

УДК 658.5.011; 621.357.77
doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-6

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. А. Максов¹, А. Д. Семенов², Е. А. Печерская³, П. Е. Голубков⁴, Д. В. Артамонов⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ maksov.01@mail.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ golpavpnz@yandex.ru, ⁵ dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы разработки структуры поддержки принятия решения при получении микродуговых оксидных (МДО) покрытий с требуемыми свойствами. В связи с повышенным интересом к использованию оксидных покрытий в различных отраслях промышленности, в том числе медицине и электронике, необходимо создание систем, позволяющих поддерживать и помогать человеку, принимающему решение во время МДО-обработки. Целью работы является применение современных методов, использование которых позволит получать оптимальные технологические режимы и требуемые свойства МДО-покрытий. *Материалы и методы.* Представлен подход к организации системы поддержки принятия решений в процессе получения оксидных покрытий. Новизна подхода заключается в применении современных методов оптимизации, работы с большим количеством данных, а также сложных математических моделей процессов и явлений при МДО-обработке. *Результаты.* Представлена обобщенная структурная схема системы поддержки принятия решений при получении покрытий на изделиях из металлов вентильной группы. Система, состоящая из взаимосвязанных элементов, имеет сложную структуру взаимодействия и влияния на качество и свойства формируемых покрытий. Выявлены факторы, влияющие на технологию получения оксидных покрытий и их свойства. *Вывод.* Анализ полученных результатов в ходе проведенного исследования показал важность дальнейших исследований в области построения структуры поддержки принятия решения при получении микродуговых оксидных покрытий с целью оптимизации технологического процесса и повышения их качества. Полученные результаты можно использовать при разработке цифрового двойника процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, система поддержки принятия решений, структура, база данных, имитационные модели

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования», № 123091800009-1.

Для цитирования: Максов А. А., Семенов А. Д., Печерская Е. А., Голубков П. Е., Артамонов Д. В. Структура системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 47–53. doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-6

STRUCTURE OF A DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE PROCESS OF PRODUCING MICRO-ARC OXIDE COATINGS

A.A. Maksov¹, A.D. Semenov², E.A. Pecherskaya³, P.E. Golubkov⁴, D.V. Artamonov⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹ maksov.01@mail.ru, ² ad-semenov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ golpavpnz@yandex.ru, ⁵ dmitrartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* The issues of developing a decision support structure (DSS) for obtaining micro-arc oxide (MAO) coatings with the required properties are considered. Due to the increased interest in the use of oxide coatings in various industries, including medicine and electronics, it is necessary to create systems that can support and assist the decision maker during MAO processing. The goal of the work is to use modern methods, the use of which will allow obtaining optimal technological conditions and the required properties of MAO coatings. *Materials and methods.* An approach to organizing a decision support system in the process of producing oxide coatings is presented. The novelty of the approach lies in the use of modern optimization methods, working with large amounts of data, as well as complex mathematical models of processes and phenomena during MDO processing. *Results.* A generalized block diagram of a

decision support system for obtaining coatings on products made from valve group metals is presented. The system, consisting of interconnected elements, has a complex structure of interaction and influence on the quality and properties of the formed coatings. Factors influencing the technology for producing oxide coatings and their properties were identified. *Conclusion.* Analysis of the results obtained during the study showed that the importance of further research in the field of constructing DSS in the production of micro-arc oxide coatings in order to optimize the technological process and improve their quality. The results obtained can be used in the development of a digital twin of the microarc oxidation process.

Keywords: microarc oxidizing, decision support system, structure, database, simulation models

Financing: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Fundamentals of the digital twin of the technological process of formation of oxide coatings with specified properties by the method of microarc oxidation", No. 123091800009-1.

For citation: Maksov A.A., Semenov A.D., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Artamonov D.V. Structure of a decision support system in the process of producing micro-arc oxide coatings. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3):47–53. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-3-6

Введение

Создание высокопрочных покрытий, разработка отечественных интеллектуальных установок для получения микродуговых оксидных (МДО) покрытий на металлах вентильной группы (алюминий, титан, магний и др.) при помощи алгоритмов машинного обучения актуальны для многих отраслей промышленности, в том числе приборостроения, машиностроения. В работах [1–3] представлены результаты исследований по созданию цифрового двойника и систем поддержки принятия решений [4] в процессе получения оксидных покрытий с требуемыми свойствами. Получаемые оксидные покрытия благодаря своим повышенным эксплуатационным характеристикам используются в авиационной и космической сферах, машиностроении, нефтегазовой и текстильной промышленности, электронике, медицине и других областях.

Для помощи операторам и инженерам, использующим интеллектуальные установки для получения керамикоподобных покрытий, разрабатываются информационные системы, называемые системами поддержки принятия решений (СППР), с целью принятия оптимальных решений на различных этапах технологического процесса [5].

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой структуры системы поддержки принятия решений, которая позволяет осуществлять контроль процесса получения покрытий на легких металлах, а также находить оптимальные технологические режимы процесса и рассчитывать основные свойства формируемых МДО-покрытий.

Например, в работе [6] автором представлены структурная схема и алгоритм функционирования универсального измерительного канала информационно-управляющей системы для активного контроля технологического процесса получения изделий с гетерогенной структурой.

Анализ литературных источников позволяет заключить, что исследователи в области построения СППР имеют различные точки зрения на структурирование и описание таких информационных систем. Тем не менее ключевыми структурными компонентами для таких систем, безусловно, являются информационно-управляющая система (ИУС) и система управления базами данных (СУБД), при этом имеется возможность использовать дополнительные элементы (модули).

Разработка структуры системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий

Предлагаемая структурная схема системы поддержки принятия решений в процессе получения оксидных покрытий (рис. 1) обобщенно включает следующие элементы: пользователь (оператор, инженер); информационно-управляющая система; система управления базами данных; исследовательская среда пользователя.

Отдельно рассмотрим элементы системы поддержки принятия решений в процессе получения оксидных покрытий, а также их функциональные возможности.

Главную роль в работе данной системы играет пользователь (инженер или оператор, использующий СППР), задача которого состоит в установке посредством пользовательского интерфейса – программного обеспечения – входных параметров системы: технологического тока,

напряжения, состава и концентрации используемого электролита и других параметров, влияющих на МДО-обработку.

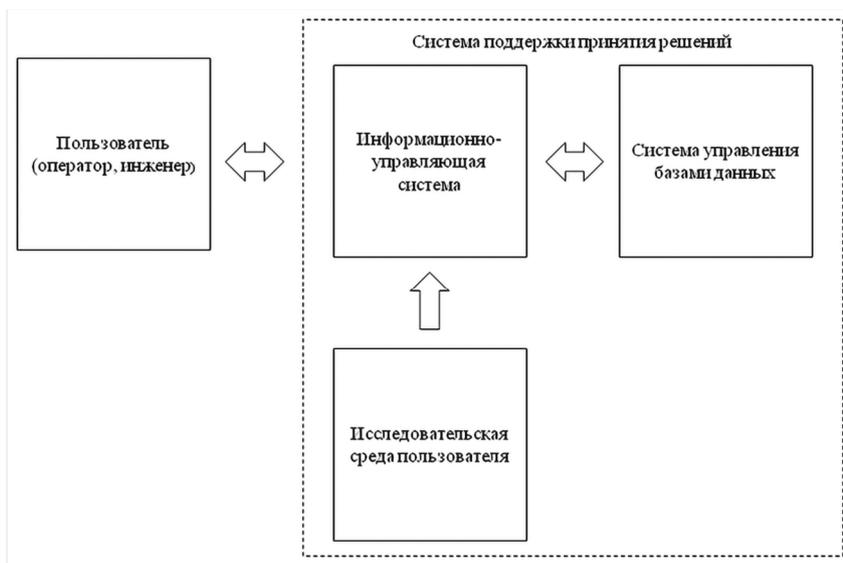


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий

В нашем случае информационно-управляющая система, приведенная на рис. 2, позволяет осуществлять контроль технологического процесса получения высокопрочных покрытий на металлах вентильной группы посредством сбора, анализа и обработки данных, а также применять методы оптимизации технологических параметров процесса с получением необходимых свойств покрытий.

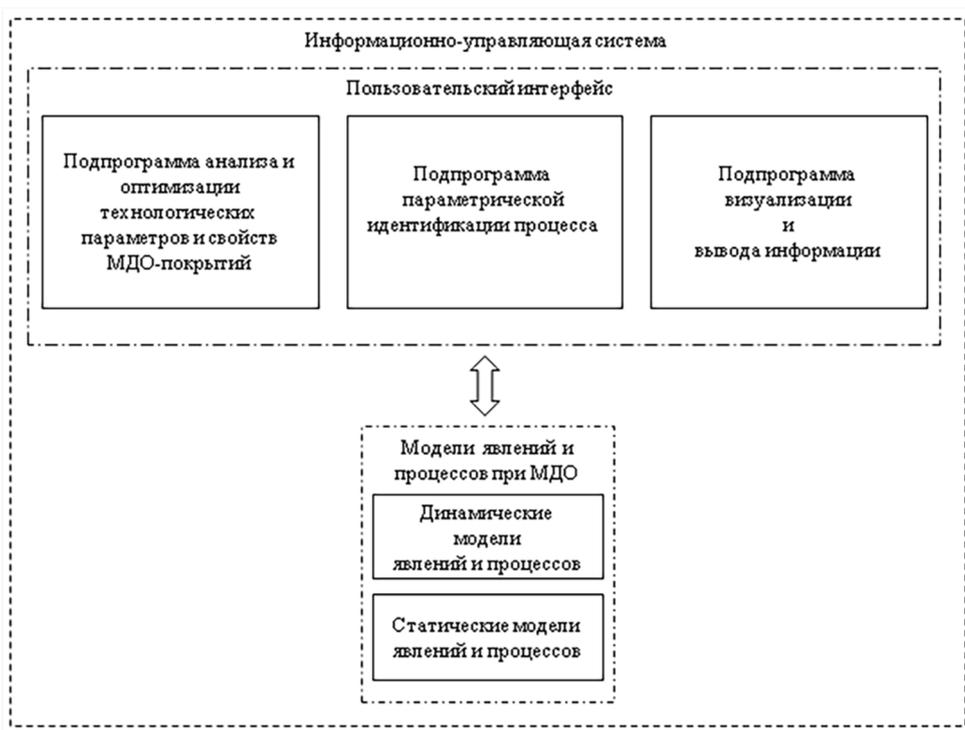


Рис. 2. Структура информационно-управляющей системы СППР

Интерфейс пользователя, как уже было ранее сказано, включает в себя программное обеспечение, содержащее три основные подпрограммы. Подпрограмма анализа и оптимизации технологических параметров и свойств МДО-покрытий помогает пользователю за счет введенных им исходных данных осуществлять выбор оптимальных параметров технологического режима,

которые необходимы для получения свойств покрытий, наиболее близких к заданным. При этом используется информация из баз данных технологических параметров и свойств МДО-покрытий. Подпрограмма параметрической идентификации МДО-процесса служит для определения параметров электрической схемы замещения гальванической ячейки, которые влияют на сопротивление и емкость покрытия. Эти параметры вычисляются на основе экспериментально измеренных вольт-амперных характеристик (ВАХ) гальванической ячейки для выбранного технологического режима с использованием метода параметрической идентификации [8]. С помощью подпрограммы визуализации и вывода информации в целях достижения требуемых характеристик покрытий оператор может выполнять мониторинг изменений вольт-амперных характеристик гальванической ячейки за счет использования параметров, полученных подпрограммой параметрической идентификации. Подпрограмма, выявив отклонения экспериментально измеренных данных от расчетной вольт-амперной характеристики, подает соответствующее управляющее воздействие на источник технологического тока для минимизации этого отклонения. Кроме того, подпрограмма предоставляет информацию о свойствах формируемого покрытия, используемых технологических параметрах, а также позволяет наблюдать динамику изменения напряжения во времени.

Явления, происходящие в процессе роста покрытия, имеют сложный междисциплинарный характер и включают в себя электрохимические, микроплазменные, акустические, электрические и теплофизические явления, которые в совокупности определяют свойства покрытий. В идеальном случае при подборе оптимальных технологических параметров получения покрытий с заданными свойствами необходимо учитывать все эти явления. Для этого в ИУС применяются динамические и статические модели, описываемые сложными математическими выражениями и моделями.

Основу системы управления базами данных, структура которой представлена на рис. 3, составляет совокупность баз данных. Условно, содержимое данной системы можно разбить на три категории баз данных. В первой базе содержится информация о свойствах МДО-покрытий технологических параметрах и факторах, влияющих на процесс МДО [7]. В базе данных, связанной с теоретическими исследованиями, представлена информация о физико-химических закономерностях, которые используются при исследовании и моделировании процесса МДО, а также о существующих на данный момент математических выражениях, описывающих взаимосвязи между технологическими параметрами процесса МДО, свойствами и параметрами качества покрытий. В базу данных результатов экспериментальных исследований занесены сведения о методах и средствах измерения технологических параметров процесса МДО и свойств покрытий, их метрологических характеристиках, а также об используемых технологических режимах. Все базы данных, имеющиеся в системе, имеют возможность дополнения, что позволяет добавлять новые и уточнять существующие математические модели и технологические режимы процесса МДО, корректировать методы измерения, таким образом, совершенствуя работу всей системы.



Рис. 3. Структура система управления базами данных СППР

Исследовательская среда пользователя представляет собой инструментарий для проведения исследований и экспериментов с моделью МДО-процесса. Структура исследовательской среды показана на рис. 4.



Рис. 4. Структура исследовательской среды пользователя СППР

Пользователь в исследовательской среде может воспользоваться следующими видами экспериментов:

- 1) «Что если?» – эксперимент, позволяющий запускать модель процесса МДО и варьировать технологические параметры и значения свойств покрытий;
- 2) оптимизация – эксперимент, который позволяет находить оптимальные технологические режимы и свойства МДО-покрытий на основе максимизации или минимизации целевой функции, учитывая введенные ограничения;
- 3) анализ чувствительности – эксперимент, в ходе которого оценивается влияние одного из параметров модели на результаты моделирования.

Заключение

Предложена структура системы поддержки принятия решений в процессе получения микродуговых оксидных покрытий, включающая синтез информационно-управляющей системы и системы управления базами данных, а также исследовательской среды, в которой оператор системы может проводить эксперименты и исследования над моделью МДО-процесса. Разработанная структура системы поддержки принятия решений предоставляет собой комплексную методологию и инструменты для оценки и выбора оптимальных вариантов получения оксидных покрытий, учитывая конкретные требования и условия процесса. Данная система позволяет значительно повысить эффективность и точность принятия решений в области гальванотехники и обеспечить достижение желаемых результатов в процессе получения микродуговых оксидных покрытий.

Список литературы

1. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Карпанин О. В. [и др.]. Метрологический анализ канала измерения импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4 (38). С. 41–50.
2. Pecherskaya E., Semenov A., Golubkov P. [et al.]. Parametric identification of the mathematical model of the micro-arc oxidation process // Heliyon. 2023. Vol. 9. P. e19995.
3. 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. Vol. 4. P. 73–85.
4. Pecherskaya E., Tsylin B., Yaroslavtseva D. [et al.]. Modern trends in the development of decision support systems based on data mining // CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS. 2021. Vol. 2843.
5. Ломакин В. В., Зайцев Т. В., Путивцева Н. П. [и др.]. Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Экономика. Информатика. 2016. № 23 (244). С. 124–133.
6. Баранов В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 20–29.
7. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Gurin S. A. [et al.]. Influence of process parameters on the properties of microarc oxide coatings // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, № S3.1. P. 368–373.

8. Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В. [и др.]. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24, № 4. С. 363–369.

References

1. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V. et al. Metrological analysis of the channel for measuring the impedance of a galvanic cell in the process of microarc oxidation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):41–50. (In Russ.)
2. Pecherskaya E., Semenov A., Golubkov P. et al. Parametric identification of the mathematical model of the micro-arc oxidation process. *Heliyon.* 2023;9:e19995.
3. 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;4:73–85.
4. Pecherskaya E., Tsylin B., Yaroslavtseva D. et al. Modern trends in the development of decision support systems based on data mining. *CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS.* 2021;2843.
5. Lomakin V.V., Zaytsev T.V., Putivtseva N.P. et al. Implementation of decision support in the management of the microarc oxidation process based on artificial neural networks. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Ekonomika. Informatika = Scientific Bulletin of Belgorod State University. Ser.: Economics. Computer science.* 2016;(23):124–133. (In Russ.)
6. Baranov V.A. Information and control system for active control of technological processes for the production of products with a heterogeneous structure. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):20–29. (In Russ.)
7. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Gurin S.A. et al. Influence of process parameters on the properties of microarc oxide coatings. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 2023;16(S3.1):368–373.
8. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V. et al. Investigation of the influence of technological parameters of the microarc oxidation process on the properties of oxide coatings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = Proceedings of higher educational institutions. Electronics.* 2019; 24(4):363–369. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Анатольевич Максов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: maksov.01@mail.ru

Andrey A. Maksov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анатолий Дмитриевич Семенов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ad-semenov@mail.ru

Anatoliy D. Semenov

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

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Павел Евгеньевич Голубков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-измерительная
техника и метрология,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpavpnz@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

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

Дмитрий Владимирович Артамонов
доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Dmitry V. Artamonov
Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.05.2024

Поступила после рецензирования/Revised 17.06.2024

Принята к публикации/Accepted 08.07.2024