

Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ¹

E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin, G. V. Kozlov, A. V. Pecherskiy

INTELLECTUAL SYSTEM OF CONTROLLED SYNTHESIS OF OXIDE COATINGS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Микродуговое оксидирование (МДО) является перспективным способом получения прочных оксидных покрытий посредством плазмохимической обработки деталей из вентильных металлов и сплавов. До настоящего времени данный процесс имеет ограниченное применение по причине отсутствия системного описания взаимосвязей между технологическими параметрами и свойствами покрытий. Цель работы заключается в разработке интеллектуальной системы, позволяющей как синтезировать покрытия с заданными свойствами, так и исследовать свойства покрытий с целью установления влияния на них разнородных факторов. **Материалы и методы.** МДО представляет собой плазмохимический метод упрочнения образцов из вентильных металлов, обладающих униполярной проводимостью в системе «металл-оксид-электролит», таких как алюминий, магний или титан. Покрытия, синтезируемые данным методом, представляют собой оксидный слой, состоящий из высокотемпературных кристаллических модификаций оксида алюминия. Для получения оксидных покрытий использована гальваническая ячейка – ванна с электролитом, в которую погружены два электрода – анод (деталь из вентильного металла) и катод из нержавеющей стали. При разработке аппаратной части интеллектуальной системы использованы методы теории цепей, методы измерений электрических величин. **Результаты.** Разработана структура интеллектуальной автоматизированной системы, которая позволяет осуществлять управляемый синтез МДО-покрытий с заданными свойствами. Аппаратная часть системы содержит совокупность измерительных каналов, предназначенных для контроля и измерения свойств покрытий во время технологического процесса. Автоматизация достигается за счет разработанного интеллектуального приложения, объединяющего систему информационного наполнения и программного обеспечения. **Выводы.** Преимуществами предлагаемой интеллектуальной системы являются возможность осуществления измерений и контроля параметров оксидных покрытий в технологическом процессе во время нанесения покрытий; автоматизированный выбор технологических режимов. Данная система направлена на решение актуальной проблемы фундаментальной науки – установление взаимосвязей между технологическими параметрами процесса МДО и свойствами МДО-покрытий, способствует повышению управляемости технологии микродугового оксидирования, что способствует повышению качества и конкурентоспособности МДО-покрытий российского производства на мировом рынке.

A b s t r a c t. Background. Microarc oxidation (MAO) is a promising way to obtain durable oxide coatings by means of plasma-chemical processing of parts from valve metals and al-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00425.

loys. To date, this process has limited application due to the lack of a systemic description of the relationship between technological parameters and properties of coatings. The aim of the work is to develop an intelligent system that allows both to synthesize coatings with desired properties and to investigate the properties of coatings in order to establish the influence of heterogeneous factors on them. **Materials and methods.** MAO is a plasma-chemical method of hardening samples of valve metals with unipolar conductivity in the metal-oxide-electrolyte system, such as aluminum, magnesium or titanium. The coatings synthesized by this method are an oxide layer consisting of high-temperature crystalline modifications of alumina. To obtain oxide coatings, a galvanic cell is used – a bath with electrolyte in which two electrodes are immersed – an anode (a part made of a valve metal) and a cathode made of stainless steel. When developing the hardware of an intelligent system, methods of the theory of circuits, methods of measuring electrical quantities were used. **Results.** The structure of an intelligent automated system that allows controlled synthesis of MAO coatings with desired properties has been developed. The hardware part of the system contains a set of measuring channels designed to monitor and measure the properties of coatings during the process. Automation is achieved through a developed intelligent application that combines content management systems and software. **Conclusions.** The advantages of the proposed intelligent system are the ability to measure and control the parameters of oxide coatings in the process during the deposition of coatings; automated selection of technological regimes. This system is aimed at solving the urgent problem of fundamental science – establishing relationships between the technological parameters of the MAO process and the properties of MAO coatings, and contributes to improving the controllability of microarc oxidation technology, which contributes to the quality and competitiveness of MAO coatings produced in Russia on the world market.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интеллектуальная система, микродуговое оксидирование, информационная поддержка, аппаратная часть, измерения параметров.

К e y w o r d s: intelligent system, microarc oxidation, information support, hardware, parameter measurements.

Введение

В настоящее время активно развивается микродуговое оксидирование (МДО) – направление плазмохимической обработки деталей из вентильных металлов и сплавов. Широко известны более 10 основных предприятий в мире, успешно выпускающих изделия с упрочняющими покрытиями, выполненные по данной технологии. Это Keronite в Великобритании, Plasma Technology Ltd. и GERE в Китае, Progress Industrial Systems SA в Швейцарии, ООО «Русский профиль», ЗАО «Манэл», ООО «Сибспарк», АО «НИИ СТТ», ООО «НПП Магнетик-Дон», ООО «НПП Титан» в России и др.

Длительное время учеными предпринималось большое количество попыток автоматизации процесса МДО [1–3], лишь в последнее время появляются работы, в которых для решения данной задачи применяются интеллектуальные алгоритмы, например, нейронные сети [4, 5]. Однако в данных работах не использовалась вся совокупность влияющих факторов и отсутствовала обратная связь между технологическими параметрами и свойствами МДО-покрытия.

В связи с этим авторами предложена интеллектуальная автоматизированная система управляемого синтеза (ИАСУС) МДО-покрытий, предназначенная для установления взаимосвязей между параметрами технологического процесса МДО и свойствами оксидных покрытий и реализующая управляемое получение этих покрытий с требуемыми свойствами на основе разработанных алгоритмов.

Фундаментальные основы процесса МДО

Подробные теоретические сведения о процессе МДО изложены в работах [6, 7], ниже рассмотрены те из них, которые необходимы для понимания принципов функционирования предлагаемой интеллектуальной системы. МДО является закономерным развитием техноло-

гии анодирования и представляет собой плазмохимический метод упрочнения образцов из вентильных металлов, обладающих униполярной проводимостью в системе «металл-оксид-электролит» (МОЭ), таких как алюминий, магний или титан. МДО-покрытия, синтезируемые данным методом, представляют собой оксидный слой, состоящий из высокотемпературных кристаллических модификаций оксида алюминия, в основном корунда. Такое покрытие обладает повышенной микротвердостью (до 25 ГПа), износостойкостью, коррозионной стойкостью, электрической прочностью и жаростойкостью (выдерживает кратковременный тепловой удар до 1500 °С) [8], а также хорошей биосовместимостью [9]. Для получения МДО-покрытий используется гальваническая ячейка – ванна с электролитом, в которую погружены два электрода – анод (деталь из вентильного металла) и катод из нержавеющей стали. Самым популярным электролитом является силикатно-щелочной, состоящий из силиката натрия Na_2SiO_3 и гидроксида калия КОН). К аноду и катоду подключен источник технологического тока (ИТТ).

Покрытие формируется при высоковольтном импульсном воздействии на деталь, причем в положительном (анодном) и отрицательном (катодном) полупериоде происходят разные процессы. В анодном полупериоде наблюдается рост оксидной пленки, в катодном – ее частичное растворение и подготовка поверхности к последующему формированию нового слоя оксида.

Выделяют четыре стадии процесса МДО, четко прослеживающиеся на формовочной кривой (зависимости формовочного напряжения от времени обработки): стадия анодирования, искровых, микродуговых и дуговых разрядов. Стадия анодирования является самой непродолжительной (длится несколько секунд), тогда как общее время МДО-обработки варьируется от 30 мин до 2,5 ч. Стадия дуговых разрядов является нежелательной, поскольку приводит к разрушению покрытия. Основное полезное воздействие приходится на стадию микродуговых разрядов, в которой происходит фазовое превращение аморфных аллотропных модификаций оксида алюминия в высокотемпературные кристаллические.

На свойства МДО-покрытия влияет множество факторов, систематизированных в работах [10, 11]:

- технологические параметры: плотность тока, время обработки, соотношение анодного и катодного токов, частота импульсов ИТТ, формовочное напряжение;
- параметры заготовки: состав исходного сплава, шероховатость поверхности;
- параметры электролита: состав, температура, мутность и выработка.

В ходе серийного производства при длительном использовании одного и того же электролита происходит его выработка – обеднение ионами, которые становятся частью покрытия. В результате этого электролит теряет свои полезные свойства, что приводит к прогарам покрытия и браку изделия. В связи с этим необходим строгий контроль и периодическая корректировка состава электролита в процессе МДО.

При МДО-обработке в электролите также скапливается шлам, образующийся из частиц покрытия, выбитых микроарядами, который при перемешивании придает электролиту нежелательную мутность и затрудняет измерение яркости микроарядов.

Структура интеллектуальной системы

Интеллектуальная автоматизированная система управляемого синтеза МДО-покрытий состоит из трех основных частей: аппаратной части, программного (ПО) и информационного обеспечения (рис. 1).

Аппаратная часть представляет собой совокупность технических средств, необходимых для получения МДО-покрытий, измерения их свойств и параметров технологического процесса в режиме реального времени, а также для обработки результатов экспериментов. В данном случае это установка МДО и компьютер.

Программное обеспечение включает в себя: ПО для управления и настройки аппаратной части, интеллектуальное приложение управляемого синтеза (ИПУС) и ПО для поддержки исследований МДО-процесса (клиентское ПО). ПО для управления и настройки включает в себя программное обеспечение микроконтроллера, осуществляющего подачу сигналов управления установкой МДО и выполнение измерений, и серверное программное обеспечение, отвечающее за настройку системы. Интеллектуальное приложение УС объединяет программные алгоритмы, реализующие методики управляемого синтеза МДО-покрытий, разработанные авторами.

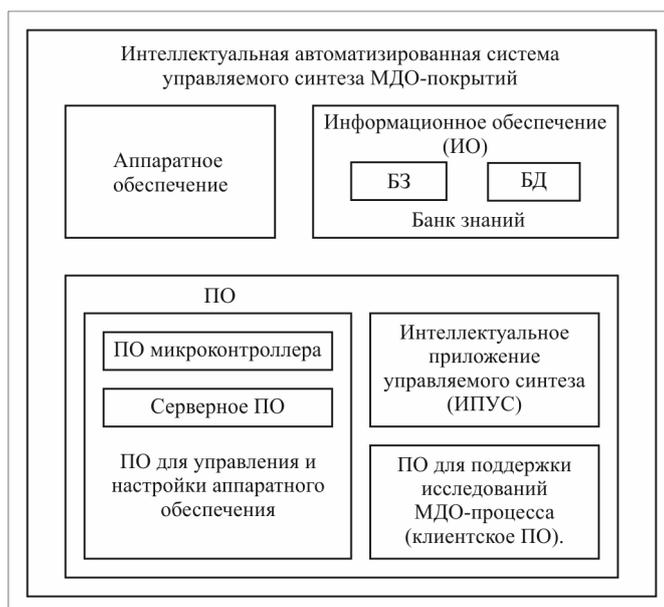


Рис. 1. Структура интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза МДО-покрытий

ПО для поддержки исследований МДО-процесса включает в себя программные средства, реализующие обработку результатов экспериментов, и отображение данных в виде, удобном для восприятия пользователей. В частности, интерфейс программы «Планирование эксперимента» целесообразно представить в виде ориентированного графа, отображающего взаимосвязи «технологический параметр – свойство МДО-покрытия – параметр качества». При этом предусмотрена возможность выбора свойств, которые необходимо контролировать согласно заданным требованиям в процессе МДО. Пример интерфейса в виде графа, включающего окно выбора свойств покрытий, представлен на рис. 2.

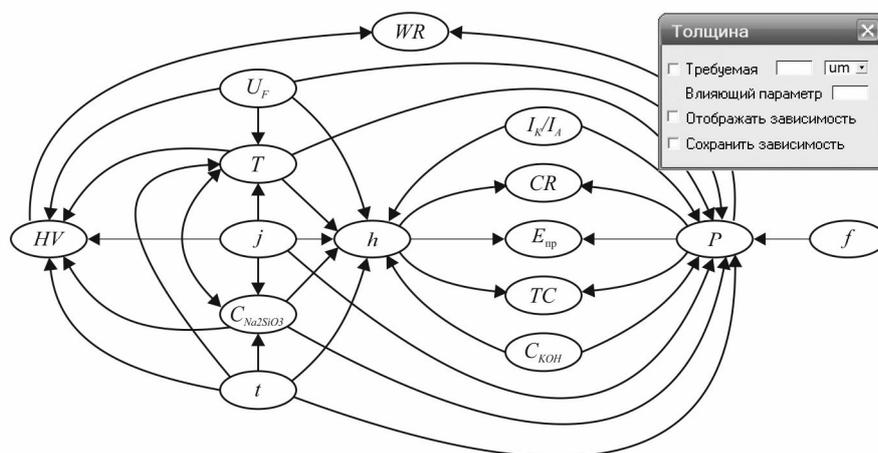


Рис. 2. Пример интерфейса в виде графа, включающего окно выбора свойств покрытий

Информационное обеспечение подразумевает наличие в системе банка знаний (рис. 3), содержащего следующие базы знаний (БЗ) и базы данных (БД):

- БЗ свойств МДО-покрытий;
- БЗ теоретических методов исследования МДО-покрытий (физико-химические закономерности, эквивалентные электрические схемы и т.п.);
- БЗ математических моделей взаимосвязи между технологическими параметрами, свойствами и параметрами качества МДО-покрытий;
- БЗ режимов МДО-процесса;

- БЗ методов измерения технологических параметров и свойств покрытий;
- БД средств измерения и их метрологических характеристик;
- Справочная БЗ о механизме МДО;
- Справочная БЗ «Применение МДО-покрытий» (включает примерные значения свойств МДО-покрытий для различных применений).



Рис. 3. Структура информационной поддержки интеллектуальной системы

Структура аппаратной части интеллектуальной системы

Аппаратная часть интеллектуальной системы МДО-покрытий включает в себя источник технологического тока (ИТТ), измерительную схему (ИС), микропроцессорный модуль (МПМ), гальваническую ячейку (ГЯ), систему охлаждения и перемешивания электролита и блок питания (БП) низковольтных схем (рис. 4).

Источник технологического тока представляет собой высоковольтный (600 В) транзисторный источник тока, построенный по мостовой схеме и работающий по принципу широтно-импульсной модуляции. На его выходе формируется импульсный сигнал технологического тока (воздействие) с переменной полярностью (анодные импульсы, катодные импульсы, анодно-катодные импульсы) и формой (синусоидальная, прямоугольная, треугольная, трапециевидальная), которая прикладывается к образцу в гальванической ячейке.

Измерительная схема представляет собой совокупность измерительных преобразователей, позволяющих в режиме реального времени измерять технологические параметры процесса МДО (ток, напряжение, яркость микроразрядов, температура, мутность и выработка электролита) и свойства растущего МДО-покрытия (толщину) [12–16]. Измерительные преобразователи выполняют двойную функцию: во-первых, с их помощью осуществляется сбор экспериментальных данных, а также пополнение базы знаний; во-вторых, измерительные преобразователи являются элементом обратной связи между источником технологического тока и интеллектуальным приложением. Это позволит установить взаимосвязи параметров технологического процесса и свойств МДО-покрытий и дает возможность осуществить управляемый синтез высококачественных оксидных слоев.

Микропроцессорный модуль предназначен для формирования управляющих сигналов для источника технологического тока и измерительных преобразователей. В микропроцессорный модуль входит микроконтроллер, имеющий в составе аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), 8-канальный мультиплексор и порт UART; цифровой

синтезатор сигналов, преобразователь интерфейсов USB – UART на базе микросхемы FT232RL и узел гальванической развязки. Посредством гальванической развязки USB-порта организована связь с ПК, отвечающая требованиям техники безопасности.

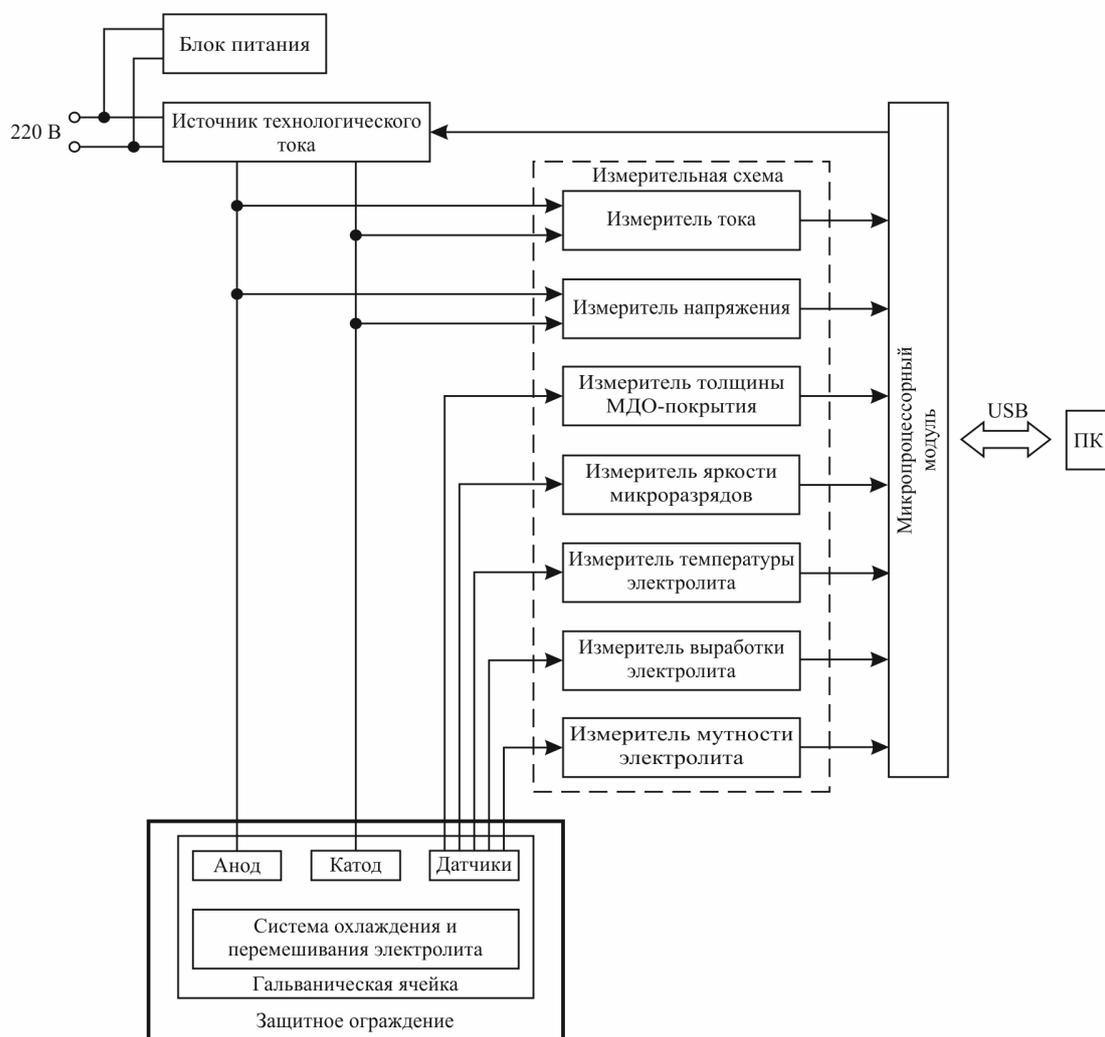


Рис. 4. Структура аппаратной части интеллектуальной системы

ГЯ представляет собой емкость из нержавеющей стали, заполненную электролитом, в который погружены два электрода – анод и катод, а также датчики температуры и выработки электролита и толщины МДО-покрытия. В крышку ГЯ вмонтирован датчик яркости микро-разрядов, представляющий собой ИК фотодиод. Датчик мутности электролита вынесен в отдельную кювету, расположенную на трубе проточной системы охлаждения.

Питание ИАСУС осуществляется от сети 220 В, причем для низковольтной аппаратуры (измерительной схемы, микропроцессорного модуля, вентиляторов и т.п.) выделен отдельный блок питания БП. Также в системе предусмотрено защитное ограждение в виде концевой выключателя, которое срабатывает при открывании ГЯ.

Заключение

Предлагаемая интеллектуальная автоматизированная система управляемого синтеза позволяет решить актуальную и значимую проблему фундаментальной науки, связанную с установлением взаимосвязей между технологическими параметрами процесса МДО и свойствами МДО-покрытий, а также способствует повышению управляемости технологии микродугового оксидирования, что способствует повышению качества и конкурентоспособности МДО-покрытий российского производства на мировом рынке.

Библиографический список

1. *Borikov, V. N.* Virtual measurement system of electric parameters of microplasma processes / V. N. Borikov, P. F. Baranov, A. D. Bezshlyakh // *Proc. SIBCON*. – 2009. – P. 275–279.
2. *Borikov, V. N.* Measurement system for coating quality control during high-current process in electrolyte solution / V. N. Borikov // *Proc. ISMQC*. – 2007. – P. 287–291.
3. *Bolshenko, A. V.* Power Supplies for Microarc Oxidation Devices / A. V. Bolshenko, A. V. Pavlenko, V. S. Puzin, I. N. Panenko // *Life Sci. J.* – 2014. – Vol. 11(1s). – P. 263–268.
4. *Bol'shenko, A. V.* Current Controllers for Devices of Microplasma Oxidation / A. V. Bol'shenko, A. V. Pavlenko, V. P. Grinchenkov, V. S. Puzin // *Russian Electrical Eng.* – 2012. – Vol. 83, № 5. – P. 260–265.
5. *Borikov, V.* Neural method alloys identification by the microplasma oxidation process in the electrolyte solutions / V. Borikov // *Materialwissenschaft und werkstofftechnik – Materialwiss Werkstofftech.* – 2006. – Vol. 37. – P. 915–918. – DOI 10.1002/mawe.200600077.
6. Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей / В. В. Ломакин, Т. В. Зайцева, Н. П. Путивцева, В. М. Яценко, О. П. Пусная // *Научные ведомости. Сер.: Экономика. Информатика*. – 2016. – Вып. 40, № 23 (244). – С. 124–133.
7. *Darband, B.* Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications / B. Darband, M. Aliofkhazraei, P. Hamghalam, N. Valizade // *J. of Magnesium and Alloys*. – 2017. – Vol. 5. – P. 74–132.
8. *Казанцев, И. А.* Коррозионная стойкость композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов, формируемых микродуговым оксидированием / И. А. Казанцев, А. Е. Розен, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2007. – № 3. – С. 138–142.
9. Preparation of high emissivity and low absorbance thermal control coatings on Ti alloys by plasma electrolytic oxidation / Zh. Yao, Q. Shen, A. Niu, B. Hu, Zh. Jiang // *Surf. & Coat. Technol.* – 2014. – Vol. 242. – P. 146–151. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.01.034.
10. *Chung, C. J.* Plasma electrolytic oxidation of titanium and improvement in osseointegration / C. J. Chung // *J. Biomed. Mater. Res. Part B*. – 2013. – Vol. 101. – P. 1023–1030.
11. *Golubkov, P. E.* Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process / P. E. Golubkov, E. A. Pecherskaya, O. V. Karpanin, Y. V. Shepeleva // *IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series*. – 2018. – Vol. 1124. – P. 081014. – DOI 10.1088/1742-6596/1124/8/081014.
12. Automation of the micro – arc oxidation process / P. E. Golubkov, E. A., Pecherskaya, O. V. Karpanin, Y. V. Shepeleva, T. O. Zinchenko, D. V. Artamonov // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2017. – № 917. – P. 092021. – DOI 10.1088/1742-6596/917/9/092021.
13. Автоматизированная исследовательская технологическая установка микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, О. В. Карпанин, Ю. В. Шепелева, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов // *Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия : сб. ст. по материалам IV Междунар. молод. науч. школы-семинара*. – Петрозаводск, 2017. – С. 103–114.
14. *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 : сб. науч. ст. V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой*. – Пенза, 2018. – С. 245–248.
15. *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. III Всерос. молодежной науч. конф.* – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
16. *Голубков, П. Е.* Методы измерения выработки электролита в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская // *Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина*. – Пенза, 2018. – С. 121–124.

References

1. Borikov V. N., Baranov P. F., Bezshlyakh A. D. *Proc. SIBCON*. 2009, pp. 275–279.
2. Borikov V. N. *Proc. ISMQC*. 2007, pp. 287–291.
3. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. *Life Sci. J.* 2014, vol. 11(1s), pp. 263–268.

4. Bol'shenko A. V., Pavlenko A. V., Grinchenkov V. P., Puzin V. S. *Russian Electrical Eng.* 2012, vol. 83, no. 5, pp. 260–265.
5. Borikov V. *Materialwissenschaft und werkstofftechnik – Materialwiss Werkstofftech* [Material science and engineering technology – Materialwiss Werkstofftech]. 2006, vol. 37, pp. 915–918. DOI 10.1002/mawe.200600077.
6. Lomakin V. V., Zaytseva T. V., Putivtseva N. P., Yatsenko V. M., Pusnaya O. P. *Nauchnye vedomosti. Ser.: Ekonomika. Informatika* [Scientific statements. Ser.: Economy. Informatics]. 2016, iss. 40, no. 23 (244), pp. 124–133. [In Russian]
7. Darband B., Aliofkhazraei M., Hamghalam P., Valizade N. *J. of Magnesium and Alloys.* 2017, vol. 5, pp. 74–132.
8. Kazantsev I. A., Rozen A. E., Krivenkov A. O., Chugunov S. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 3, pp. 138–142. [In Russian]
9. Yao Zh., Shen Q., Niu A., Hu B., Jiang Zh. *Surf. & Coat. Technol.* 2014, vol. 242, pp. 146–151. DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.01.034.
10. Chung C. J. *J. Biomed. Mater. Res. Part B.* 2013, vol. 101, pp. 1023–1030.
11. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Y. V. *IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series.* 2018, vol. 1124, pp. 081014. DOI 10.1088/1742-6596/1124/8/081014.
12. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Y. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. *Journal of Physics: Conf. Series.* 2017, no. 917, pp. 092021. DOI 10.1088/1742-6596/917/9/092021.
13. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Yu. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. *Nanostrukturirovannye oksidnye plenki i pokrytiya: sb. st. po materialam IV Mezhdunar. molod. nauch. shkoly-seminara* [Nanostructured oxide films and coatings : collection of articles on the materials of the IV International youth science. school-seminar's]. Petrozavodsk, 2017, pp. 103–114. [In Russian]
14. Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i ob-razovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects : collection of scientific articles V all-Russian interuniversity scientific.-prakt. conf.]. Penza, 2018, pp. 245–248. [In Russian]
15. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. III Vseros. molodezhnoy nauch. konf.* [Radionics. Problems and prospects of development : abstracts of the III all-Russian youth scientific conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
16. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V. M. Shlyandina* [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measuring information : materials of International scientific research.-tech. conf., devoted the 100th anniversary of the birth of V. M. Shlyandina]. Penza, 2018, pp. 121–124. [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)

Печерский Анатолий Владимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационного обеспечения
управления и производства,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ura258@yandex.ru

Pecherskiy Anatoliy Vadimovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information support
of management and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

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 (28). – С. 99–107. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-12.