

ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

А. А. Максов¹, Е. А. Печерская², П. Е. Голубков³,
О. А. Мельников⁴, Б. В. Чувькин⁵, С. А. Потешкин⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ maksov.01@mail.ru, ² peal@list.ru, ³ golpavpnz@yandex.ru,

⁴ oleg-068@mail.ru, ⁵ chuykin_bv@mail.ru, ⁶ iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В связи с повышенным интересом к использованию оксидных покрытий в различных отраслях промышленности, в том числе медицине и электронике, необходима систематизация известных требований к параметрам качества и эксплуатационным свойствам микродуговых оксидных покрытий в зависимости от области их применения. Целью работы является установление соответствия параметров качества микродуговых оксидных покрытий требованиям в зависимости от области их применения. *Материалы и методы.* Проанализированы требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам высокопрочных защитных покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования, в контексте применения их в авиакосмической технике, машиностроении, а также изделиях медицинского назначения. *Результаты.* На основе анализа конкретных примеров существующих областей применения микродуговых оксидных покрытий выявлены требования к их эксплуатационным характеристикам. Рассмотрены примеры многофункциональных оксидных покрытий на алюминии и титане с точки зрения указанных требований, показана целесообразность их использования в машиностроении, в авиакосмической отрасли и изделиях медицинского назначения. *Выводы.* Полученные результаты использованы при разработке цифрового двойника процесса получения микродуговых оксидных покрытий с заданными свойствами.

Ключевые слова: машиностроение, требования качества, износостойкость, авиационно-космическая промышленность, изделия медицинского назначения, микродуговое оксидирование, толщина, пористость

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., Печерская Е. А., Голубков П. Е., Мельников О. А., Чувькин Б. В., Потешкин С. А. Требования к параметрам микродуговых оксидных покрытий в зависимости от области их применения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 70–78. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-9

REQUIREMENTS FOR THE PARAMETERS OF MICROARC OXIDE COATINGS DEPENDING ON THEIR FIELD OF APPLICATION

A.A. Maksov¹, E.A. Pecherskaya², P.E. Golubkov³,
O.A. Melnikov⁴, B.V. Chuykin⁵, S.A. Poteshtkin⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Penza State University, Penza, Russia

¹ maksov.01@mail.ru, ² peal@list.ru, ³ golpavpnz@yandex.ru,

⁴ oleg-068@mail.ru, ⁵ chuykin_bv@mail.ru, ⁶ iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Due to the increased interest in the use of oxide coatings in various industries, including medicine and electronics, it is necessary to systematize the known requirements for the quality parameters and operational properties of microarc oxide coatings, depending on their field of application. The aim of the work is to establish the compliance of the quality parameters of microarc oxide coatings with the requirements depending on their field of application. *Materials and methods.* The requirements for the performance characteristics of high-strength protective coatings obtained by microarc oxidation are analyzed in the context of their application in aerospace engineering, mechanical engineering, and medical devices. *Results.* Based on the analysis of specific examples of existing applications of microarc oxide coatings, the requirements

for their operational characteristics have been identified. Examples of multifunctional oxide coatings on aluminum and titanium are considered from the point of view of these requirements, and the expediency of their use in mechanical engineering, the aerospace industry, and medical devices is shown. *Conclusions.* The results obtained were used in the development of a digital twin of the process of obtaining microarc oxide coatings with specified properties.

Keywords: mechanical engineering, quality requirements, wear resistance, aerospace industry, medical devices, microarc oxidation, thickness, porosity

Financing: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project «Fundamentals of the digital twin of the technological process of forming oxide coatings with specified properties by microarc oxidation», № 123091800009-1.

For citation: Maksov A.A., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Melnikov O.A., Chuvykin B.V., Poteshkin S.A. Requirements for the parameters of microarc oxide coatings depending on their field of application. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):70–78. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-9

Введение

В условиях постоянного развития техники и технологий поверхностные покрытия играют все более важную роль в производстве. Передовые технологии обработки поверхностей позволяют инженерам выбирать более легкие материалы за счет наилучшего сочетания малого веса и высокой прочности. Металлы вентильной группы находят широкое применение при производстве изделий и компонентов, используемых в аэрокосмической, автомобильной, оборонно-промышленной, медицинской и других отраслях.

Одной из таких технологий обработки поверхности является микродуговое оксидирование (МДО) – это технология, принцип действия которой основан на использовании плазменно-электролитического процесса формирования на поверхности легких сплавов (алюминий, магний, титан и др.) упрочняющих покрытий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками (микротвердость, износостойкость [1–4], адгезия к подложке, биосовместимость [5] и др.). Кроме этого, современные оксидные покрытия способны улучшить характеристики и срок службы легких сплавов, гарантирующие защиту поверхности от износа, коррозии под воздействием технологических химикатов и веществ в рабочей среде.

Имеются также и другие преимущества модификации поверхности методом микродугового оксидирования, например, улучшение коэффициента трения за счет увеличения пористости покрытия, придание антибактериальных свойств и повышение электрической прочности.

Однако легкие сплавы обладают не только преимуществами, ряд свойств ограничивает область их применения. Например, одним из таких сплавов является магний, который химически активен, а также отличается низкой твердостью, слабым сопротивлением ползучести и довольно высокой степенью воспламеняемости. Поэтому магний не всегда подходит для применения в тех областях, где требуется устойчивость к коррозии и износу.

Свойства оксидных покрытий, обуславливающие их область применения

В зависимости от области применения, требований нормативной документации на изделие конкретного типа к свойствам формируемых оксидных покрытий предъявляются специфические требования.

Применение микродуговых оксидных покрытий позволяют обеспечить:

- коррозионную стойкость изделий;
- износостойкость;
- стойкость деталей и узлов, работающих в условиях высоких температур (до 400 °С) и термоциклических нагрузок;
- электроизоляционные свойства поверхностей изделий;
- светопоглощающие свойства изделий;
- защитно-декоративные свойства поверхностей изделий.

Для микродуговых оксидных покрытий, применяемых в авиакосмической отрасли, машиностроении, предъявляются требования к толщине, пористости, микротвердости, термостойкости [6], а также коррозионной стойкости, а для изделий медицинского назначения (имплантатов, протезов), напротив, первоочередными являются требования биосовместимости и антибактериальных свойств оксидных покрытий. Необходимо учитывать требования, предъявляемые к параметрам качества и свойствам микродуговых оксидных покрытий в зависимости от области их применения.

В работе систематизированы требования к характеристикам высокопрочных защитных покрытий, получаемым методом микродугового оксидирования в контексте применения в авиакосмической технике, машиностроении и изделиях медицинского назначения.

Применение МДО-покрытий в авиационно-космической технике

Целесообразно рассмотреть несколько вариантов применения оксидных покрытий, выполненных на металлах вентильной группы для авиационно-космической промышленности.

Одним из ярких примеров применения МДО-покрытий в авиационно-космической технике является оборудование, расположенное на борту обитаемых отсеков Международной космической станции (МКС). Космическая техника может подвергаться воздействию влажности до 70 %. Кроме этого, космические аппараты и оборудование, которые хранятся на Земле в течение значительного периода времени и запускаемые в космос, часто подвергаются воздействию коррозионных сред, а также повторяющийся механический контакт алюминиевых сплавов в вакууме может привести к заклиниванию при холодной сварке.

Обширное применение в авиационно-космической технике имеют и черные функциональные керамические покрытия. Причины их широкого использования в условиях космического пространства связаны с характеристиками и уникальными особенностями объектов, имеющих покрытия черного цвета. Черные покрытия имеют высокую степень поглощения света, что позволяет эффективно захватывать солнечное излучение. Это может быть полезно для нагрева поверхностей солнечных батарей и нагревательных элементов на космических аппаратах. Кроме этого, в условиях космоса, где нет атмосферы, теплоотведение происходит более медленно, и черные покрытия помогают поддерживать высокую температуру на поверхности оборудования, что может сказаться на работоспособности оборудования. Это связано со свойствами поглощения тепла черными объектами (коэффициент теплового поглощения не превышает 0,7–0,85). Для минимизации световых помех и улучшения качества получаемых изображений за счет малого коэффициента отражения света также применяются черные керамические покрытия, имеющие низкий коэффициент отражения света, влияющий на работу оптических приборов и систем.

В целях повышения надежности и эффективности компонентов авиационно-космической техники, применяемых в агрессивных условиях стратосферы и космического пространства, к эксплуатационным свойствам микродуговых оксидных покрытий предъявляется следующий ряд требований:

- 1) минимальная плотность покрытия, наносимого на легкие сплавы (не больше 10 г/м²), что позволит облегчить вес самого элемента и общей конструкции в целом;
- 2) высокая микротвердость формируемого покрытия – не менее 1500 по шкале Виккерса;
- 3) защита металла от коррозии – не менее 500 ч в условиях соляного распыления;
- 4) минимальный уровень износа (не меньше 2 мг при проведении исследований на износ);
- 5) температурный диапазон от –60 до +300 °С (для лопаток турбин реактивных двигателей – 1927 °С);
- 6) стабильность в вакууме;
- 7) преобладание стабильных термооптических характеристик и большого поверхностного сопротивления (не менее 10⁹ Ом).

Применение оксидных покрытий в машиностроении

Высокопрочные покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования распространены в машиностроении.

Центрирующие кольца из алюминиевого сплава 6082, представляющего собой деформируемый сплав алюминия, магния и кремния (AlSi1MgMn – EN AW-6082), используется в качестве уплотнительных элементов для соединения турбомолекулярных насосов с вакуумными установками. В случае аварии ротора-статора – один из возможных неблагоприятных типов неисправностей – энергия вращения ротора передается на корпус в течение миллисекунд. Для того чтобы центрирующие кольца могли передавать посредством трения развивающиеся высокие крутящие моменты в систему, а также для предотвращения скручивания насоса во фланце, поверхности должны быть чрезвычайно износостойкими и иметь определенную шероховатость.

Одним из наиболее требовательных применений компонентов из алюминиевых сплавов является применение геометрически высокоточных роторов из AlSi1MgMn (EN AW-6082), которые устанавливаются в турбомолекулярных насосах, используемых в процессах плазменного травления. Решающим фактором в этой области является необходимость создания защитных поверхностей, полностью лишенных пор и трещин, а также не подверженных воздействию

реакционных газов. Чрезвычайно высокая скорость вращения роторов означает, что они также подвергаются, соответственно, экстремальным механическим нагрузкам. Традиционные методы защиты поверхности, такие как анодирование, хромирование или никелирование, не выдерживают таких нагрузок [7].

Также МДО-покрытия наносят на пары трения, подшипники скольжения, зубчатые передачи, поршни, цилиндры, торцевые уплотнения для двигателей внутреннего сгорания, станков и машин. Упрочнение деталей цилиндропоршневой группы дает повышение износостойкости в 10–15 раз, снижение механических затрат на 40–50 %, массы, материалоемкости и теплонагруженности, повышение КПД на 2–15 %. Помимо кратного увеличения износостойкости и наработки на отказ, использование алюминиевых сплавов с МДО-покрытиями существенно улучшает динамические характеристики движущихся деталей узлов.

В машиностроении сверхтвердые оксидные слои, сформированные методом МДО, нашли свое применение как износостойкие и антифрикционные покрытия взамен легированной стали, что обеспечивает существенное увеличение износостойкости и наработки на отказ.

К эксплуатационным характеристикам оксидных покрытий, применяемых в отрасли машиностроения, в основном предъявляются требования, направленные на повышение коррозионной стойкости в агрессивных средах (например, масла, кислоты, газы), увеличение износостойкости и температурного диапазона эксплуатации. Далее приведены требования к формируемым покрытиям методом микродугового оксидирования:

- 1) толщина покрытия от 5 до 100 мкм;
- 2) микротвердость формируемого покрытия должна находиться в диапазоне от 800 до 2000 по шкале Виккерса;
- 3) пористость покрытия варьируется от 5 до 40 %;
- 4) сопротивление к износу не должно превышать 5 мг;
- 5) коррозионная стойкость должна быть больше 1000 ч (в условиях соляного распыления);
- 6) температурный диапазон эксплуатации варьируется в зависимости от областей применения, например:

– для защиты от коррозии и износа в менее агрессивных условиях – температура не должна превышать 200 °С;

– если МДО-покрытия используются в условиях, где температура рабочей среды повышается (например, в двигателях внутреннего сгорания и др.), то такие покрытия должны выдерживать рабочую температуру от 200–500 °С;

– 500–800 °С и выше – такую температуру должны выдерживать МДО-покрытия, используемые в жаростойких изделиях и деталях.

Исследования, проводимые авторами в работе [7], также направлены на изучение морфологии поверхностей покрытий, полученных способом микродугового оксидирования на алюминиевых сплавах, а также эксплуатационных характеристик.

МДО-обработка образцов из алюминиевого сплава проводилась в силикатно-щелочном электролите (0,5 г/л NaOH и 80 г/л Na₂SiO₃).

Для исследования морфологии поверхности был применен растровый электронный микроскоп (РЭМ) VEGA 3 TESCAN. Пористость была оценена с использованием программного обеспечения (ПО) непосредственно РЭМа.

Рисунок 1 демонстрирует топографию поверхности МДО-покрытия алюминия.

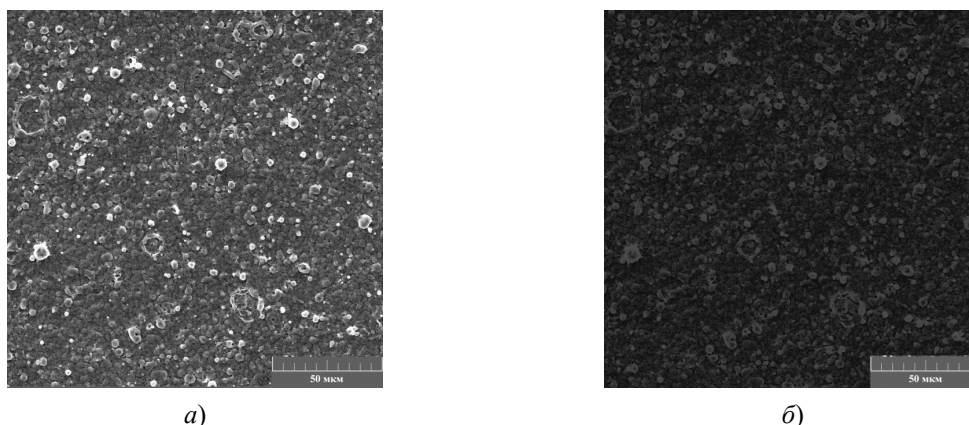


Рис. 1. Морфология поверхности МДО-покрытия, полученного на алюминии:

а – исходное изображение МДО-покрытия; б – изображение МДО-покрытия после обработки ПО

Таблица 1

Значение пористости оксидного покрытия на образцах алюминия

Сквозная пористость, P_{skvoz} , %	Поверхностная пористость, P_{poverh} , %	Общая пористость, P_{obsh} , %
15,03	19,48	34,51

На рис. 1,б темными оттенками показана сквозная пористость, светлыми – поверхностная.

Пористость многофункциональных покрытий на образцах алюминия (табл. 1), полученная с использованием разработанного авторами программного обеспечения, соответствует требованиям пористости МДО-покрытий и находится в необходимом диапазоне (от 5 до 40 %). Полученные покрытия можно применять как в изделиях машиностроительной отрасли, так и в авиакосмической промышленности.

Применение МДО-покрытий в изделиях медицинского назначения

Также способ получения покрытий методом микродугового оксидирования находит применение и в производстве изделий медицинского назначения.

С его помощью формируют кальций-фосфатные (КФ) покрытия на поверхности имплантатов из биоинертных сплавов титана, циркония, ниобия и магния. Такие покрытия обладают высокими биоактивными и антибактериальными свойствами, что делает их пригодными для использования на имплантатах для остеосинтеза.

Также методом микродугового оксидирования получают диэлектрические покрытия на медицинских инструментах, например биполярных зажимах в эндохирургии. Это позволяет улучшить износостойкие, теплостойкие, коррозионностойкие и электроизоляционные качества материала, а также увеличить срок службы инструмента.

Еще одна область применения биосовместимых покрытий – создание силикатных и силикатно-фосфатных покрытий на поверхности магниевых сплавов $Mg0.8Ca$. Такие покрытия используют в травматологии, ортопедии и челюстно-лицевой хирургии.

Потребность практической медицины в биосовместимых КФ покрытиях может быть удовлетворена наличием большой номенклатуры покрытий с различными структурой, составом и свойствами. КФ биопокрытия должны быть биологически совместимыми с тканями организма, коррозионно-устойчивыми в биологической среде и иметь высокую адгезионную прочность с материалом основы. Эта проблема может быть решена применением различных методов формирования покрытий. При выборе метода формирования покрытия на имплантате необходимо учитывать область его применения. Для реконструктивной хирургии представляют интерес КФ покрытия, усиливающие способность имплантатов к остеоинтеграции с костной тканью.

Требования, предъявляемые к эксплуатационным характеристикам биосовместимых покрытий, применяемых в изделиях медицинского назначения:

- 1) нетоксичность. Покрытие должно соответствовать требованиям нормативной документации для медицинских изделий класса 2а¹;
- 2) биосовместимость покрытий (регулируется межгосударственным стандартом ISO 10993-1²) и остеосинтез [8];
- 3) устойчивость к воздействию изменения температуры среды. Образцы с МДО-покрытием должны выдерживать испытания в диапазоне от –65 до +300 °С, при этом разрушения покрытия не должно наблюдаться;
- 4) защита от образования и воздействия плесени;
- 5) отсутствие вздутий и отслаивания покрытия. Это проверяется при качественных исследованиях прочности сцепления МДО-покрытий на напыленных поверхностях;
- 6) также к требованиям относится экологичность процесса, так как электролиты не должны содержать сильных кислот, дорогостоящих и вредных химических компонентов.

Развитие поверхности образцов титана методом микродугового оксидирования так же, как и на образцах из алюминиевого сплава, позволяет достичь требуемых параметров пористости [9].

¹ ГОСТ ISO 13485–2017. Изделия медицинские. Системы менеджмента качества. Требования для целей регулирования.

² ГОСТ ISO 10993-1–2021. Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 1. Оценка и исследования в процессе менеджмента риска.

При получении МДО-покрытий на титане проводилась, во-первых, подготовка поверхностей:

1) обезжиривание в органическом растворителе с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ);

2) травление в растворе серной кислоты H_2SO_4 в течение 5 мин;

3) активация в молочной кислоте NaF также проводилась в течение 5 мин.

Во-вторых, МДО-обработка титана проводилась в электролите, содержащем 5 г/л гидроксида натрия $NaOH$, 3 г/л персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$; 10 г/л сульфата натрия Na_2SO_4 и 5 г/л сульфата магния $MgSO_4$.

Электролит, применяемый для формирования покрытия на титане, не является токсичным за счет малой концентрации, а также слабой токсичности его отдельных компонентов.

Для исследования морфологии поверхности так же, как и при исследовании топологии поверхности на образцах алюминия, был применен растровый электронный микроскоп (РЭМ) VEGA 3 TESCAN. Рисунок 2 демонстрирует топографию поверхности титана, которая была получена методом микродугового оксидирования.

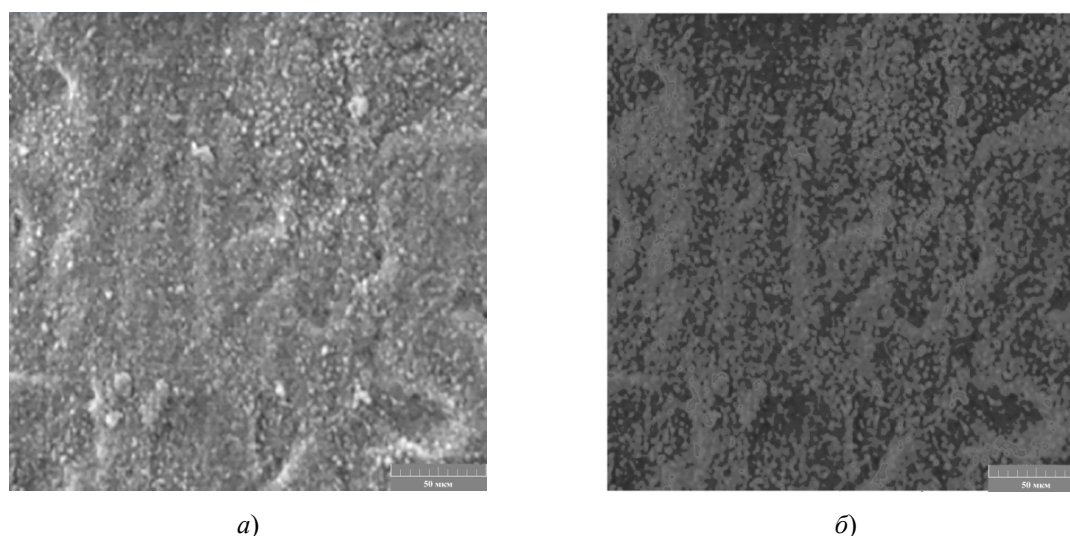


Рис. 2. Морфология поверхности МДО-покрытия, полученного на титане:
а – исходное изображение МДО-покрытия; б – изображение МДО-покрытия после обработки ПО

Таблица 2

Значение пористости оксидного покрытия на образцах титана

Сквозная пористость, P_{skvoz} , %	Поверхностная пористость, P_{poverh} , %	Общая пористость, P_{obsh} , %
26,67	23,21	50,88

На рис. 2,б темными оттенками показана сквозная пористость, светлыми – поверхностная.

Полученные численные значения пористости оксидного покрытия (табл. 2), сформированного на титане методом микродугового оксидирования, соответствуют требованиям пористости биоактивных покрытий и находятся в требуемом диапазоне (от 50 до 70 %).

Исследования топологии поверхности покрытий, полученные на образцах из сплава титана, демонстрируют преобладание сквозных пор, что благоприятно сказывается на покрытиях, предназначенных для использования в медицине, в частности, изделиях медицинского назначения. Кроме того, в сквозных порах может содержаться большое количество лекарственных препаратов [10], что позволит увеличить приживляемость МДО-покрытий в организме человека и животных.

Сравнительный анализ требований к МДО-покрытиям

Ниже приведены результаты сравнения эксплуатационных свойств оксидных покрытий, получаемые методом микродугового оксидирования, в зависимости от области применения: авиакосмической промышленности, машиностроении, изделиях медицинского назначения (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная таблица эксплуатационных свойств
МДО-покрытий по отраслям промышленности

Показатели	Область использования		
	авиакосмическая промышленность	машиностроение	изделия медицинского назначения
Толщина, мкм	5–75	5–100	10–50
Микротвердость, HV	≥1500	800–2000	1000–2500
Пористость, %	10–20	5–40	50–70
Сопротивление к износу, мг	<2	<5	<3
Коррозионная стойкость, часы	>500	>1000	>48
Биосовместимость	–	–	ISO 10993–1
Температурный диапазон эксплуатации, °C	–60 до +300	–40 до +150	–40 до +150

Таким образом, в зависимости от областей применения, к высокопрочным керамическим покрытиям, формируемым посредством микродугового оксидирования, предъявляются требования к параметрам качества, а также эксплуатационным (в том числе механическим, термическим, химическим) характеристикам. Понимание специфики каждого из этих направлений подчеркивает необходимость индивидуального подхода к выбору материалов и технологий нанесения покрытий.

В области авиационно-космической промышленности акцент следует делать на повышении термостойкости (от –60 до +300 °C) и коррозионной стойкости (не менее 500 ч), чтобы гарантировать безопасность и надежность в условиях повышенных температур и агрессивных сред. Для транспортной техники критично важны параметры, связанные с износостойкостью (не должно превышать 5 мг), пористостью (варьируемой от 5 до 40 %) и микротвердостью (800 до 2000 по шкале Виккерса), что напрямую влияет на качество, срок службы, а также экономическую составляющую применения изделий.

В медицине, где покрытие должно обеспечивать биосовместимость и износостойкость (не должно превышать 3 мг), требования к качеству становятся особенно строгими. Здесь необходимо учитывать и особые условия стерилизации, а также возможность взаимодействия с биологическими тканями.

Способ получения покрытий методом микродугового оксидирования стал приемлемой платформой для модификации поверхности легких металлов и сплавов. Имеются потребности и предпосылки для дальнейшего поддержания и исследования в отрасли для оптимизации технологического процесса в соответствии с индивидуальными отраслевыми стандартами и требованиями.

Список литературы

1. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultracera[®]: 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
2. 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.
3. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Intelligent automated system of controlled synthesis of mao-coatings // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. № 24. P. 96–103.
4. 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. молодеж. науч. конф. Тамбов, 2018. С. 111–113.
5. Molaei M., Fattah-alhossini A., Nouri M., Nourian A. Systematic optimization of corrosion, bioactivity, and biocompatibility behaviors of calcium-phosphate plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on titanium substrates // Ceramics International. 2022. Vol. 48, iss. 5. P. 6322–6337. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.175.
6. Печерская Е. А. Применение методологии функционального и метрологического анализа к качеству исследования материалов микро- и нанoeлектроники // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2007. Т. 7, № 2. С. 94–98.
7. Maksov A. A., Gurin S. A., Golubkov P. E. [et al.]. Methods and instruments for measuring surface morphology and mechanical parameters of oxide coatings // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2024. Vol. 17 (3.1). P. 161–167. doi: 10.18721/JPM.173.132

8. Иванов П. В., Макарова Н. И., Булкина Н. В., Зюлькина Л. А. Современные представления об остеointegrации дентальных имплантатов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2018. № 4 (48). С. 191–202. doi: 10.21685/2072-3032-2018-4-19
9. Korytkin A. A., Orlinskaya N. Yu., Novikova Ya. S. [et al.]. Biocompatibility and osseointegration of calcium phosphate-coated and non-coated titanium implants with various porosities // Modern technologies in medicine. 2021. Vol. 13, № 2. P. 52–58. doi: 10.17691/stm2021.13.2.06
10. Атрошенко Э.С., Казанцев И. А., Розен А. Е., Голованова Н. В. Область применения и свойства покрытий, получаемых микродуговым окислением // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 3. С. 8–11.

References

1. 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
2. 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.)
3. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. et al. Intelligent automated system of controlled synthesis of mao-coatings. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*. 2019;(24):96–103.
4. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Martynov A.V. Application of quality control tools for analyzing the microarc oxidation process. *Radioelectronics. Problems and prospects of development. Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezh. nauch. konf. = Radioelectronics. Problems and prospects of development : thesis of the reports of the third All-Russian youth scientific conference*. Tambov, 2018:111–113. (In Russ.)
5. Molaei M., Fattah-alhossini A., Nouri M., Nourian A. Systematic optimization of corrosion, bioactivity, and biocompatibility behaviors of calcium-phosphate plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on titanium substrates. *Ceramics International*. 2022;48(5):6322–6337. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.175.
6. Pecherskaya E.A. Application of the methodology of functional and metrological analysis to the quality of research of micro- and nanoelectronics materials. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya = Fundamental problems of radioelectronic instrumentation*. 2007; 7(2):94–98. (In Russ.)
7. Maksov A.A., Gurin S.A., Golubkov P.E. et al. Methods and instruments for measuring surface morphology and mechanical parameters of oxide coatings. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2024;17(3.1):161–167. doi: 10.18721/JPM.173.132
8. Ivanov P.V., Makarova N.I., Bulkina N.V., Zyl'kina L.A. Modern concepts of osseointegration of dental implants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Medical sciences*. 2018;(4):191–202. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3032-2018-4-19
9. Korytkin A.A., Orlinskaya N.Yu., Novikova Ya.S. et al. Biocompatibility and osseointegration of calcium phosphate-coated and non-coated titanium implants with various porosities. *Modern technologies in medicine*. 2021;13(2):52–58. doi: 10.17691/stm2021.13.2.06
10. Atroshchenko E.S., Kazantsev I.A., Rozen A.E., Golovanova N.V. Scope and properties of coatings obtained by microarc oxidation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*. 1996;(3):8–11. (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)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
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, professor,
head of the sub-department of information and measuring technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Евгеньевич Голубков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
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
technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Андреевич Мельников

инженер-исследователь кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

Oleg A. Melnikov

Research engineer of the sub-department
of information and measuring
technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Борис Викторович Чувькин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvykin_bv@mail.ru

Boris V. Chuvykin

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

Сергей Александрович Потешкин

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

Sergey A. Poteskin

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 25.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 23.12.2024

Принята к публикации/Accepted 13.01.2025