

УДК 621.357.77:519.614

ОЦЕНИВАНИЕ ПОРИСТОСТИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2025 г. Е. А. Печерская^{a,*}, А. А. Максов^a, С. В. Коновалов^{a, b}, П. Е. Голубков^a,
М. А. Митрохин^a, С. А. Гурин^a, М. Д. Новичков^a

^aПензенский государственный университет, Пенза, 400026 Россия

^bСибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007 Россия

*e-mail: pea1@list.ru

Поступила в редакцию 20.05.2024 г.

После доработки 25.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Работа направлена на решение задачи повышения контроля качества покрытий с пористой структурой. Эта проблема возникает вследствие отсутствия эффективного и неразрушающего метода оценки пористости микродуговых оксидных покрытий. Точный контроль пористости необходим для обеспечения надежности и долговечности покрытий, а также для предотвращения их дефектов. Использование методов распознавания оптических изображений позволяет улучшить процесс косвенного измерения пористости покрытий и повысить качество контроля без воздействия на объект. Систематизированы факторы, влияющие на пористость микродугового оксидного покрытия, а также методы ее определения. Предложен метод оценивания пористости оксидных покрытий образцов из алюминиевого сплава марки АД31 на основе распознающей программы, написанной в среде MATLAB R2020a, изображений морфологии поверхностей при использовании современных методов микроскопии. Проведен статистический анализ морфологии поверхности, который подтвердил хорошее соответствие оценки пористости с данными, полученными в процессе обработки изображений с помощью программного обеспечения растрового электронного микроскопа. Относительная погрешность предложенного метода не превышает 10%. Научная новизна работы заключается в разработке алгоритмов уникального метода неразрушающего контроля — распознавания пористых структур на основе оптических данных, способствующих повышению эффективности оценки пористости и улучшению характеристик оксидных покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, оксидные покрытия, пористость, погрешность, оценка, оптические изображения, микроскопия, факторы, цифровой двойник, морфология поверхности.

DOI: 10.31857/S1028096025010123, EDN: AAOXRS

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко применяются в различных отраслях промышленности покрытия, получаемые в процессе микродугового оксидирования и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, такими как микротвердость, износостойкость [1], адгезия к подложке, биосовместимость [2], по сравнению с аналогами. Так, например, перспективно изготовление биокерамических покрытий на базе

титана Ti и циркония Zr для имплантантов, используемых в стоматологии, хирургии и нейрохирургии.

Пористость в основном представляет собой показатель, характеризующий количество (от 5 до 50%) и размер пор (от 0.01 до 10 мкм) в покрытии и является следствием образования пустот в структуре оксида при его формировании на поверхности металла [3]. Чем меньше пор, а также их количество, тем более герметичным и прочным

будет само покрытие. На пористость формируемого покрытия влияет множество разнородных факторов, таких как плотность технологического тока [4], длительность процесса, состав электролита [5], его концентрация и температура [6], мощность микроразрядов [7, 8] и другие факторы [9]. Так, например, включение наночастиц гидроксиапатита в композиционные покрытия позволяет добиться увеличения пористости, толщины формируемого покрытия, а также повышения коррозионной стойкости [10].

Существуют несколько методов, позволяющих исследовать морфологию, а также определять пористость защитных и защитно-декоративных покрытий, наносимых на металлы вентильной группы. Один из таких методов основан на использовании растрового электронного микроскопа (РЭМ). Исследования с использованием РЭМ [11–13] позволили наблюдать структуру покрытий на микроуровне, а также определить размеры и характер пор.

Другим методом исследования морфологии покрытий является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), позволяющая не только выявить особенности структуры поверхности, определить ее пористость, но и изучить химический состав покрытий [14]. Принцип действия РФЭС основан на измерении кинетической энергии ионов, выделяющихся на поверхности образца под действием рентгеновского излучения.

Кроме того, существует метод, суть которого составляет пропускание газа через поры покрытия и измерение его давления. В зависимости от количества и размеров пор газ с разной интенсивностью проникает через защитное оксидное покрытие, о чем можно судить по результату измерения давления. С помощью такого метода можно определить размеры пор, а также распределение их в покрытии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Микродуговые оксидные покрытия были сформированы с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса, структура и принцип работы которого описаны в [15, 16]. Для эксперимента были отобраны несколько образцов в форме прямоугольных пластин размером $20 \times 15 \times 2$ мм из алюминиевого сплава марки АД31, химический состав которого определен ГОСТ 4784-97 [17]. Образцы помещали в гальваническую ванну с электролитом, содержащим 0.5 г/л NaOH и 80 г/л Na_2SiO_3 . Микродуговое оксидирование проводили на синусоидальном токе (плотность тока 11.4 A/dm^2 , амплитуда анод-

ного напряжения $+400$ В, соотношение анодного и катодного токов равно единице) в течение 60, 120, 240, 480 и 960 с соответственно. Затем были проведены морфологические исследования отобранных образцов с использованием РЭМ, а пористость покрытия была оценена в программной среде MATLAB R2020a.

ПРОГРАММА ОЦЕНИВАНИЯ ПОРИСТОСТИ ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛЕ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В работе представлен уникальный метод, позволяющий оценить пористость формируемых оксидных покрытий с помощью программы распознавания оптических изображений, погрешность измерений не превышает 10%.

На рис. 1 приведены результаты морфологических исследований образцов с покрытием, сформированным в процессе микродугового оксидирования. Изображения были получены с использованием РЭМ VEGA 3 TESCAN. Источником электронов в микроскопе является термоэмиссионный вольфрамовый катод, испускающий пучок, энергия которого находится в диапазоне от 200 эВ до 30 кэВ, а его ток непрерывно регулируется электромагнитной линзой и может варьироваться от 1 пА до 2 мкА. При фокусном расстоянии 10 мм поле обзора достигает 7.7 мм, а при расстоянии в 50 мм поле обзора будет максимальным. Увеличение РЭМ непрерывное и находится в диапазоне от $2\times$ до 1000000. Микроскоп работает в нескольких режимах — высокого и низкого вакуума. Максимальный размер получаемого кадра — $16k \times 16k$ пикселей.

Для оценивания пористости сформированного покрытия создана программа в среде MATLAB R2020a. Алгоритм ее работы следующий. На первом этапе с помощью интерфейса пользователя в программу заносится изображение, полученное в результате морфологического исследования образца вентильного металла и находящееся в корневом каталоге компьютера. Затем пользователь выбирает необходимую область изображения для оценивания пористости. Программа распознает заданное изображение, наносит цвета (черный, белый, зеленый), соответствующие некоторым видам пористости, и выводит распознанное изображение в новое окно, а также формирует документ формата xls с численными значениями пористости. Рис. 2 демонстрирует результат работы программы. На рис. 2б темным оттенком показана сквозная пористость, а более светлым оттенком — поверхностная. Интенсивность цвета объектов изображения, соответствующую

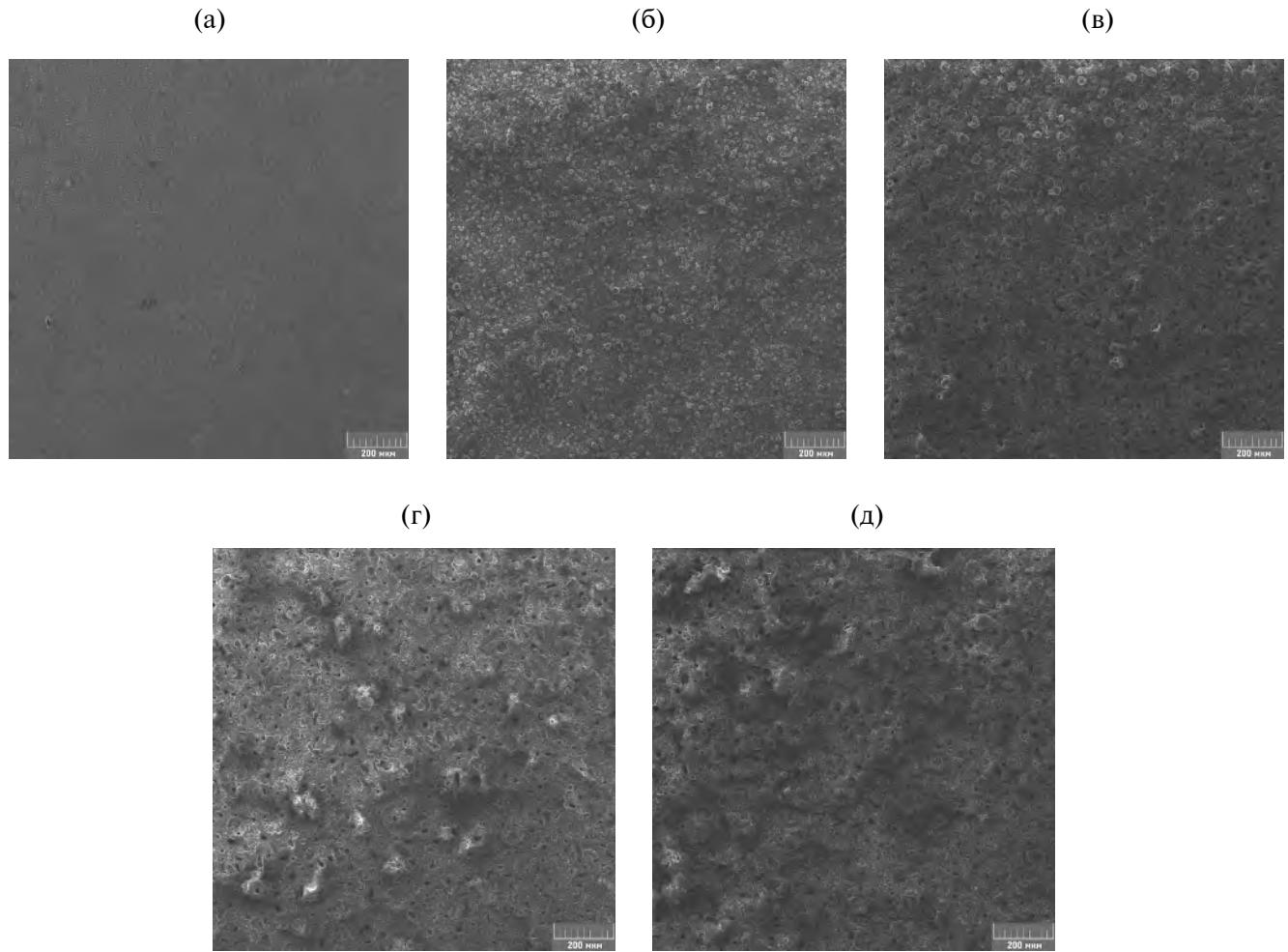


Рис. 1. Результаты морфологических исследований образцов сплава АД31 с оксидным покрытием, длительность процесса: а – 60; б – 120; в – 240; г – 480; д – 960 с.

сквозной пористости и поверхностной, выбирали эмпирически.

Как ранее было отмечено, разработанная программа заносит рассчитанные значения пористости, с которыми в дальнейшем можно работать, в новый документ. Изображения, продемонстрированные на рис. 1, были обработаны этой программой. В табл. 1 приведены значения пористости оксидного покрытия, рассчитанные по представленным оптическим изображениям с использованием программы.

Общую пористость исследуемого микродугового оксидного покрытия металла составляет сумма сквозной $P_{\text{сквозь}}$ и поверхностной $P_{\text{поверх}}$ пористости. Ее можно рассчитать согласно выражению:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{сквозь}} + P_{\text{поверх}}. \quad (1)$$

В результате анализа рассчитанных значений пористости покрытий можно заключить, что

данний метод позволяет достаточно точно оценить по оптическим изображениям пористость сформированного покрытия, которая входит в допустимый диапазон значений от 5 до 50%.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПОРИСТОСТИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Далее представлены результаты статистического анализа оптического изображения пористости покрытия. Суть анализа заключается в сравнении результатов косвенного определения значений пористости, полученных при распознавании одного и то же изображения несколькими способами. В первом способе исходное изображение разделено на 16 сегментов, для каждого сегмента рассчитано соответствующее значение пористости, а затем найдено среднее значение. Во втором

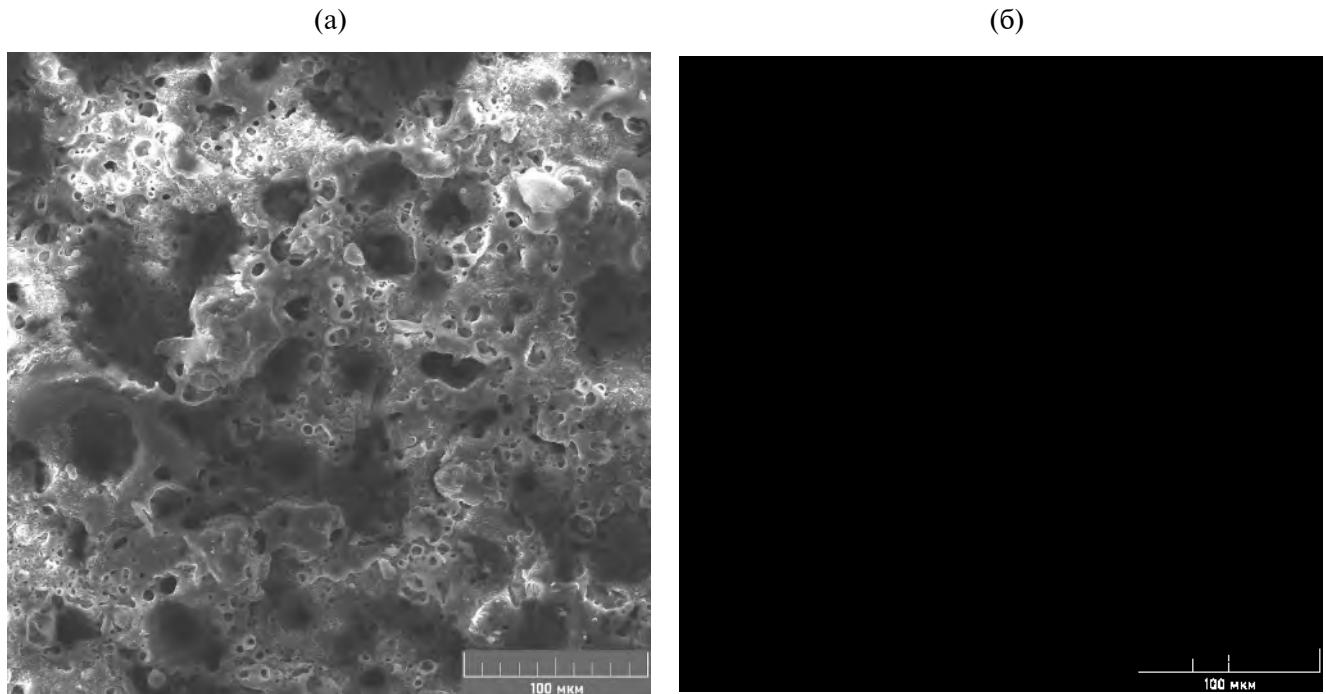


Рис. 2. Оптические изображения микродугового оксидного покрытия: а — исходное; б — построенное программой, после распознавания.

Таблица 1. Значения пористости оксидного покрытия, рассчитанные по представленным оптическим изображениям с использованием программы

Буквенное обозначение изображения	Сквозная пористость, $P_{\text{сквозь}}, \%$	Поверхностная пористость, $P_{\text{поверх}}, \%$	Общая пористость, $P_{\text{общ}}, \%$
А	15.03	19.48	34.51
Б	26.67	23.21	50.88
В	18.33	28.55	46.88
Г	16.64	23.93	40.57
Д	18.71	23.62	42.33

способе пористость рассчитывают для полного оптического изображения исследуемого образца без его разделения на сегменты.

Способ 1. Деление изображения на 16 сегментов

В качестве исходного использовано оптическое изображение (рис. 3а), которое разделяется на 16 сегментов (рис. 3б). По аналогии с табл. 1 была оценена пористость каждого сегмента оптического изображения, продемонстрированного на рис. 3а.

Также рассчитано среднее значение \bar{P} каждого вида пористости 16 сегментов исходного изображения по известной формуле:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (2)$$

где n — количество сегментов исходного изображения, и среднеквадратичное отклонение σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}}. \quad (3)$$

В табл. 2 представлены результаты оценки пористости каждого из 16 сегментов. На рис. 4 представлена диаграмма распределения различных видов пористости по сегментам исходного изображения.

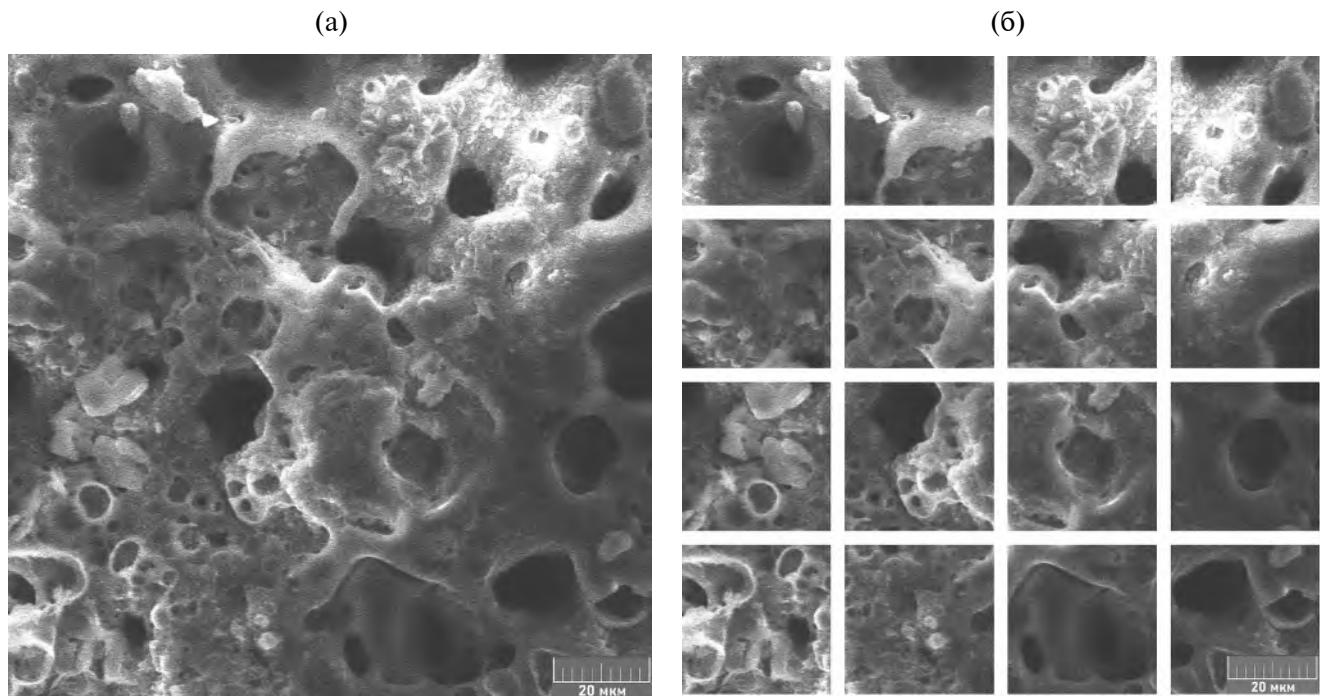


Рис. 3. Оптическое изображение микродугового оксидного покрытия: а — исходное; б — после разделения его на 16 сегментов.

Таблица 2. Значения пористости разделенного на 16 сегментов изображения

№ сегмента	Сквозная пористость, P_{skvoz} , %	Поверхностная пористость, P_{poverh} , %	Общая пористость, P_{obsh} , %
1	35.65	46.28	81.93
2	36.69	35.38	72.07
3	14.32	34.38	48.70
4	14.54	31.57	46.12
5	17.00	54.65	71.64
6	31.54	49.24	80.78
7	26.77	46.05	72.81
8	40.42	35.17	75.59
9	19.67	42.18	61.86
10	28.38	41.28	69.66
11	30.62	41.90	72.51
12	17.41	48.57	65.98
13	16.91	43.37	60.28
14	25.58	51.76	77.34
15	25.27	50.16	75.42
16	22.68	39.42	62.10
\bar{P}	25.22	43.21	68.43
σ	25.04	42.16	66.14

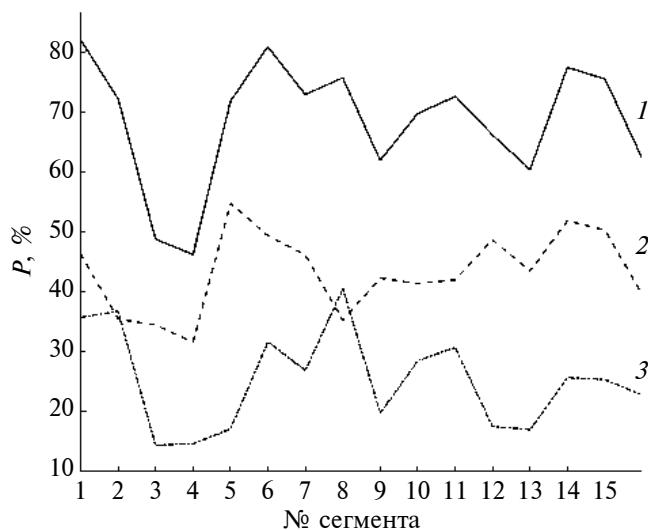


Рис. 4. Диаграмма распределения пористости по сегментам исходного изображения: 1 — общей; 2 — поверхностной; 3 — сквозной.

Способ 2. Оценка пористости по исходному изображению

Пористость покрытия оценена вторым способом, когда исходное изображение не разделяется на сегменты. Результаты расчета пористости занесены в табл. 3. Таким образом, сравнивая два способа косвенного оценивания пористости оксидного покрытия по изображениям с помощью разработанной программы, можно сделать вывод, что оба способа позволяют в определенной мере оценить пористость формируемого покрытия вентильного металла.

Для оценки погрешности предложенного метода косвенного измерения пористости использована известная формула:

$$\delta = \frac{P - P_{p.y.}}{P_{p.y.}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где P — результат косвенного определения пористости предложенным методом; $P_{p.y.}$ — результат оценивания пористости, полученный в ходе обработки изображений с помощью программного обеспечения РЭМ VEGA TESCAN 3, который был принят за истинное значение пористости покрытия. Результаты расчетов показали, что

относительная погрешность оценки пористости не превышает 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод, позволяющий оценить пористость формируемых оксидных покрытий на основе программы распознавания оптических изображений. Преимуществом предложенного метода также является и то, что он не приводит к разрушению оксидного покрытия, поскольку позволяет контролировать его качество без оказания механического воздействия.

Для работы предложенной программы в качестве входных параметров использованы результаты морфологических исследований — изображения сформированного покрытия на образцах. Каждый образец, в частности, представлял прямоугольную пластину алюминиевого сплава марки АД31 толщиной 2 мм, на котором формировалось оксидное покрытие с пористой структурой посредством автоматизированной установки микродугового оксидирования. Алюминиевые пластины помещали в гальваническую ячейку с силикатно-щелочным электролитом и обрабатывали в течение 60, 120, 240, 480 и 960 с соответственно при плотности технологического тока 11.4 А/дм² в анодном режиме. Изображения покрытий образцов оценивали при помощи программы, написанной в программной среде MATLAB R2020a. Исходные изображения маркировали разным цветом, соответствующим сквозной и поверхностной пористости, а их численные значения представляли в табличной форме.

Результаты программного оценивания пористости микродуговых оксидных покрытий хорошо согласуются с данными, полученными в процессе обработки изображений с помощью программного обеспечения РЭМ VEGA TESCAN 3. Относительная погрешность предложенного метода косвенного измерения пористости не превышает 10%.

Полученные результаты могут быть внедрены при разработке интеллектуальной информационно-измерительной системы для измерений параметров оксидных покрытий [18], а также цифрового двойника процесса микродугового оксидирования [19–21].

Таблица 3. Значения сквозной, поверхностной и общей пористостей сформированного покрытия

Изображение	Сквозная пористость, $P_{сквоз.}$, %	Поверхностная пористость, $P_{поверh.}$, %	Общая пористость, $P_{общ.}$, %
Рис. 3а	32.11	37.32	69.44

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 1022041100284-5-2.3.1 “Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования”).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buling A., Zerrer J.* // Surf. Coat. Technol. 2019. V. 369. P. 142.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.025>
2. *Molaei M., Fattah-alhossini A., Nouri M., Nourian A.* // Ceram. Int. 2022. V. 48. Iss. 5. P. 6322.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.175>
3. *Trushkina T.V., Mikheev A.E., Girn A.V., Vakhteev E.V., Orlova D.V.* // Reshetnev Readings. 2011. V. 1. P. 38.
<https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-poristostipokrytiy-na-alyuminievyh-splavah-poluchennyh-mikrodugovym-oksidirovaniem>
4. *Trushkin T.V., Girn A.V., Ravodina D.V., Alyakretsky R.V.* // Reshetnev Readings. 2014. V. 1. P. 443.
<https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanietehnologicheskikh-parametrov-na-poristost-mdopokrytiy>
5. *Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Alexandrov V.S., Artamonov D.V., Maksov A.A.* // St. Petersburg State Polytech. University J. Phys. Math. 2023. V. 16 (3.1). P. 368.
<https://doi.org/10.18721/JPM.163.167>
6. *Fatimah S., Kim Y.G., Yoon D.K., Ko Y.G.* // Surf. Coat. Technol. 2020. V. 385. P. 125383.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125383>
7. *Mortazavi G., Jiang J., Meletis E.I.* // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 488. P. 370.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.250>
8. *Moon S., Jeong Y.* // Corrosion Sci. 2009. V. 51. P. 1506.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.039>
9. *Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Karpanin O.V., Artamonov D.V., Safronov M.I., Pecherskiy A.V.* // Proc. Univ. Electronics. 2019. V. 24 (4). P. 363.
<https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-4-363-369>
10. *Mozafarnia H., Fattah-Alhosseini A., Chaharmahali R., Nouri M., Keshavarz M.K., Kaseem M.* // Coatings. 2022. V. 12. P. 1967.
<https://doi.org/10.3390/coatings12121967>
11. *Hafili F., Chaharmahali R., Babaei K., Fattah-alhosseini A.* // Corrosion Commun. 2021. V. 3. P. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.09.005>
12. *Moga S.G., Negrea D.A., Ducu C.M., Malinovschi V., Schiopu A.G., Coaca E., Patrascu I.* // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 12848.
<https://doi.org/10.3390/app122412848>
13. *Jangde A., Kumar S., Blawert C.* // J. Magn. Alloys. 2020. V. 8. P. 692.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.05.002>
14. *Parfenova L.V., Galimshina Z.R., Gil'fanova G.U. et al.* // Surf. Interfaces. 2022. V. 28. P. 101678.
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101678>
15. *Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Shepeleva Y.V., Zinchenko T.O., Artamonov D.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. P. 092021.
<https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/917/9/092021>
16. *Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Artamonov D.V., Melnikov O.A., Karpanin O.V., Zinchenko T.O.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. Iss. 9. P. 2613.
<https://www.doi.org/10.1109/TPS.2021.3091830>
17. Interstate standard GOST 4784-97 “Aluminum and Aluminum Alloys Deformable. Stamps” (put into effect by Resolution № 433 of the State Standard of the Russian Federation dated December 8, 1998).
<https://base.garant.ru/5703611/>
18. *Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Novichkov M.D., Gurin S.A., Metal'nikov A.M.* // Measur. Tech. 2023. V. 66. № 6. P. 420.
<https://doi.org/10.1007/s11018-023-02243-4>
19. *Pecherskaya E., Semenov A., Golubkov P., Gurin S., Artamonov D., Shepeleva Y.* // Heliyon. 2023. V. 9. № 9. P. e19995.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19995>
20. *Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Golubkov P.E.* // Frontier Mater. Technol. 2023. V. 4. P. 73.
<https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-4-66-7>
21. *Melnikov O.A., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Kozlov G.V., Alexandrov V.S.* // St. Petersburg State Polytech. University J. Phys. Math. 2023. V. 16. № 3.1. P. 335.
<https://doi.org/10.18721/JPM.163.161>

Estimation of Porosity of Microarc Oxide Coating Based on Optical Image Recognition

E. A. Pecherskaya^{1,*}, A. A. Maksov¹, S. V. Konovalov^{1,2}, P. E. Golubkov¹,
M. A. Mitrohin¹, S. A. Gurin¹, M. D. Novichkov¹

¹*Penza State University, Penza, 400026 Russia*

²*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia*

*e-mail: pea1@list.ru

The work is aimed at solving the problem of improving the quality control of coatings with a porous structure. The problem arises due to the lack of an effective and nondestructive method for assessing the porosity of microarc oxide coatings. Accurate porosity control is necessary to ensure the reliability and durability of coatings, as well as to prevent their defects. The use of optical image recognition techniques can improve the process of indirect measurement of coating porosity and improve the quality of control without affecting the object. The factors affecting the porosity of the microarc oxide coating, as well as methods for its determination, are systematized. A method for estimating the porosity of oxide coatings of AD31 aluminum alloy samples is proposed based on a recognition program written in the MATLAB R2020a environment, surface morphology images using modern microscopy methods. A statistical analysis of the surface morphology was carried out, which confirmed good agreement between the porosity estimate and the data obtained during image processing using scanning electron microscope software. The relative error of the proposed method does not exceed 10%. The scientific novelty of the work consists in the development of algorithms for a unique nondestructive testing method — recognition of porous structures based on optical data, which contribute to increasing the efficiency of porosity estimation and improving the characteristics of oxide coatings.

Keywords: microarc oxidation, oxide coatings, porosity, error, estimation, optical images, microscopy, factors, digital twin, surface morphology.