

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА НА ПОГРЕШНОСТЬ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

П. Е. Голубков¹, Е. А. Печерская², Г. В. Козлов³,
В. С. Александров⁴, О. А. Мельников⁵, Т. О. Зинченко⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ golpavpnz@yandex.ru, ² pea1@list.ru, ³ gvkl17@yandex.ru,
⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ oleg-068@mail.ru, ⁶ scar0243@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объект исследования – метод косвенного измерения толщины и пористости покрытия, получаемого микродуговым оксидированием, на основе измерения импеданса. Предмет исследования – подтверждение возможности косвенного измерения толщины и пористости покрытия путем измерения импеданса. Цель исследования – получение аналитических выражений для косвенного измерения толщины и пористости покрытий и их экспериментальная проверка; исследование влияния частоты измерительного сигнала на погрешности измерения этих величин. *Материалы и методы.* Оксидные покрытия получали на образцах из технического алюминия марки АД31Т1 размером 23 × 15 × 1,5 мм. Микродуговое оксидирование проводили в электролите, содержащем 0,5 г/л NaOH и 80 г/л Na₂SiO₃, в анодно-катодном режиме с соотношением анодного и катодного токов, равным 1 при плотности тока 11 А/дм². Время обработки варьировалось от 60 до 600 с. Импеданс покрытия измеряли в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц с погрешностью ±0,5 % (по сопротивлению и по емкости) с помощью программно-аппаратного комплекса, разработанного авторами. Толщину покрытия измеряли с помощью высокоточного микрометра Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic. *Результаты.* Установлена аналитическая зависимость толщины и пористости покрытия от модуля импеданса и частоты измерительного сигнала. Показано, что аргумент импеданса не зависит от параметров покрытия. Полученная зависимость адекватно описывает экспериментальные данные в диапазоне частот от 500 Гц до 10 кГц, при этом относительная погрешность косвенного измерения толщины по импедансу покрытия минимальна на частоте 10 кГц и составляет ±5 %. *Выводы.* Предложенная модель имеет ограничения, связанные с трудностью одновременного измерения толщины и пористости покрытия. Для устранения этого недостатка требуется дополнительная измерительная информация или включение полученных выражений в состав системы уравнений. Тем не менее предложенная теоретическая модель может использоваться для измерения одного из параметров (толщины или пористости покрытия), если известен другой параметр или его функциональная зависимость от параметров процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, косвенное измерение толщины и пористости покрытия, модуль импеданса покрытия, влияние частоты измерительного сигнала, погрешность измерения

Для цитирования: Голубков П. Е., Печерская Е. А., Козлов Г. В., Александров В. С., Мельников О. А., Зинченко Т. О. Исследование влияния частоты измерительного сигнала на погрешность косвенного измерения свойств оксидных покрытий // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 64–72. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-8

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE MEASURING SIGNAL FREQUENCY ON THE INDIRECT MEASUREMENT ERROR OF OXIDE COATINGS PROPERTIES

P.E. Golubkov¹, E.A. Pecherskaya², G.V. Kozlov³,
V.S. Alexandrov⁴, O.A. Melnikov⁵, T.O. Zinchenko⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia
¹ golpavpnz@yandex.ru, ² pea1@list.ru, ³ gvkl17@yandex.ru,
⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ oleg-068@mail.ru, ⁶ scar0243@gmail.com

Abstract. *Background.* The object of the study is the method of indirect measurement of the thickness and porosity of a coating obtained by microarc oxidation based on impedance measurement. The subject of the study is the confirmation of the possibility of indirect measurement of the coating thickness and porosity by measuring the impedance. The purpose of the study is to obtain analytical expressions for indirect measurement of the thickness and porosity of coatings and their experimental verification; to study the influence of the measuring signal frequency on the measurement errors of these quantities. *Materials and methods.* Oxide coatings were obtained on samples of technical aluminum grade AD31T1 with a size of $23 \times 15 \times 1.5$ mm. Microarc oxidation was carried out in an electrolyte containing 0.5 g/l NaOH and 80 g/l Na_2SiO_3 in the anode-cathode mode with a ratio of anode and cathode currents equal to 1 at a current density of 11 A/dm². The processing time was varied from 60 to 600 s. The impedance of the coating was measured in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz with an error of ± 0.5 % (in resistance and capacitance) using the software – hardware complex developed by the authors. The thickness of the coating was measured using a high-precision Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic micrometer. *Results.* The analytical dependence of the thickness and porosity of the coating on the impedance modulus and the measuring signal frequency is established. It is shown that the impedance argument does not depend on the coating parameters. The obtained dependence adequately describes experimental data in the frequency range from 500 Hz to 10 kHz, while the relative error of indirect measurement of the thickness by the coating impedance is minimal at a frequency of 10 kHz and is ± 5 %. *Conclusions.* The proposed model has limitations related to the difficulty of simultaneously measuring the thickness and porosity of the coating. To eliminate this disadvantage, additional measurement information is required or the inclusion of the obtained expressions in the system of equations. Nevertheless, the proposed theoretical model can be used for measuring one of the parameters (thickness or porosity of the coating) if another parameter or its functional dependence on the parameters of the microarc oxidation process is known.

Keywords: micro-arc oxidation, indirect measurement of coating thickness and porosity, coating impedance modulus, influence of measuring signal frequency, measurement error

For citation: Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Kozlov G.V., Alexandrov V.S., Melnikov O.A., Zinchenko T.O. Study of the influence of the measuring signal frequency on the indirect measurement error of oxide coatings properties. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):64–72. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-8

Введение

Микродуговое оксидирование (МДО) – процесс формирования покрытий на металлах и сплавах вентильной группы (алюминия, магния, титана и др.) в электролитной плазме – вызывает большой интерес ученых со всего мира благодаря высоким эксплуатационным характеристикам формируемых покрытий (износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и др.), значительно превосходящим аналогичные параметры существующих аналогов, в том числе покрытий, полученных твердым анодированием [1]. МДО-покрытия могут найти применение во многих отраслях промышленности, особенно в тех ее сферах, где изделия испытывают экстремальные нагрузки и работают в жестких условиях эксплуатации. Кроме того, специальные свойства покрытий открывают новые возможности их применения в медицине, дозиметрии, электронике и робототехнике [2–5].

Одним из основных параметров, определяющих качество покрытий, является толщина, однако ее измерение в случае МДО-процесса связано с некоторыми трудностями. Во-первых, во многих отечественных и зарубежных работах характеристики покрытий, в том числе толщина, исследуются на готовых образцах, что приводит к возникновению погрешностей, обусловленных влиянием многих факторов на свойства покрытий в процессе их формирования. Во-вторых, существующие установки МДО [6, 7], несмотря на возможность косвенного измерения толщины покрытия в режиме реального времени (во время нанесения покрытий), несовершенны с метрологической точки зрения (погрешность измерения толщины составляет ± 10 %). Все это свидетельствует о необходимости разработки новых методов и методик косвенных измерений параметров оксидных покрытий, позволяющих повысить их точность, а также нового оборудования МДО, реализующего данные методики. Данная статья посвящена получению и экспериментальной проверке расчетных формул, обеспечивающих косвенное измерение толщины и пористости путем измерения импеданса покрытия, а также исследованию влияния частоты измерительного сигнала на погрешности измерения этих величин.

Постановка задачи

Получим выражения для расчета толщины и пористости покрытия. Сопротивление R и емкость покрытия C имеют классический вид:

$$R = \frac{\rho h}{S}; \quad C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h}, \quad (1)$$

где ρ , ε – удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость оксида алюминия, ε_0 – диэлектрическая постоянная, S – площадь большей грани тонкого прямоугольного образца, h – толщина покрытия.

Рассчитаем модуль $|\bar{Z}|$ и аргумент импеданса φ исследуемого образца по параллельной схеме замещения:

$$|\bar{Z}| = \frac{\rho h}{S} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \rho^2}}; \quad (2)$$

$$\varphi = \arctg(-\omega \varepsilon \varepsilon_0 \rho), \quad (3)$$

где ω – циклическая частота. Видно, что модуль и аргумент импеданса зависят от частоты измерительного сигнала. Выражения (2) и (3) получены для сплошного образца и не учитывают пористость покрытия, из-за чего расчетная толщина будет меньше наблюдаемой. Этот недостаток устраняется, если учесть пористость в выражениях (1):

$$R_{por} = \frac{\rho h}{S} \cdot \frac{1}{P} = \frac{R}{P}, \quad (4)$$

$$C_{por} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h} \cdot P = C \cdot P, \quad (5)$$

$$|\bar{Z}_{por}| = \frac{h}{SP} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{1 + \omega^2 \varepsilon^2 \varepsilon_0^2 \rho^2}} = \frac{h}{P} \cdot \frac{1}{S} \cdot A(\omega), \quad (6)$$

где R_{por} , C_{por} , $|\bar{Z}_{por}|$ – сопротивление, емкость и модуль импеданса образца с пористым покрытием; P – объемная пористость покрытия. Видно, что модуль импеданса линейно зависит от отношения толщины и пористости, причем функция $A(\omega)$ постоянна для каждой частоты. Аргумент импеданса φ не зависит от толщины и пористости и определяется выражением (3).

Выразив из (6) отношение толщины и пористости, получим

$$\frac{h}{P} = \frac{|\bar{Z}_{por}| \cdot S}{A(\omega)}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет косвенно измерить толщину и пористость покрытия, однако выделить эти параметры по отдельности не представляется возможным. С другой стороны, подобные эмпирические формулы успешно использовались в работе [8] для определения толщины и пористости МДО-покрытия по сопротивлению и емкости границы раздела фаз покрытие – электролит.

Таким образом, задача настоящего исследования – проверить работоспособность выражения (7), а также исследовать зависимость толщины и пористости покрытия от частоты измерительного сигнала и определить погрешность косвенного измерения толщины МДО-покрытий.

Материалы и методика

МДО-покрытия получали на образцах из технического алюминия марки АД31Т1 размером $23 \times 15 \times 1,5$ мм. В качестве токоподвода использовались отрезки алюминиевой проволоки в полиолефиновой изоляции. МДО-обработку проводили в электролите, содержащем 0,5 г/л

NaOH и 80 г/л Na_2SiO_3 , в анодно-катодном режиме с соотношением анодного и катодного токов $I_K/I_A = 1$ при плотности тока $j = 11 \text{ А/дм}^2$. Время МДО обработки t изменялось согласно табл. 1.

Таблица 1

Параметры обработки и характеристики МДО-покрытий

Образец	Время обработки t , с	Толщина покрытия h , мкм	Пористость покрытия P , %
S_1	60	6	7,53
S_2	240	23	18,05
S_3	600	43	26,55

Импеданс покрытия измерялся в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц с погрешностью $\pm 0,5\%$ [9] (по сопротивлению и по емкости) с помощью разработанного авторами [10] программно-аппаратного комплекса МДО (рис. 1,а). В состав прибора входит: источник технологического тока, измерительный модуль, микропроцессорный модуль, гальваническая ячейка с защитным ограждением и блок питания. Измерительный модуль включает в себя каналы измерения следующих величин: ток и напряжение в гальванической ячейке; температура, мутность и проводимость электролита; импеданс покрытия.

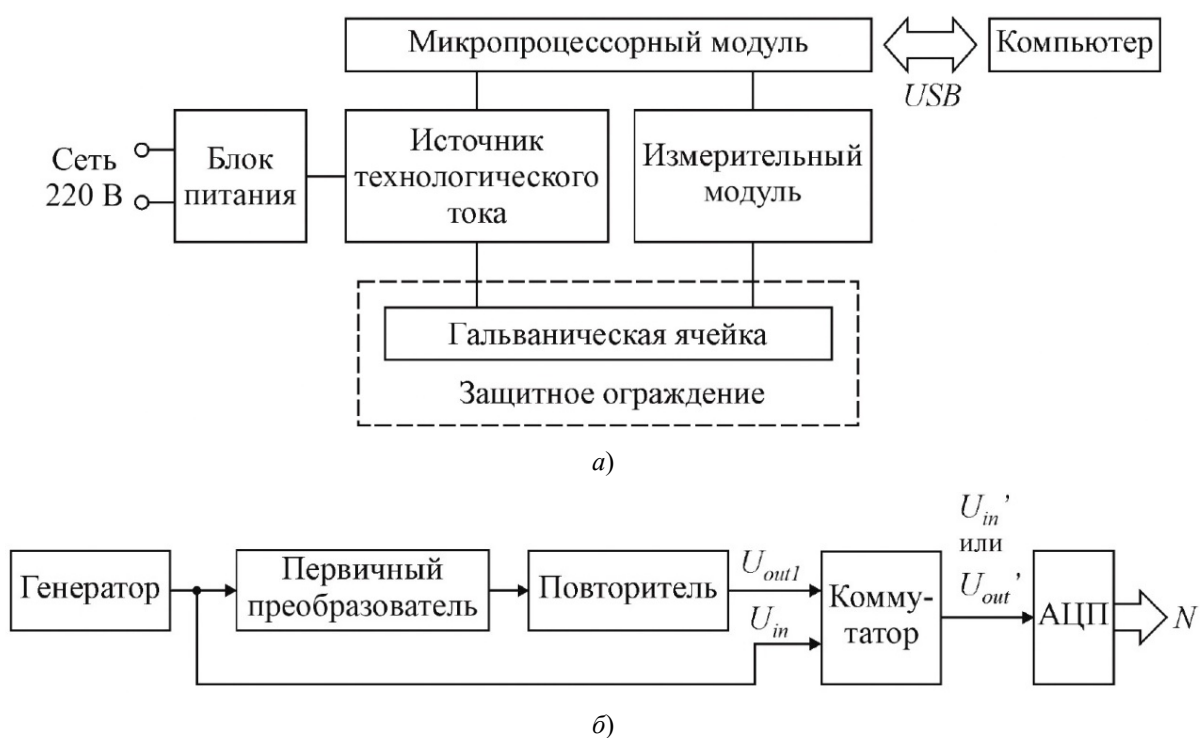


Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса МДО (а); структура измерительного канала импеданса МДО-покрытий (б)

Структура измерительного канала импеданса МДО-покрытия показана на рис. 1,б. Измерительный канал состоит из генератора, первичного преобразователя, повторителя, коммутатора и АЦП. Первичным преобразователем является конденсаторный делитель напряжения, в верхнее плечо которого подключается исследуемый образец (гальваническая ячейка), а в нижнее плечо – RC -цепь, выполняющая функции образцовой меры импеданса. Повторитель служит для снижения погрешности согласования первичного преобразователя с коммутатором. На вход АЦП с помощью коммутатора попеременно поступают сигналы входного и выходного напряжения первичного преобразователя, которые далее через USB -интерфейс передаются на компьютер, на котором с помощью программного обеспечения рассчитывается импеданс.

Толщину покрытия на готовых образцах измеряли высокоточным микрометром *Mitutoyo ABSOLUTE Digimatic*.

Результаты

Экспериментальные зависимости сопротивления и емкости покрытия от частоты измерительного сигнала показаны на рис. 2. На графиках видно, что при увеличении времени обработки сопротивление покрытия возрастает, а емкость падает: это связано с ростом толщины покрытия. Частотная зависимость электрических параметров покрытия обусловлена тем, что импеданс МДО-покрытия имеет не только активную, но и емкостную составляющие.

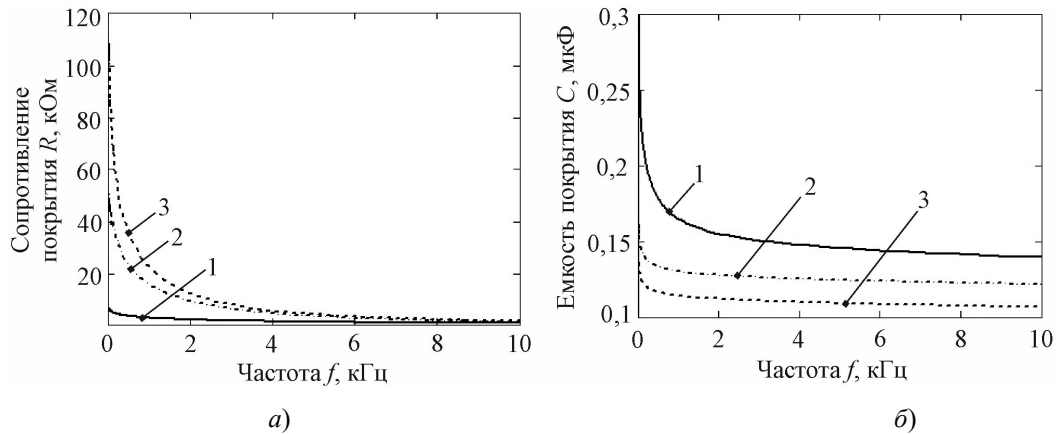


Рис. 2. Зависимости сопротивления (а) и емкости покрытия (б) от частоты измерительного сигнала для времени МДО-обработки: 1 – 60 с (образец S_1); 2 – 240 с (образец S_2); 3 – 600 с (образец S_3)

На основе полученных данных о сопротивлении и емкости построены графики частотных зависимостей модуля импеданса покрытия для образцов S_1 – S_3 (рис. 3), на которых точками показаны экспериментальные зависимости, а сплошными линиями – кривые, построенные по выражению (6). Видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом в диапазоне частот от 500 Гц до 10 кГц.

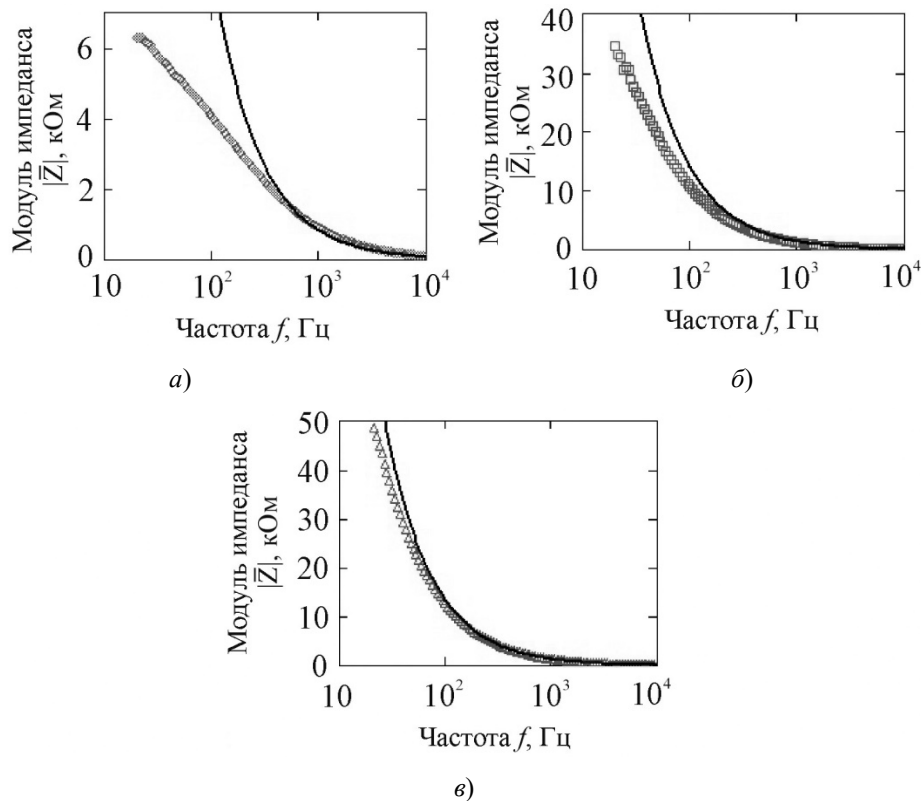


Рис. 3. Частотная зависимость модуля импеданса МДО-покрытия: а – образец S_1 ; б – образец S_2 ; в – образец S_3

Согласно выражению (7), при известной пористости (см. табл. 1) толщина покрытия h_T является линейной функцией модуля импеданса при фиксированной частоте:

$$h_T = |\bar{Z}_{por}| \cdot \frac{SP}{A(\omega)}. \quad (8)$$

На рис. 4 показаны зависимости толщины от модуля импеданса для четырех частот из выбранного ранее диапазона измерения. Видно, что линейные функции, рассчитанные по формуле (8) (штриховые линии), адекватно описывают экспериментальные данные (показаны точками). Таким образом, можно заключить, что выражение (7) является работоспособным.

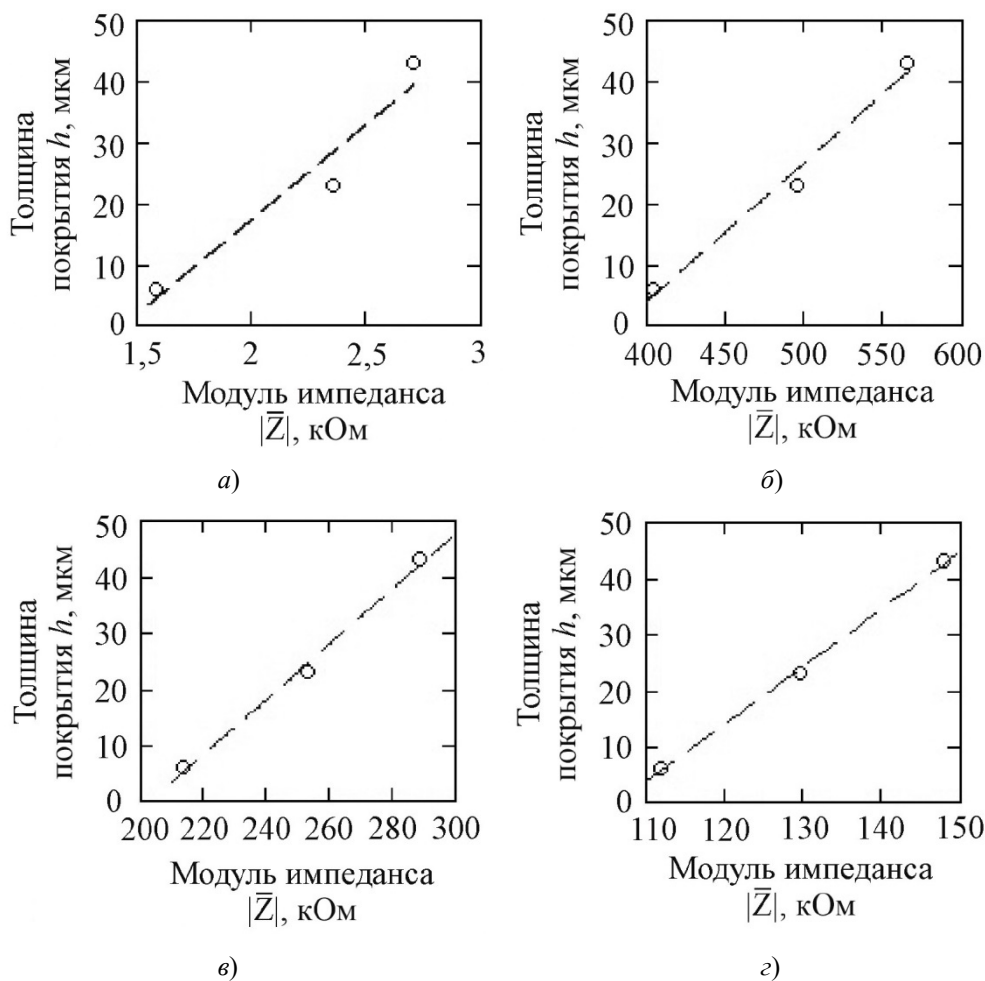


Рис. 4. Зависимости толщины покрытия от модуля импеданса для разных частот: а – 500 Гц; б – 2,5 кГц; в – 5 кГц; з – 10 кГц

На основе полученных данных рассчитана относительная погрешность δh косвенного измерения толщины покрытий в зависимости от частоты измерительного сигнала, как показано в табл. 2. Видно, что на частоте 10 кГц погрешность δh не превышает 5 %, что говорит о целесообразности использования этой частоты для косвенного измерения толщины покрытий.

Таблица 2

Относительная погрешность косвенного измерения толщины покрытий

Частота f , кГц	Погрешность измерения толщины δh , %
0,5	28,06
2,5	19,19
5	13,12
10	4,59

График зависимости погрешности измерения толщины покрытий от частоты измерительного сигнала показан на рис. 5. Данная зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$\delta h(f) = \exp(k_1 f + k_2), \quad (9)$$

где k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты. Возможность такой аппроксимации является полезной с точки зрения обеспечения автоматизированного управляемого синтеза МДО-покрытий.

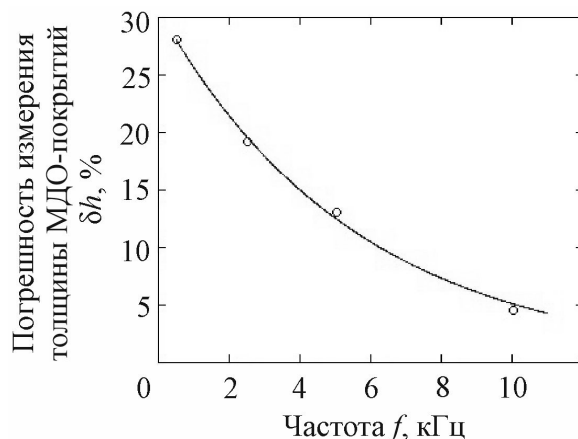


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности косвенного измерения толщины МДО-покрытий от частоты измерительного сигнала

Заключение

Полученное выражение (7) может быть использовано для косвенного измерения толщины и пористости МДО-покрытий, однако следует учитывать некоторые ограничения:

- диапазон частот измерительного сигнала от 500 Гц до 10 кГц;
- измерение толщины покрытия как отдельной физической величины (независимо от пористости) возможно только при наличии системы уравнений, в состав которой входит выражение (7). В противном случае для применения данной формулы требуется дополнительная измерительная информация.

Непосредственно формулу (7) можно использовать в следующих случаях:

- если по измеренным значениям толщины / пористости покрытия требуется определить пористость / толщину;
- известны регрессионные уравнения зависимости толщины / пористости покрытия от параметров-воздействий процесса МДО и необходимо получить аналогичные зависимости для пористости / толщины.

В результате исследования показано, что относительная погрешность измерения толщины покрытий, полученная с использованием результатов расчета по выражению (7), на частоте 10 кГц составляет ± 5 %, что ниже, чем в существующих измерительных установках МДО (± 10 %). Это свидетельствует о целесообразности использования полученных аналитических выражений для измерения толщины и пористости МДО-покрытий.

Список литературы

1. Haghghat-Shishavan B., Azari-Khosrowshahi R., Haghghat-Shishavan S. [et al.]. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption // Applied Surface Science. 2019. Vol. 481. P. 108–119. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.069
2. Xia Q., Zhang D., Li D. [et al.]. Preparation of the plasma electrolytic oxidation coating on Mg-Li alloy and its thermal control performance // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 369. P. 252–256. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.073
3. Zolotarjovs A., Smits K., Laganovska K. [et al.]. Thermostimulated luminescence of plasma electrolytic oxidation coatings on 6082 aluminium surface // Radiation Measurements. 2019. Vol. 124. P. 29–34. doi: 10.1016/j.radmeas.2019.02.020

4. Santos J. S., Rodrigues A., Simon A. P. [et al.]. One-Step Synthesis of Antibacterial Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum // *Advanced Engineering Materials*. 2019. Vol. 21. P. 1900119. doi: 10.1002/adem.201900119
5. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys // *Surface & Coatings Technology*. 2019. Vol. 369. P. 142–155. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
6. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices // *Life Science Journal*. 2014. Vol. 11. P. 263–268.
7. Фаткуллин А. Р., Парфенов Е. В. Автоматизация технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2016. Т. 20, № 4. С. 38–44.
8. Мамаев А. И., Мамаева В. А., Бориков В. Н., Дорофеева Т. И. Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского университета, 2010. 360 с.
9. 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. С. 41–50. doi: 10.21685/2307-5538-2021-4-5
10. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method // *FRUCT 2020: Proc. of Conference of Open Innovations Association*. 2020. № 26. P. 91–101. doi: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087360
11. Artamonov D. V., Golubkov P. E., Pecherskaya E. A. [et al.]. Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. P. 081014.
12. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мартынов А. В. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования // *Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития* : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. Тамбов, 2018. С. 111–113.

References

1. Haghghat-Shishavan B., Azari-Khosrowshahi R., Haghghat-Shishavan S. [et al.]. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption. *Applied Surface Science*. 2019;481:108–119. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.069
2. Xia Q., Zhang D., Li D. [et al.]. Preparation of the plasma electrolytic oxidation coating on Mg-Li alloy and its thermal control performance. *Surface and Coatings Technology*. 2019;369:252–256. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.073
3. Zolotarjovs A., Smits K., Laganovska K. [et al.]. Thermo-stimulated luminescence of plasma electrolytic oxidation coatings on 6082 aluminium surface. *Radiation Measurements*. 2019;124:29–34. doi: 10.1016/j.radmeas.2019.02.020
4. Santos J.S., Rodrigues A., Simon A.P. [et al.]. One-Step Synthesis of Antibacterial Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21:1900119. doi: 10.1002/adem.201900119
5. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys. *Surface & Coatings Technology*. 2019;369:142–155. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.04.025
6. Bolshenko A.V., Pavlenko A.V., Puzin V.S., Panenko I.N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices. *Life Science Journal*. 2014;11:263–268.
7. Fatkullin A.R., Parfenov E.V. Automation of the technological process of plasma-electrolytic oxidation based on indirect control of the coating thickness by electrical characteristics. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2016;20(4):38–44. (In Russ.)
8. Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Borikov V.N., Dorofeeva T.I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskih neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie = Formation of nanostructured non-metallic inorganic coatings by localization of high-energy flows at the interface of phases : a textbook*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 2010:360. (In Russ.)
9. 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.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-4-5
10. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method. *FRUCT 2020*:

Proc. of Conference of Open Innovations Association. 2020;(26):91–101. doi: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087360

11. Artamonov D.V., Golubkov P.E., Pecherskaya E.A. [et al.]. Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process. *Journal of Physics: Conference Series.* 2018:081014.
12. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Martynov A.V. Application of quality control tools for the analysis of the microarc oxidation process. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vse-ros. molodezhnoy nauch. konf. = Radioelectronics. Problems and prospects of development : abstracts of the third All-Russian conference. youth scientific conference.* Tambov, 2018:111–113. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Евгеньевич Голубков

инженер кафедры информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpavpnz@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

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

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Геннадий Васильевич Козлов

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

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor, director of the polytechnic institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

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

Vladimir S. Alexandrov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Андреевич Мельников

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

Oleg A. Melnikov

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

Тимур Олегович Зинченко

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

Timur O. Zinchenko

Postgraduate student, 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 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021