЕЗИРУЕМЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

*E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin,
G. V. Kozlov, T. O. Zinchenko, V. V. Smogunov*

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF COATINGS SYNTHESIZED BY MICROARC OXIDATION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Микродуговое оксидирование – перспективный метод получения высокопрочных защитных покрытий, обладающих уникальными свойствами на деталях из легких металлов и сплавов. Однако эффективность данного метода ограничена отсутствием единого формализованного описания взаимосвязей между множеством факторов, влияющих на свойства покрытий, и показателями их качества. Это подтверждает актуальность представленного исследования, цель которого заключается в систематизации технологических параметров, моделировании функциональных зависимостей свойств оксидных покрытий от факторов различной природы. **Материалы и методы.** Рассмотрен метод микродугового оксидирования, который используется для получения износостойких, термостойких, электроизоляционных защитных покрытий на деталях из сплавов алюминия, магния, титана. **Результаты.** Впервые предложена модель взаимосвязи технологических параметров процесса микродугового оксидирования и параметров, характеризующих качество синтезируемых покрытий. Данную модель целесообразно использовать для оптимизации технологических режимов с целью синтеза покрытий с заданными свойствами. **Выводы.** Предложен системный подход к описанию процесса микродугового оксидирования, что позволило посредством разработки графовой модели взаимосвязи параметров, влияющих на свойства покрытий, систематизировать и формализовать установленные закономерности, выявить наиболее важные факторы, подлежащие измерению и контролю в процессе МДО-обработки.

A b s t r a c t. Background. Microarc oxidation is a promising method for producing high-strength protective coatings that have unique properties on parts made of light metals and alloys. However, the effectiveness of this method is limited by the lack of a single formalized description of the relationships between many factors affecting the properties of coatings and their quality indicators. This confirms the relevance of the study, the purpose of which is to systematize technological parameters, to model the functional dependences of the properties of oxide coatings on factors of various nature. **Materials and methods.** The article discusses the method of microarc oxidation, which is used to obtain wear-resistant, heat-resistant, electrical insulating protective coatings on parts made of aluminum, magnesium, and titanium alloys. **Results.** For the first time, a model of the relationship between the technological parameters of the microarc oxidation process and the parameters characterizing the quality of the synthesized

coatings is proposed. It is advisable to use this model for optimizing technological conditions in order to synthesize coatings with desired properties. **Conclusions.** A systematic approach to the description of the microarc oxidation process is proposed, which allows, through the development of a graph model of the relationship of parameters affecting the properties of the coatings, to systematize and formalize the established patterns, to identify the most important factors to be measured and controlled during the MAO processing.

К л ю ч е в ы е с л о в а: микродуговое оксидирование, технологические режимы, свойства, модель в виде ориентированного графа, диаграмма связей.

К e y w o r d s: microarc oxidation, technological modes, properties, oriented graph model, connection diagram.

Введение

Покрyтия, полученные методом микродугового оксидирования (МДО) на деталях из сплавов алюминия, магния или титана, обладают высокими защитными, износостойкими, термостойкими, электроизоляционными свойствами, хорошей адгезией. Ряд современных исследований направлен на изучение процесса МДО, в частности, способы придания покрытиям новых свойств путем добавления в электролит наночастиц, рассмотрены в работе [1]; поиску новых направлений применения МДО-покрытий посвящен труд [2]; методы улучшения их характеристик изложены в работе [3], но самой важной до настоящего времени представляется проблема управляемости процесса МДО [4–7].

Технология микродугового оксидирования до настоящего времени не получила широкого распространения по ряду причин, к которым относится отсутствие как единого формализованного описания имеющих место явлений и эффектов, так и совокупного влияния на свойства покрытий разнородных факторов, что затрудняет поиск оптимальных технологических параметров процесса МДО. Практически не исследовано влияние температуры и выработки электролита (изменение концентрации компонентов от времени обработки) на свойства оксидных покрытий. Следует отметить, что в последнее время стали появляться работы, посвященные изучению данной функциональной зависимости [3]. Так, в работе [8] установлено, что снижение электропроводности электролита приводит к появлению более мощных микроразрядов, что позволяет получить покрытия большей толщины; также получена эмпирическая формула взаимосвязи напряжения пробоя V_{bd} и электропроводности электролита k :

$$V_{bd} = a + b \log\left(\frac{1}{k}\right),$$

где a и b – эмпирические коэффициенты.

Несмотря на многочисленность экспериментальных исследований влияния факторов технологического процесса МДО на свойства оксидных покрытий, в большинстве из них даются лишь практические рекомендации по достижению оптимального режима, которые оказываются неработоспособными при изменении условий технологического процесса (смене электролита, использовании другого материала заготовки, формы и частоты сигнала). Это подтверждает необходимость разработки теоретических моделей, значительно облегчающих поиск оптимального технологического режима получения оксидных покрытий с заданными свойствами, вплоть до его автоматизации.

Диаграмма связей факторов, влияющих на процесс МДО

В данной статье авторами предложен системный подход к описанию процесса МДО, что позволило:

- систематизировать и формализовать установленные закономерности влияния технологических параметров на свойства оксидных покрытий, а также выявить наиболее важные факторы, подлежащие измерению и контролю в процессе МДО-обработки;
- установить взаимосвязи между электрическими параметрами МДО-обработки, физическими явлениями, происходящими при формировании оксидных слоев и свойствами синтезируемых покрытий.

На рис. 1 показана диаграмма связей факторов, влияющих на процесс МДО, со свойствами получаемых покрытий и их параметрами качества. Диаграмма связей позволяет определить основные влияющие факторы для всего процесса МДО, а не только для отдельного свойства покрытия или параметра качества.

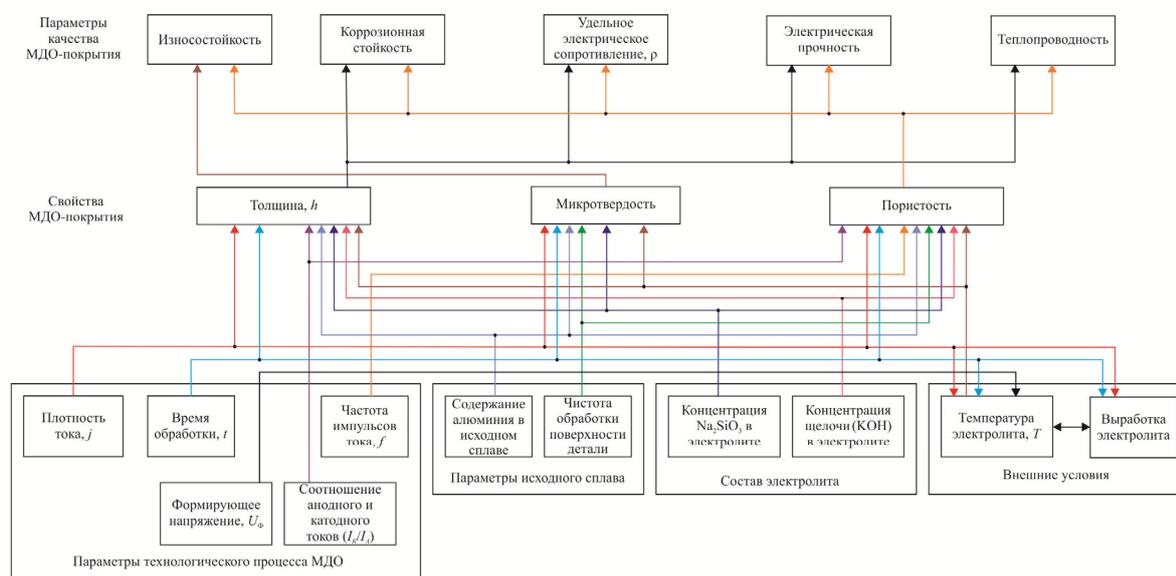


Рис. 1. Диаграмма связей

Анализ диаграммы связей позволил установить, что на все параметры качества влияют только три свойства оксидного покрытия: микротвердость, толщина и пористость, причем микротвердость влияет только на износостойкость. Однако, как следует из диаграмм Исикавы [9], содержание кристаллических модификаций оксида алюминия, которое в основном определяет микротвердость, также влияет на электрическую прочность и коррозионную стойкость.

Все факторы процесса МДО, которые можно разделить на параметры технологического процесса и исходного сплава, состав электролита и внешние условия, оказывают влияние на свойства МДО-покрытий. Основными параметрами технологического процесса МДО являются плотность тока и время обработки, связанные со всеми свойствами покрытий и обеспечивающие внешние условия (нагрев и выработку электролита). Формирующее напряжение (электрическое напряжения на образце с покрытием), которое также является одним из главных факторов процесса МДО, по сути, также определяется значением плотности тока. Частота токовых импульсов влияет только на пористость. Соотношение анодного и катодного токов влияет на толщину и пористость, но эти свойства покрытия определяют все параметры качества изделий с МДО-покрытием.

Влияние состава исходного сплава подчиняется следующей закономерности: чем больше процентное содержание алюминия в материале заготовки, тем более качественное формируется МДО-покрытие. Таким образом, микродуговому оксидированию целесообразно подвергать изделия из технического алюминия марки АД0 (содержание алюминия 99,8 %), АМг3 (содержание алюминия 94,9 %) и дюралюминия Д16 (содержание алюминия 92,8 %) [10]. Данный факт объясняется тем, что в составе алюминиевых сплавов имеются химические элементы, препятствующие образованию оксида алюминия, вследствие чего начальная структура МДО-покрытия имеет множество «слабых» мест, электрический пробой происходит при более низких значениях напряжения, и условия фазового перехода $\gamma-Al_2O_3 - \alpha-Al_2O_3$ реализуются в меньшей степени [11]. Шероховатость поверхности детали влияет на микротвердость и пористость: чем ниже шероховатость, тем микротвердость больше и меньше пористость.

Температура электролита оказывает влияние на все параметры качества МДО-покрытия. Однако она так же, как и выработка электролита, зависит от плотности тока, времени обработки и формирующего напряжения. Помимо этого, температура и выработка электролита являются взаимозависимыми. Это может быть объяснено следующим образом. Выработка электролита представляет собой уменьшение концентрации ионов в нем за счет включения их

в структуру МДО-покрытия. При увеличении плотности тока в микроузоре электролит в большей степени обедняется ионами, его проводимость уменьшается [12], а сопротивление и падение напряжения возрастают, следовательно, увеличивается мощность, рассеиваемая электролитом, что приводит к его нагреву. С другой стороны, при увеличении температуры электролита возрастает скорость химических реакций, больше молекул электролита диссоциирует на ионы, и большее их количество встраивается в покрытие, что еще сильнее повышает температуру электролита. Подобным образом на внешние условия влияет и время МДО-обработки.

Влияние состава электролита также имеет неоднозначный характер. В общем случае, концентрация веществ, образующих электролит, задается один раз перед началом процесса МДО и не меняется в процессе обработки (справедливо для КОН). В то же время концентрация технологического жидкого стекла Na_2SiO_3 , по-видимому, является функцией плотности тока, времени обработки и температуры электролита и обуславливает его выработку, поскольку в покрытие встраиваются именно силикат-ионы [11]. Кроме того, этот параметр может косвенно, через температуру электролита, влиять на все свойства МДО-покрытий.

Формализация процесса микродугового оксидирования

С точки зрения математического описания процесса МДО, параметры качества могут быть представлены в виде функций нескольких переменных, причем технологические параметры процесса являются независимыми переменными, в то время как внешние условия также являются функциями этих переменных. Параметры, отвечающие за состав исходного сплава и шероховатость поверхности, а также концентрацию щелочи (КОН) в электролите, целесообразно представить в виде констант, поскольку они не изменяются в процессе МДО. Таким образом, в первом приближении для эффективного управления процессом МДО необходимо учитывать следующие закономерности:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = F(j, t, U_F), \\ C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = F(j, t, T), \\ HV = F(j, t, T, p_{\text{Al}}, C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}, S), \\ h = F(j, t, T, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}, C_{\text{KOH}}), \\ P = F(j, t, T, f, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}, C_{\text{KOH}}, S), \\ E = F(h, P), \\ CR = F(h, P), \\ TC = F(h, P), \\ WR = F(HV, P), \end{array} \right.$$

где HV – микротвердость; h и P – толщина и пористость МДО-покрытия соответственно; E – электрическая прочность; CR – коррозионная стойкость; TC – теплопроводность; WR – износостойкость; U_F – формирующее напряжение; I_K/I_A – соотношение анодного и катодного токов; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$ – концентрация жидкого стекла в электролите; $C_{\text{KOH}} = \text{const}$ – концентрация щелочи в электролите; $p_{\text{Al}} = \text{const}$ – процентное содержание алюминия в исходном сплаве; $S = \text{const}$ – чистота обработки поверхности детали.

Учитывая то, что T и $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$ являются функциями, получим

$$\left\{ \begin{array}{l} HV = F(j, t, U_F, p_{\text{Al}}, S), \\ h = F(j, t, U_F, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{KOH}}), \\ P = F(j, t, U_F, f, I_K/I_A, p_{\text{Al}}, C_{\text{KOH}}, S), \\ E = F(h, P), \\ CR = F(h, P), \\ TC = F(h, P), \\ WR = F(HV, P). \end{array} \right. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует вывод, что основными параметрами процесса МДО являются плотность тока, время обработки, формирующее напряжение, соотношение анодного и катодного токов и частота токовых импульсов. Все остальные параметры либо зависят от вышеназванных, либо являются константами, определяемыми перед проведением процесса МДО [13–15].

Модель взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидного покрытия на основе теории графов

Совокупность факторов, влияющих на свойства и параметры качества МДО-покрытий, целесообразно представить в виде ориентированного графа (рис. 2). Вершинами обозначены параметры процесса микродугового оксидирования, которые могут выступать в качестве воздействий и реакций на эти воздействия. Обозначения на дугах отображают физические эффекты, соответствующие взаимосвязи параметров – реакций и воздействий. Расшифровка обозначений, принятых на рис. 2, приведена в табл. 1.

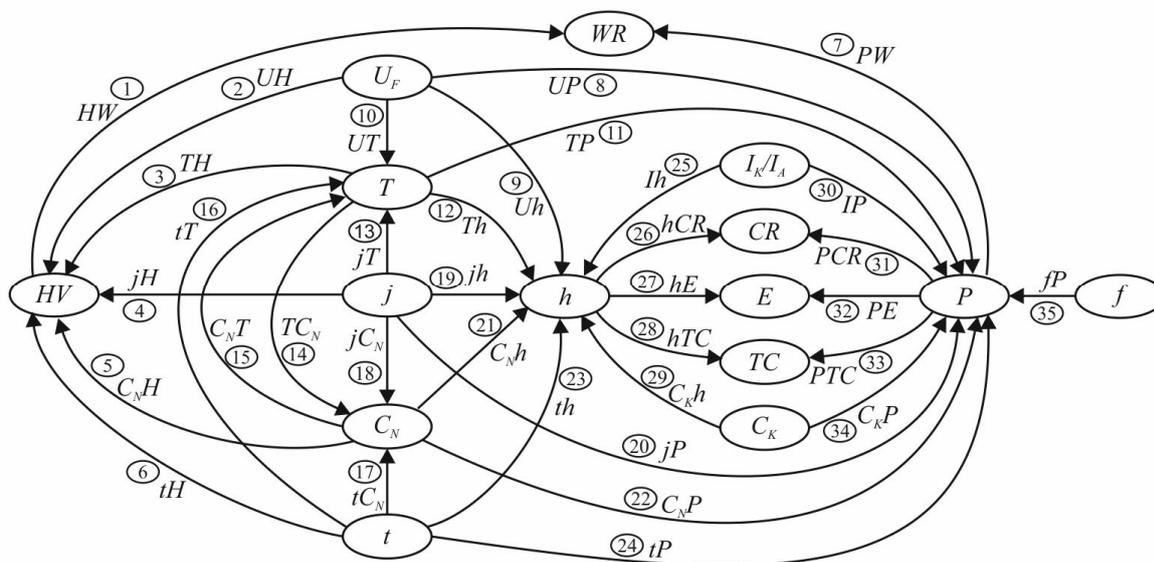


Рис. 2. Модель взаимосвязи параметров процесса микродугового оксидирования и свойств оксидных покрытий в виде ориентированного графа

Таблица 1

Обозначения параметров ориентированного графа

Обозначение	Название параметра	Обозначение	Название параметра
U_F	Формовочное напряжение	f	Частота импульсов тока
T	Температура электролита	C_K	Концентрация щелочи в электролите
I_K/I_A	Соотношение анодного и катодного токов	C_N	Концентрация силиката натрия в электролите
j	Плотность тока	t	Время обработки
h	Толщина оксидного слоя	P	Пористость оксидного слоя
HV	Микротвердость	WR	Износостойкость
CR	Коррозионная стойкость	E	Электрическая прочность
TC	Теплопроводность		

Параметры воздействия: U_F – формовочное напряжение; T – температура электролита; I_K/I_A – соотношение анодного и катодного токов; HV – микротвердость; j – плотность тока; h – толщина оксидного слоя; P – пористость оксидного слоя; C_N – концентрация силиката натрия в электролите; C_K – концентрация щелочи в электролите; f – частота импульсов тока; t – время обработки.

Параметры реакции: h, P, C_N, T, WR – износостойкость, CR – коррозионная стойкость, HV – микротвердость, E – электрическая прочность, TC – теплопроводность.

Описание взаимосвязи параметров на основе теории множеств

Ряд параметров зависит от других факторов и, в свою очередь, влияет на параметры процесса. Эти параметры выступают и в качестве воздействий, и реакций:

$$T, h, P, C_N, HV.$$

Распределение факторов по множествам, в зависимости от их влияния на другие параметры, приведено на рис. 3.

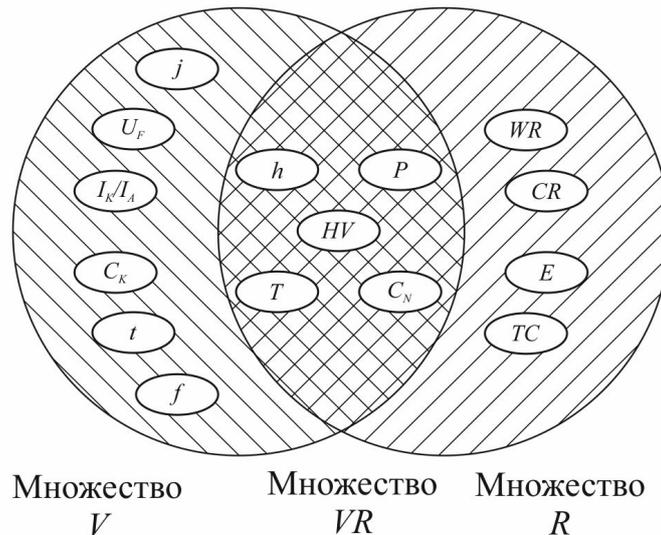


Рис. 3. Диаграмма Венна

На рис. 3 приняты следующие обозначения: множество воздействующих факторов V , факторов-реакций – R . Параметры, которые выступают и воздействиями, и реакциями на другие воздействия, образуют множество VR :

$$VR = V \cap R = \{x | x \in V \wedge x \in R\},$$

где x – элементы множеств. В рассматриваемом случае

$$V = \{U_F, I_K/I_A, j, C_K, f, t, h, P, HV, T, C_N\},$$

$$R = \{WR, CR, E, TC, h, P, HV, T, C_N\},$$

$$VR = \{h, P, HV, T, C_N\}.$$

Множество параметров-воздействий A , которые не являются реакциями:

$$A = \{U_F, I_K/I_A, j, C_K, f, t\}$$

может быть найдено как разность множеств

$$A = V/VR = \{x | x \in V \text{ и } x \notin VR\}.$$

Взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидных покрытий

Взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидных покрытий можно формализовать в виде выражений, характеризующих физический эффект (изменение реакции вследствие воздействия), что сведено в табл. 2.

Таблица 2

Взаимосвязи между параметрами МДО-процесса и свойствами оксидных покрытий

Свойство	Математическое описание	Свойство	Математическое описание
th	$th = \frac{\partial h}{\partial t}$	tT	$tT = \frac{\partial T}{\partial t}$
UH	$UH = \frac{\partial HV}{\partial U_F}$	Uh	$Uh = \frac{\partial h}{\partial U_F}$
TH	$TH = \frac{\partial HV}{\partial T}$	Th	$Th = \frac{\partial h}{\partial T}$
jH	$jH = \frac{\partial HV}{\partial j}$	jT	$jT = \frac{\partial T}{\partial j}$
$C_N H$	$C_N H = \frac{\partial HV}{\partial C_N}$	$C_N T$	$C_N T = \frac{\partial T}{\partial C_N}$
tH	$tH = \frac{\partial HV}{\partial t}$	tP	$tP = \frac{\partial P}{\partial t}$
PW	$PW = \frac{\partial WR}{\partial P}$	HW	$HW = \frac{\partial WR}{\partial HV}$
UP	$UP = \frac{\partial P}{\partial U_F}$	UT	$UT = \frac{\partial T}{\partial U_F}$
TC_N	$TC_N = \frac{\partial C_N}{\partial T}$	TP	$TP = \frac{\partial P}{\partial T}$
tC_N	$tC_N = \frac{\partial C_N}{\partial t}$	jC_N	$jC_N = \frac{\partial C_N}{\partial j}$
jh	$jh = \frac{\partial h}{\partial j}$	jP	$jP = \frac{\partial P}{\partial j}$
$C_N h$	$C_N h = \frac{\partial h}{\partial C_N}$	$C_N P$	$C_N P = \frac{\partial P}{\partial C_N}$
Ih	$Ih = \frac{\partial P}{\partial t}$	IP	$IP = \frac{\partial P}{\partial I}$
hE	$hE = \frac{\partial E}{\partial h}$	PE	$PE = \frac{\partial E}{\partial P}$
$C_K h$	$C_K h = \frac{\partial h}{\partial C_K}$	$C_K P$	$C_K P = \frac{\partial P}{\partial C_K}$
hCR	$hCR = \frac{\partial CR}{\partial h}$	PCR	$PCR = \frac{\partial CR}{\partial P}$
hTC	$hTC = \frac{\partial TC}{\partial h}$	PTC	$PTC = \frac{\partial TC}{\partial P}$

Взаимосвязи параметров МДО-процесса, показанные на ориентированном графе (рис. 2), можно описать аналитически в виде системы уравнений:

$$\begin{cases}
 \partial WR = HW \cdot \partial HV + PW \cdot \partial P, \\
 \partial T = UT \cdot \partial U_F + tT \cdot \partial t + C_N T \cdot \partial C_N + jT \cdot \partial j, \\
 \partial CR = hCR \cdot \partial h + PCR \cdot \partial P, \\
 \partial HV = UH \cdot \partial U_F + TH \cdot \partial T + jH \cdot \partial j + C_N H \cdot \partial C_N + tH \cdot \partial t, \\
 \partial h = Ih \cdot \partial (I_K / I_A) + Uh \cdot \partial U_F + Th \cdot \partial T + jh \cdot \partial j + C_N h \cdot \partial C_N + th \cdot \partial t + C_K h \cdot \partial C_K, \\
 \partial E = hE \cdot \partial h + PE \cdot \partial P, \\
 \partial P = UP \cdot \partial U_F + TP \cdot \partial T + IP \cdot \partial (I_K / I_A) + C_K P \cdot \partial C_K + jP \cdot \partial j + C_N P \cdot \partial C_N + tP \cdot \partial t + fP \cdot \partial f, \\
 \partial C_N = jC_N \cdot \partial j + TC_N \cdot \partial T + tC_N \cdot \partial t, \\
 \partial TC = hTC \cdot \partial h + PTC \cdot \partial P.
 \end{cases} \quad (2)$$

Количество уравнений в системе (2) равно числу элементов множества R параметров-реакций. В левой части каждого уравнения – приращение соответствующего параметра реакции; в правой части – сумма произведений свойств и приращений параметров-воздействий. Все параметры-реакции, за исключением температуры T , характеризуют свойства формируемых покрытий.

Например, согласно первому уравнению системы (2) на износостойкость WR оказывают влияние микротвердость HV и пористость оксидного слоя, на которые, в свою очередь, оказывает влияние совокупность взаимосвязанных факторов: температура T , химический состав электролита, время обработки t , плотность тока j , что описывают соответствующие выражения системы (2).

В технологических процессах синтеза оксидных покрытий, как правило, необходимо стабилизировать следующие технологические параметры: температуру T (обеспечивается за счет термостатирования гальванической ячейки) и химический состав электролита (за счет постоянства концентрации его компонентов C_K и C_N), частоту токовых импульсов f и соотношение анодного и катодного токов (определяется настройкой технологического оборудования). При известной зависимости микротвердости HV от времени обработки t и плотности тока j , уравнение для микротвердости существенно упростится:

$$\partial HV = UH \cdot \partial U_F + jH \cdot \partial j + tH \cdot \partial t, \quad (3)$$

при условии, что $T, C_N, C_K = \text{const}$. Таким образом, микротвердость HV может быть определена косвенно по временным зависимостям напряжения $U_F(t)$ (формовочной кривой) и тока в процессе микродугового оксидирования.

Применяя аналогичные рассуждения ко всем уравнениям системы (2) и полагая, что параметры-воздействия и реакции поддаются измерению в ходе экспериментов, получаем модель взаимосвязи параметров МДО-процесса в виде

$$\begin{cases}
 \partial WR = HW \cdot \partial HV + PW \cdot \partial P, \\
 \partial CR = hCR \cdot \partial h + PCR \cdot \partial P, \\
 \partial HV = UH \cdot \partial U_F + jH \cdot \partial j + tH \cdot \partial t, \\
 \partial h = Uh \cdot \partial U_F + jh \cdot \partial j + th \cdot \partial t, \\
 \partial E = hE \cdot \partial h + PE \cdot \partial P, \\
 \partial P = UP \cdot \partial U_F + jP \cdot \partial j + tP \cdot \partial t, \\
 \partial TC = hTC \cdot \partial h + PTC \cdot \partial P.
 \end{cases} \quad (4)$$

Заключение

Уравнения 3, 4 и 6 системы (4) содержат в правых частях только технологические параметры и не содержат свойства покрытий. По сути, эти уравнения описывают влияние технологических параметров U_F, j, t на микротвердость, толщину и пористость оксидного слоя, следовательно, для косвенного измерения этих величин достаточно провести измерение формовочных кривых и временных зависимостей тока микроплазменного процесса $j(t)$ (или динамических вольтамперных характеристик). Тогда все остальные параметры покрытий: из-

носостойкость WR , коррозионная стойкость CR , теплопроводность TC и электрическая прочность E – могут быть рассчитаны на основании их зависимостей от микротвердости HV и пористости P .

Таким образом, основными параметрами, подлежащими измерению в ходе процесса МДО, являются плотность тока, формовочное напряжение и время обработки.

Библиографический список

1. Impedance monitoring of corrosion degradation of plasma electrolytic oxidation coatings (PEO) on magnesium alloy / L. Gawel, L. Nieuzyła, G. Nawrat, et al. // *J. of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 722. – P. 406–413.
2. Бориков, В. Н. Методы и средства измерений электрических параметров процесса формирования покрытий при импульсном энергетическом воздействии в растворах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Бориков В. Н. – Томск : ТПУ, 2012. – 34 с.
3. Кучмин, И. Б. Изменение физико-химических свойств двухкомпонентного электролита и характеристик покрытия, формируемого методом микродугового оксидирования, в ходе серийного производства / И. Б. Кучмин, Г. Г. Нечаев, Н. Д. Соловьева // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 3 (72). – С. 80–86.
4. Кучмин, И. Б. Плотность тока как определяющий параметр микродугового оксидирования / И. Б. Кучмин, Г. Г. Нечаев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 1 (69). – С. 62–66.
5. Кучмин, И. Б. О характере изменений физико-химических свойств двухкомпонентного силикатно-щелочного электролита для микродугового оксидирования в ходе серийного производства / И. Б. Кучмин, Г. Г. Нечаев, Н. Д. Соловьева // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 4 (73). – С. 57–62.
6. Sarbishei, S. Effects of alumina nanoparticles concentration on microstructure and corrosion behavior of coatings formed on titanium substrate via PEO process / S. Sarbishei, M. A. Faghihi Sani, M. R. Mohammedi // *Ceramics Int.* – 2016. – Vol. 42. – P. 8789–8797.
7. Rehman, Z. Ur. Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ concentration on the microstructure and corrosion properties of two-step PEO coatings formed on AZ91 alloy / Z. Ur. Rehman, B. H. Koo // *Surf. & Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 317. – P. 117–124.
8. Vatan, H. N. Structural, tribological and electrochemical behavior of SiC nanocomposite oxide coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ31 magnesium alloy / H. N. Vatan, R. Ebrahimi-kahrizangi, M. Kasiri-asgarani // *J. of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 683. – P. 241–255.
9. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 363–369.
10. Особенности динамики роста оксидного слоя на сплаве АК9 при микродуговом оксидировании / М. М. Криштал, П. В. Ивашин, А. В. Полунин, А. Е. Пестряков, М. С. Макоткин // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2011. – № 4 (18). – С. 60–63.
11. Чубенко, А. К. Моделирование параметров энергетических потоков при импульсном пропускании электрического тока через границу раздела фаз металл-раствор электролита / А. К. Чубенко, А. И. Мамаев // *Фундаментальные исследования. Химические науки*. – 2013. – № 4. – С. 351–355.
12. Нечаев, Г. Г. Модель микрозарядов в процессе микродугового оксидирования / Г. Г. Нечаев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2013. – № 1 (69). – С. 107–112.
13. Голубков, П. Е. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, А. В. Мартынов // *Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития* : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
14. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2019. – № 2. – С. 99–108.
15. Голубков, П. Е. Методы измерения температуры в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, А. В. Мартынов, Е. А. Печерская // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК – 2018)* : материалы V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 14 марта 2018 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 245–248.

References

1. Gawel L., Nieuzyła L., Nawrat G. et al. *J. of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 722, pp. 406–413.
2. Borikov V. N. *Metody i sredstva izmereniy elektricheskikh parametrov protsessy formirovaniya pokrytiy pri impul'snom energeticheskom vozdeystvii v rastvorakh: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Methods and

- means of measuring the electrical parameters of the coating formation process under pulsed energy action in solutions: author's abstract ... dr. techn. sciences]. Tomsk: TPU, 2012, 34 p. [In Russian]
3. Kuchmin I. B., Nechaev G. G., Solov'eva N. D. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 3 (72), pp. 80–86. [In Russian]
 4. Kuchmin I. B., Nechaev G. G. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 1 (69), pp. 62–66. [In Russian]
 5. Kuchmin I. B., Nechaev G. G., Solov'eva N. D. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 4 (73), pp. 57–62. [In Russian]
 6. Sarbishei S., Faghihi Sani M. A., Mohammadi M. R. *Ceramics Int.* 2016, vol. 42, pp. 8789–8797.
 7. Rehman Z. Ur., Koo B. H. *Surf. & Coat. Technol.* 2017, vol. 317, pp. 117–124.
 8. Vatan H. N., Ebrahimi-kahrizsangi R., Kasiri-asgarani M. *J. of Alloys and Compounds.* 2016, vol. 683, pp. 241–255.
 9. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pecherskiy A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics]. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 363–369. [In Russian]
 10. Krishtal M. M., Ivashin P. V., Polunin A. V., Pestryakov A. E., Makotkin M. S. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of science of Tolyatti State University]. 2011, no. 4 (18), pp. 60–63. [In Russian]
 11. Chubenko A. K., Mamaev A. I. *Fundamental'nye issledovaniya. Khimicheskie nauki* [Fundamental study. Chemical science]. 2013, no. 4, pp. 351–355. [In Russian]
 12. Nechaev G. G. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2013, no. 1 (69), pp. 107–112. [In Russian]
 13. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf.* [Radionics. Problems and prospects : proc. dokl. the third all-Russia youth scientific conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
 14. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Kozlov G. V., Pecherskiy A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2, pp. 99–108. [In Russian]
 15. Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK – 2018): materialy V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (g. Penza, 14 marta 2018 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects (MNPC – 2018) : materials of V all-Russia. inter-University. scientific-practical Conf. (Penza, March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 245–248. [In Russian]

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Голубков Павел Евгеньевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpavpnz@yandex.ru

Golubkov Pavel Evgenevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Карпанин Олег Валентинович

старший преподаватель,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Karpanin Oleg Valentinovich

senior lecturer,
sub-department of nano-and microelectronics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Козлов Геннадий Васильевич

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru.

Kozlov Gennadiy Vasilevich

doctor of technical sciences, professor,
director of Polytechnic Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор-консультант,
кафедра теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vladimir.smogunov@mail.ru

Smogunov Vladimir Vasilievich

doctor of technical sciences, professor-consultant,
sub-department of theoretical and applied mechanics
and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Влияние технологических параметров на свойства покрытий, синтезируемых методом микродугового оксидирования / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, Т. О. Зинченко, В. В. Смогунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 89–99. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-11.