

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-27-33>

УДК 620.197:669:621.794

Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королёв¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾, А. С. Будницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Существующие процессы получения черных износостойких покрытий включают химические методы, анодное окисление с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое окисление (МДО). Большой интерес для формирования светопоглощающих покрытий вызывает метод МДО, характеризующийся как надежный и экологически безопасный процесс, обеспечивающий формирование твердого керамикоподобного оксидного слоя с высокой коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к основе. Поэтому разработка методов получения качественных черных МДО-покрытий, обладающих высокими оптическими и механическими характеристиками, является в настоящее время актуальной задачей. В статье приведены результаты исследования структуры и свойств черных керамических покрытий на алюминиевом сплаве АМг₂, полученных методом микродугового окисления с применением силикатно-щелочного и силикатно-фосфатного электролитов, содержащих в качестве окрашивающих компонентов ферроцианид калия и вольфрамат натрия. В качестве дополнительных элементов, обеспечивающих окрашивание покрытий, в электролиты добавляли вольфрамвоокислый натрий и ферроцианид калия концентрацией от 0,5 до 2,0 г/л. Установлено, что наиболее насыщенные черные покрытия в силикатно-щелочном электролите формируются при добавлении 1,5–2,0 г/л вольфрамата натрия, а в силикатно-фосфатном электролите при добавлении 1,5 г/л ферроцианида калия. Применение электролита, содержащего вольфрамат натрия, позволяет сформировать покрытия с меньшей высотой микронеровностей ($R_a = 0,97\text{--}1,11$ мкм) по сравнению с покрытиями, полученными в электролите, содержащем ферроцианид калия (R_a до 4,20 мкм). Максимальная износостойкость полученных покрытий (скорость износа $(0,38\text{--}0,59) \cdot 10^{-4}$ мм³/(м·Н)) достигается при обработке в исследованных электролитах продолжительностью 10 мин. При этом толщина покрытий составляет 21–31 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки не оказывает существенного влияния на скорость износа.

Ключевые слова: микродуговое окисление, износостойкость, шероховатость, морфология, электролит

Для цитирования: Структура и свойства черных керамических МДО-покрытий на алюминиевых сплавах / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 1. С. 27–33. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-27-33>

Structure and Properties of Black Ceramic MAO Coatings on Aluminum Alloys

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The existing processes for obtaining black wear-resistant coatings include chemical methods, anodic oxidation followed by painting in aniline dyes, electrochemical deposition, vacuum plasma treatment, microarc oxidation (MAO). Of great interest for the formation of light-absorbing coatings is the MAO method, which is characterized as a reliable and environmentally friendly process, which provides the formation of a hard ceramic-like oxide layer with high corrosion resistance

Адрес для переписки

Будницкий Алексей Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

Address for correspondence

Budnitskiy Alexey S.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

and good adhesion to the substrate. Therefore, the development of methods for obtaining high-quality black MAO coatings with both high optical and mechanical characteristics is currently an urgent task. The paper presents the results of a study of the structure and properties of black ceramic coatings on aluminum alloy AMg₂ obtained by microarc oxidation using silicate-alkaline and silicate-phosphate electrolytes containing potassium ferrocyanide and sodium tungstate as coloring components. Sodium tungsten acid and potassium ferrocyanide with a concentration of 0.5 to 2.0 g/l were added to the electrolytes as additional components that ensured the coloring of the coatings. It has been established that the most saturated black coatings in a silicate-alkaline electrolyte are formed with the addition of 1.5–2.0 g/l of sodium tungstate, and in a silicate-phosphate electrolyte with the addition of 1.5 g/l of potassium ferrocyanide. The use of an electrolyte containing sodium tungstate makes it possible to form coatings with a lower microroughness height (Ra 0.97–1.11 μm) compared to coatings obtained in an electrolyte containing potassium ferrocyanide (Ra up to 4.20 μm). The maximum wear resistance of the resulting coatings (wear rate $(0.38–0.59) \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{m}\cdot\text{N})$) is achieved by treatment in the studied electrolytes with a duration of 10 min. In this case, the thickness of the coatings is 21–31 μm. A further increase in the duration of processing does not have a significant effect on the wear rate.

Keywords: microarc oxidation, wear resistance, roughness, morphology, electrolyte

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Budnitskiy A. S. (2023) Structure and Properties of Black Ceramic MAO Coatings on Aluminum Alloys. *Science and Technique*. 22 (1), 27–33. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-27-33> (in Russian)

Введение

В современной промышленности широко используются процессы модифицирования поверхности алюминиевых сплавов, что позволяет значительно повысить их эксплуатационные характеристики и расширить область применения. В дополнение к высокой удельной прочности, хорошей тепло- и электропроводности [1–3] модифицирование алюминия позволяет существенно улучшить такие характеристики, как износостойкость, твердость, коррозионная стойкость, трибологические, изоляционные и оптические свойства.

Одной из задач современной промышленности является разработка процессов формирования черных износостойких покрытий, обеспечивающих поглощение света. Такие покрытия применяются в оптических приборах, электронно-оптических системах, микроэлектронике, устройствах оптической обработки информации, при изготовлении приемников излучения и преобразователей, в вакуумной технике, в преобразователях солнечной энергии, тепловых излучателях. Например, для устранения боковых помех оптико-электронных приборов видимого диапазона в оптическом приборостроении используются специальные светозащитные бленды, на внутреннюю поверхность которых наносятся черные покрытия, обеспечивающие снижение яркости рассеянного света до значения меньше яркости фоновых помех [1].

Существующие процессы получения черных износостойких покрытий включают химические методы, анодное оксидирование с последующим окрашиванием в анилиновых красителях, электрохимическое осаждение, вакуумно-плазменную обработку, микродуговое оксидирование (МДО). Большой интерес для формирования черных по-

крытий представляет метод МДО, характеризующийся как надежный и экологически безопасный процесс [4–6], обеспечивающий формирование твердого керамикоподобного оксидного слоя с высокой коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к основе.

Структура и свойства формируемых МДО-покрытий определяются как электрическими параметрами (плотностью тока [7–9], напряжением [10, 11], коэффициентом заполнения [12] и частотой [13]), так и составом электролитов [14–17], обеспечивающим в зоне обработки необходимую электрохимическую реакцию для получения покрытия в соответствии с его функциональным назначением. Недостатки метода МДО при получении черных покрытий – низкие оптические характеристики и сложность формирования качественных покрытий на внутренних поверхностях длинномерных изделий [8, 9]. Поэтому разработка методов получения качественных черных МДО-покрытий, обладающих высокими оптическими и механическими характеристиками, является в настоящее время актуальной задачей.

Цель исследований авторов – изучение процессов формирования черных керамических покрытий методом МДО с установлением влияния составов электролитов, содержащих в качестве окрашивающих компонентов ферроцианид калия и вольфрамат натрия, и режимов обработки на структуру и свойства покрытий (износостойкость, морфологию, шероховатость, толщину). Полученные результаты позволили установить наиболее эффективные режимы, обеспечивающие формирование качественных покрытий с высокой износостойкостью при относительно небольшой продолжительности обработки.

Оборудование и методы

Для нанесения черных керамических покрытий использовали плоские образцы из алюминиевого сплава АМг2 размерами 25×25×1,2 мм. При обработке образцов применяли электролиты двух составов. Основа – гидроксид натрия, натрий фосфорнокислый и силикат натрия. В качестве дополнительных компонентов, обеспечивающих окрашивание покрытий, в электролиты добавляли вольфрамвокислый натрий и ферроцианид калия концентрацией от 0,5 до 2,0 г/л. Составы применяемых электролитов приведены в табл. 1. Температура электролитов при обработке образцов поддерживалась в диапазоне 20–25 °С.

Таблица 1

Составы применяемых электролитов
Compositions of the used electrolytes

Электролит	Состав электролита
Силикатно-щелочной с вольфраматом натрия (SAT)	2 г/л NaOH + 10 г/л Na ₂ SiO ₃ + 0,5–2,0 г/л Na ₂ WO ₄
Силикатно-фосфатный с ферроцианидом калия (SPF)	10 г/л Na ₂ HPO ₄ + 10 г/л Na ₂ SiO ₃ + (0,5 – 2,0) г/л K ₄ [Fe(CN) ₆]

Обработку образцов выполняли в биполярном режиме МДО с амплитудой положительного +(450–500) В и отрицательного –(70–100) В напряжений. Частота импульсов при обработке составляла 200–1000 Гц (рис. 1).

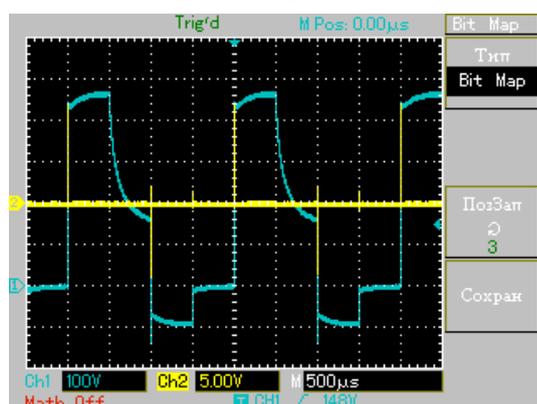


Рис. 1. Пример осциллограммы напряжения и тока при микродуговом окислении исследуемых образцов при частоте 500 Гц

Fig. 1. Example of voltage and current oscillogram during microarc oxidation of test samples at a frequency of 500 Hz

Измерение толщины покрытий выполняли на их поперечных шлифах покрытий с помощью металлографического микроскопа Altamі MET 1. Шероховатость поверхности образцов измеряли профилометром MarSurf PS1.

Микрофотографии поверхности образцов получали с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU.

Исследование износостойкости покрытий выполняли на трибометре FT3 по схеме с вращающимся индентором. В качестве индентора использовали шар из нитрида кремния диаметром 6 мм. Индентор неподвижно закрепляли в торце полого стержня, а перпендикулярно стержню в специальном держателе устанавливали образец. При испытании движение совершал индентор, передавая заданную нагрузку образцу, который оставался неподвижным в держателе. Эксперименты проводили при следующих параметрах: нагрузка на образец 10 Н, скорость прохода 50 мм/с, радиус канавки износа относительно оси вращения 8 мм, расстояние 200 м. Скорость износа рассчитывали по формуле

$$v = \frac{2\pi RS}{Pl},$$

где S – площадь поперечного сечения канавки износа, мм²; l – дистанция, пройденная индентором, м; R – радиус канавки износа относительно оси вращения, мм; P – нагрузка на образец, Н.

Результаты исследований и их обсуждение

Визуальная оценка полученных образцов показала, что в электролите SAT равномерное наиболее насыщенное черное покрытие формируется при концентрации вольфрамата натрия 1,5–2,0 г/л. При меньшей концентрации наблюдается образование ненасыщенного покрытия с цветом, близким к оливковому. При использовании электролита SPF однородное наиболее насыщенное покрытие формируется при содержании ферроцианида калия 1,5 г/л. Внешний вид образцов после МДО продолжительностью 10 мин при содержании в электролитах дополнительных компонентов 1,5 г/л представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид образцов с полученными черными керамическими покрытиями в электролитах: слева – SAT, справа – SPF

Fig. 2. Appearance of samples with obtained black ceramic coatings in electrolytes: left – SAT; right – SPF

При МДО в электролите SAT концентрация вольфрамата натрия не оказывает существенного влияния на качество формируемых покрытий (рис. 3).

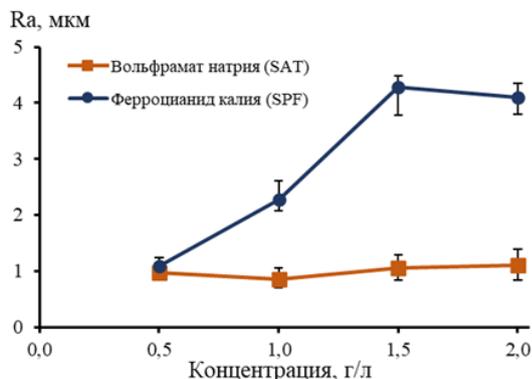


Рис. 3. Влияние концентрации окрашивающих компонентов электролитов SAT и SPF на шероховатость формируемых черных керамических покрытий

Fig. 3. Influence of the concentration of coloring components of SAT and SPF electrolytes on the roughness of formed black ceramic coatings

Так, повышение концентрации вольфрамата натрия с 0,5 до 2,0 г/л при обработке продолжительностью 10 мин приводит к увеличению шероховатости поверхности Ra с 0,97 до 1,11 мкм. В случае использования электролита SPF с увеличением содержания ферроцианида калия с 0,5 до 1,5 г/л наблюдается значительное ухудшение качества формируемых покрытий. Дальнейшее повышение концентрации ферроцианида калия не оказывает влияния на изменение шероховатости (рис. 3). Так, рост концентрации ферроцианида калия с 0,5 до 1,5 г/л приводит к увеличению шероховатости поверхности Ra с 1,08 до 4,20 мкм. Характер представленных зависимостей может быть связан с высокой проводимостью ферроцианида калия. Повышение концентрации этого компонента вызывает увеличение плотности тока и соответственно рост энергии дуговых разрядов и повышение

температуры в зоне пробоя. Это, в свою очередь, приводит к увеличению объема расплавленного материала, выделяющегося на границе покрытие – основание, и образованию более развитой и рельефной поверхности, что является причиной значительного повышения шероховатости.

Существенное изменение рельефа с увеличением концентрации ферроцианида калия подтверждается также электронными фотографиями, представленными на рис. 4. Морфология формируемых черных покрытий зависит от состава применяемого электролита. При этом значительное влияние на морфологию оказывает концентрация дополнительных компонентов, необходимых для окрашивания покрытия (вольфрамата натрия и ферроцианида калия). На рис. 4, 5 представлены электронные фотографии поверхности образцов после МДО продолжительностью 10 мин в электролитах SAT и SPF при концентрации дополнительных компонентов от 0,5 до 2,0 г/л. При окислении в электролите SAT происходит формирование покрытия, имеющего выраженную кратерную структуру с большим количеством пор (рис. 4). Внешний вид кратеров типичен для МДО, когда расплавленный субстрат выбрасывается с поверхности раздела подложка – покрытие через разрядные каналы, затем окисляется, затвердевает и образует кратеры. С увеличением концентрации вольфрамата натрия размеры пор незначительно уменьшаются, а рельеф кратеров увеличивается.

При обработке в электролите SPF формируются покрытия с глобулярной структурой с большим количеством пор, имеющих преимущественно размеры 0,5–3,2 мкм (рис. 5).

Повышение содержания ферроцианида калия приводит к уплотнению структуры покрытий со значительным увеличением плотности и размеров глобулярных образований.

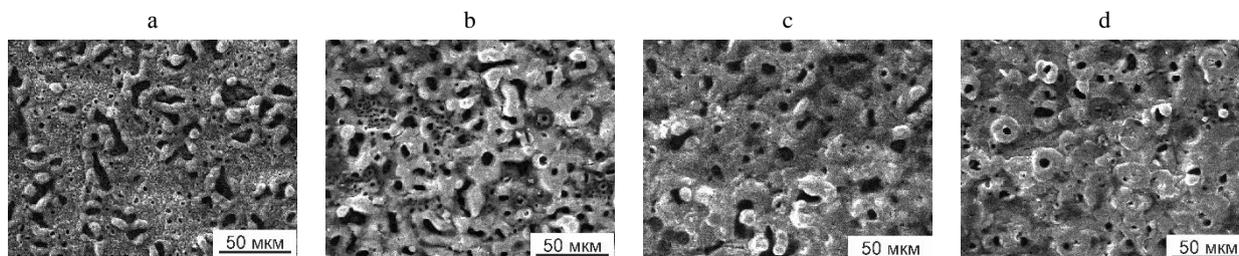


Рис. 4. Морфология покрытия после обработки в электролите SAT с различной концентрацией вольфрамата натрия, г/л: а – 0,5; б – 1,0; с – 1,5; д – 2,0

Fig. 4. Morphology of the coating after treatment in SAT electrolyte with different concentrations of sodium tungstate, g/l: а – 0.5; б – 1.0; с – 1.5; д – 2.0

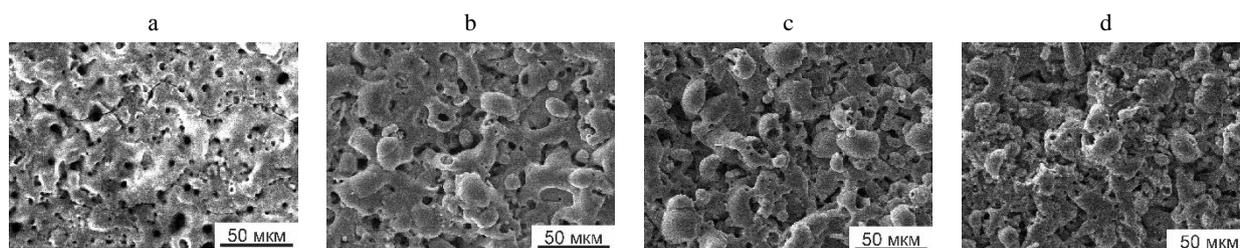


Рис. 5. Морфология покрытия после обработки в электролите SPF с различной концентрацией ферроцианида калия, г/л: а – 0,5; б – 1,0; с – 1,5; д – 2,0

Fig. 5. Coating morphology after treatment in SPF electrolyte with different concentrations of potassium ferrocyanide, g/l: а – 0.5; б – 1.0; с – 1.5; д – 2.0

На рис. 6 представлена зависимость, характеризующая динамику роста толщины покрытий с увеличением продолжительности МДО для образцов, полученных в электролитах SAT и SPF с содержанием по 1,5 г/л вольфрамата натрия и ферроцианида калия соответственно.

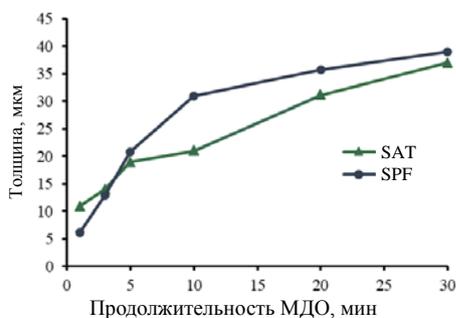


Рис. 6. Влияние продолжительности микродугового оксидирования на толщину формируемых покрытий

Fig. 6. Influence of MAO duration on the thickness of formed coatings

Так, в начальной стадии обработки (1 мин) толщина покрытий составляла 6–11 мкм, а после обработки продолжительностью 30 мин – 37–39 мкм. Наиболее интенсивный рост толщины формируемых покрытий для образцов, полученных в использованных электролитах, наблюдался при продолжительности обработки

до 5 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки приводило к замедлению роста толщины.

Структуры сформированных покрытий в результате МДО продолжительностью 10 мин представлены на рис. 7. Покрытие, полученное с применением электролита SAT, имеет толщину 21 мкм (рис. 7а) и состоит из плотного внутреннего (толщиной 3,2–5,0 мкм) и пористого наружного слоев. Наружный слой представляет собой пористую структуру с большим количеством микротрещин. В нем преобладают продольные поры длиной до 13 мкм и крупные сферические поры размерами 2,0–4,8 мкм. Кроме того, особенностью покрытия в электролите SAT является наличие глубоких открытых пор, выходящих на поверхность. Применение SPF позволило получить оксидный слой с общей толщиной 31 мкм (рис. 7б) со значительно меньшим количеством микротрещин по сравнению с покрытием, полученным в электролите SAT, и с относительно небольшим беспорядочным внутренним слоем (1,5–2,5 мкм).

Наружный слой имеет как продольные, так и поперечные (причем закрытые) поры размером до 18 мкм. При этом в структуре наружного слоя присутствует большое количество мелких сферических пор размерами 0,5–2,5 мкм.

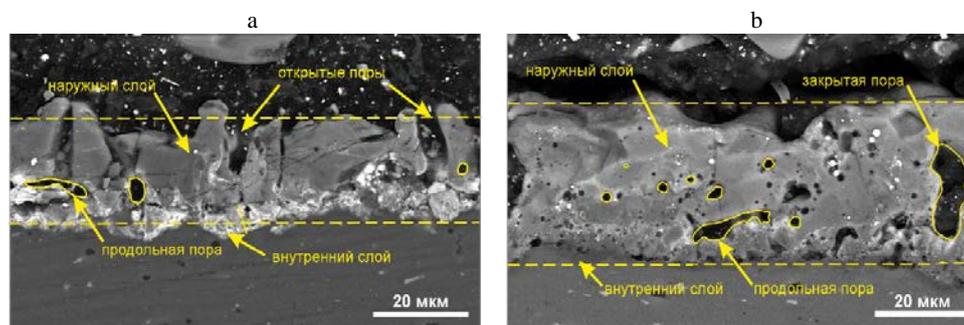


Рис. 7. Структуры покрытий, сформированных с применением электролитов SAT (а) и SPF (б)

Fig. 7. Structures of coatings formed using SAT (a) and SPF (b) electrolytes

На рис. 8 представлены зависимости, характеризующие влияние продолжительности обработки на скорость износа поверхности образцов. Графики для образцов, полученных в электролитах SAT и SPF, имеют сходный характер и близкие значения. На начальной стадии обработки (1 мин) покрытия демонстрировали низкую стойкость к износу. Из-за малой толщины покрытия продавливались в подложку или полностью изнашивались с дальнейшим износом подложки на относительно большую глубину (24–26 мкм), что соответствует скорости износа $(3,0–3,4) \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{м}\cdot\text{Н})$. Максимальная износостойкость покрытий (скорость износа $(0,38–0,59) \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{м}\cdot\text{Н})$) была достигнута при обработке продолжительностью 10 мин. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки существенным образом не оказало влияния на скорость износа.

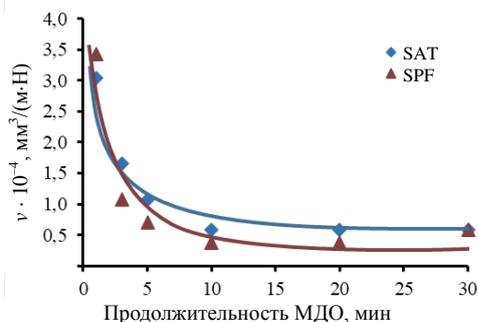


Рис. 8. Влияние продолжительности микродугового оксидирования на скорость износа поверхности образцов

Fig. 8. Effect of MAO duration on the wear rate of the sample surface

ВЫВОДЫ

1. Разработаны методы получения черных керамических покрытий на алюминиевом сплаве АМг₂ с помощью микродугового оксидирования с применением силикатно-щелочного и силикатно-фосфатного электролитов, содержащих в качестве окрашивающих компонентов ферроцианид калия и вольфрамат натрия. Установлено, что наиболее насыщенные черные покрытия в силикатно-щелочном электролите формируются при добавлении 1,5–2,0 г/л вольфрамата натрия, а в силикатно-фосфатном – при добавлении 1,5 г/л ферроцианида калия.

2. Применение электролита, содержащего вольфрамат натрия, позволяет сформировать покрытия с меньшей высотой микронеровностей (R_a 0,97–1,11 мкм) по сравнению с покрытиями, полученными в электролите, содержащем ферроцианид калия (R_a до 4,20 мкм).

3. Максимальная износостойкость полученных покрытий (скорость износа $(0,38–0,59) \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/(\text{м}\cdot\text{Н})$) достигается при обработке в исследованных электролитах продолжительностью 10 мин. При этом толщина покрытий составляет 21–31 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки не оказывает существенного влияния на скорость износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium and its Alloys: Mechanism, Properties and Applications / G. B. Darband [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. 2017. Vol. 5, No 1. P. 74–132. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.02.004>.
2. Influence of Zinc-Dipping on Electroless Nickel Coating on Magnesium Alloy / X. Guan [et al.] // Surface Engineering. 2019. Vol. 35, No 10. P. 906–912. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1548101>.
3. Calcium Doped Flash-PEO Coatings for Corrosion Protection of Mg Alloy / E. Wierzbicka [et al.] // Metals. 2020. Vol. 10, No 7. P. 916. <https://doi.org/10.3390/met10070916>.
4. Ali, M. Magnesium-Based Composites and Alloys for Medical Applications: a Review of Mechanical and Corrosion Properties / M. Ali, M. Hussein, N. Al-Aqeeli // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 792. P. 1162–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.080>.
5. Advance in Antibacterial Magnesium Alloys and Surface Coatings on Magnesium Alloys: a Review / Y. Shao [et al.] // Acta Metallurgica Sinica. 2020. Vol. 33. P. 615–629. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01044-w>.
6. Pulsed Plasma Electrolytic Oxidation Processes for Aeronautical Applications and Their Technical Application / N. Godja [et al.] // Transactions of the IMF. 2013. Vol. 91, No 6. P. 321–329. <https://doi.org/10.1179/0020296713z.000000000150>.
7. Effect of Pulse Current Mode on Microstructure, Composition and Corrosion Performance of the Coatings Produced by Plasma Electrolytic Oxidation on AZ31 Mg Alloy / M. Rahmati [et al.] // Coatings. 2019. Vol. 9, No 10. 688 p. <https://doi.org/10.3390/coatings9100688>.
8. Effects of Pulse Current Mode on Plasma Electrolytic Oxidation of 7075 Al in KMnO₄ Containing Solution / R. Aliramezani [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. 2017. Vol. 164, No 12. P. C690–C698. <https://doi.org/10.1149/2.0021713jes>.
9. Mann, R. Effects of Pulsed Current on Plasma Electrolytic Oxidation / R. Mann, W. E. G. Hansal, S. E. Hansal // Transactions of the IMF. 2014. Vol. 92, No 6. P. 297–304. <https://doi.org/10.1179/0020296714z.000000000206>.
10. Liu, S. Effects of Negative Voltage on Microstructure and Corrosion Resistance of Red Mud Plasma Electrolytic Oxidation Coatings / S. Liu, J. E. Zeng // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 352. P. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.080>.
11. Mechanical and Tribological Properties of Ca/P-Doped Titanium Dioxide Layer Produced by Plasma Electrolytic Oxidation: Effects of Applied Voltage and Heat Treatment / C. A. H. Laurindo [et al.] // Tribology Transactions. 2018. Vol. 61, No 4. P. 733–741. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1404176>.

12. Effect of Duty Cycle and Treatment Time on Electrolytic Plasma Oxidation of Commercially Pure Al Samples / M. D. M. Tavares [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, No 2. P. 2141–2147. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.020>.
13. Effects of Duty Cycle, Current Frequency, and Current Density on Corrosion Behavior of the Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 6061 Al Alloy in Artificial Seawater / M. Vakili-Azghandi, A. Fattah-Alhosseini // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48. P. 4681–4692. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4205-8>.
14. Microstructure, Formation Mechanism and Antifouling Property of Multi-Layered Cu-Incorporated Al₂O₃ Coating Fabricated Through Plasma Electrolytic Oxidation / X. Zhang [et al.] // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, No 3. P. 2901–2909. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.284>.
15. Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties / Q. Chen [et al.] // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 423. P. 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.202>.
16. Hsu, C.-H. Effects of Addition of Al (NO₃)₃ to Electrolytes on Alumina Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation / C.-H. Hsu, H.-P. Teng, F. Lu // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 205, No 12. P. 3677–3682. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.024>.
17. Effect of (NaPO₃)₆ Concentrations on Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ91D Magnesium Alloy / H. Luo [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 464, No 1–2. P. 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.072>.
- Application. *Transactions of the IMF*, 91 (6), 321–329. <https://doi.org/10.1179/0020296713z.000000000150>.
7. Rahmati M., Raeissi K., Toroghinejad M. R., Hakimizad A., Santamaria M. (2019) Effect of Pulse Current Mode on Microstructure, Composition and Corrosion Performance of the Coatings Produced by Plasma Electrolytic Oxidation on AZ31 Mg Alloy. *Coatings*, 9 (10), 688. <https://doi.org/10.3390/coatings9100688>.
8. Aliramezani R., Raeissi K., Santamaria M., Hakimizad A. (2017) Effects of Pulse Current Mode on Plasma Electrolytic Oxidation of 7075 Al in KMnO₄ Containing Solution. *Journal of The Electrochemical Society*, 164 (12), C690–C698. <https://doi.org/10.1149/2.0021713jes>.
9. Mann R., Hansal W. E. G., Hansal S. E. (2014) Effects of Pulsed Current on Plasma Electrolytic Oxidation. *Transactions of the IMF*, 92 (6), 297–304. <https://doi.org/10.1179/0020296714z.000000000206>.
10. Liu S., Zeng J. E. (2018) Effects of Negative Voltage on Microstructure and Corrosion Resistance of Red Mud Plasma Electrolytic Oxidation Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 352, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.080>.
11. Laurindo C. A. H., Lepienski C. M., Amorim F. L., Torres R. D., Soares P. (2018) Mechanical and Tribological Properties of Ca/P-Doped Titanium Dioxide Layer Produced by Plasma Electrolytic Oxidation: Effects of Applied Voltage and Heat Treatment. *Tribology Transactions*, 61 (4), 733–741. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1404176>.
12. Tavares M. D. M., Vitoriano J. O., da Silva R. C. L., Franco A. R., de Souza G. B., da Costa J. A. P., Clodomiro Alves-Junior (2019) Effect of Duty Cycle and Treatment Time on Electrolytic Plasma Oxidation of Commercially Pure Al Samples. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (2), 2141–2147. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.020>.
13. Vakili-Azghandi M., Fattah-Alhosseini A. (2017) Effects of Duty Cycle, Current Frequency, and Current Density on Corrosion Behavior of the Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 6061 Al Alloy in Artificial Seawater. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 4681–4692. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4205-8>.
14. Zhang X., Wu Y., Wang J., Xia X., Lv Y., Cai G., Liu H., Xiao J., Liu B., Dong Z. (2020) Microstructure, Formation Mechanism and Antifouling Property of Multi-Layered Cu-Incorporated Al₂O₃ Coating Fabricated Through Plasma Electrolytic Oxidation. *Ceramics International*, 46 (3), 2901–2909. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.284>.
15. Chen Q., Jiang Z., Tang S., Dong W., Tong Q., Li W. (2017) Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties. *Applied Surface Science*, 423, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.202>.
16. Hsu C.-H., Teng H.-P., Lu F. (2011) Effects of Addition of Al(NO₃)₃ to Electrolytes on Alumina Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 205 (12), 3677–3682. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.01.024>.
17. Luo H., Cai Q., Wei B., Yu B., Li D., He J., Liu Z. (2008) Effect of (NaPO₃)₆ Concentrations on Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on AZ91D Magnesium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 464 (1–2), 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.10.072>.

Поступила 30.08.2022

Подписана в печать 01.11.2022

Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Darband G.B., Aliofkhaezrai M., Hamghalam P., Valizade N. (2017) Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium and its Alloys: Mechanism, Properties and Applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5 (1), 74–132. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.02.004>.
2. Guan X., Zhu H., Shi J., Wei S., Shao Z., Shen X. (2019) Influence of Zinc-Dipping on Electroless Nickel Coating on Magnesium Alloy. *Surface Engineering*, 35 (10), 906–912. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1548101>.
3. Wierzbicka E., Pillado B., Mohedano M., Arrabal R., Matykina E. (2020) Calcium Doped Flash-PEO Coatings for Corrosion Protection of Mg Alloy. *Metals*, 10 (7), 916. <https://doi.org/10.3390/met10070916>.
4. Ali M., Hussein M., Al-Aqeeli N. (2019) Magnesium-Based Composites and Alloys for Medical Applications: a Review of Mechanical and Corrosion Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 1162–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.080>.
5. Shao Y., Zeng R.-C., Li S.-Q., Cui L.-Y., Zou Y.-H., Guan S.-K., Zheng Y.-F. (2020) Advance in Antibacterial Magnesium Alloys and Surface Coatings on Magnesium Alloys: a Review. *Acta Metallurgica Sinica*, 33, 615–629. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01044-w>.
6. Godja N., Hansal W. E. G., Mann R., Kleber Ch., Hansal S. (2013) Pulsed Plasma Electrolytic Oxidation Processes for Aeronautical Applications and Their Technical

Received: 30.08.2022

Accepted: 01.11.2022

Published online: 31.01.2023