



МРНТИ 55.22.23

А.Ж. Жасулан^{1*}, Б.К. Рахадиллов², Д.Р. Байжан¹,
А.Б. Шынарбек¹, К.Д. Орманбеков¹

¹Университет имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

²ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан

(E-mail: *ainur.99.99@mail.ru)

Исследование процесса формирования покрытий при микродуговом оксидировании титана

Аннотация. В работе исследованы структурно-фазовые состояния покрытий, сформированных на поверхности титана методом микродугового оксидирования (МДО). В ходе исследования были проведены серии экспериментов с варьированием параметров процесса и состава электролита. С использованием различных аналитических методов, включая электронную микроскопию и рентгеновскую дифракцию, были проанализированы морфологические и структурные изменения покрытий. Микродуговое оксидирование титана проводилось в анодном потенциостатическом режиме в течение 10 минут в различных электролитах на основе фосфорной кислоты, ортофосфата натрия, гидроксида калия и гидроксиапатита. После МДО микрогеометрия поверхности не меняется, т.е. на поверхности титана формируется тонкое покрытие толщиной 5-7 мкм. Результаты исследования поверхности покрытий методом сканирующей электронной микроскопии показали, что наиболее пористой поверхностью из всех исследуемых покрытий обладают покрытия, сформированные в электролите с добавлением гидроксида калия (КОН). Результаты рентгеновской дифракции показали, что анатаз и рутил являются основной фазой в покрытиях. Состав электролита является одним из определяющих факторов процесса МДО и имеет решающее значение для применения МДО. Результаты исследования позволяют получить глубокое понимание процесса формирования покрытий при микродуговом оксидировании титана.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, кальций-фосфатное покрытие, физико-механические свойства, электролит.

DOI: doi.org/10.32523/2616-6836-2023-143-2-6-15

1. Введение

Микродуговое оксидирование (МДО) – сравнительно новый способ электрохимической обработки поверхности преимущественно металлических материалов, берущий свое начало от традиционного анодирования. Исследование процесса формирования

покрытий при микродуговом оксидировании титана является важным направлением в области поверхностной модификации материалов. Титан и его сплавы широко применяются в различных отраслях, включая аэрокосмическую, авиационную, медицинскую и энергетическую промышленности, благодаря их высокой прочности, легкости и химической стойкости. При микродуговом оксидировании титана происходит образование тонких оксидных покрытий на его поверхности. Эти покрытия обладают рядом полезных свойств, таких, как улучшенная коррозионная стойкость, трибологическая устойчивость, а также возможность изменения их структуры и химического состава. Однако процесс формирования этих покрытий является сложным и требует детального исследования. МДО позволяет формировать многофункциональные оксидокерамические покрытия, которые значительно повышают прочностные и защитные свойства рабочих поверхностей деталей.

Технологию МДО используют главным образом для формирования оксидно-керамических покрытий на поверхности сплавов на основе титана, магния, тантала и алюминия [1-3]. Получение оксидно-керамических покрытий методом стремительно развивающегося в последние годы МДО позволяет получать композиционные материалы, которые обладают более высокими механико-трибологическими свойствами [4,5]. Сплавы титана обладают низким сопротивлением к износу, но широко используются в автомобильной, химической и биомедицинской отраслях промышленности, что увеличивает сферы применения метода МДО [6-9]. Анализ современных представлений о механизме роста оксидно-керамических МДО-покрытий позволил сделать вывод, что структура и свойства покрытий зависит от нескольких параметров [10]. Основными параметрами, влияющими на структуру и свойства покрытий, является состав электролита. Технологическими факторами, влияющими на свойства покрытий, также могут служить параметры напряжения, тока, частоты и времени. Вследствие этого, необходимы исследования по установлению закономерностей, происходящих при формировании оксидно-керамических покрытий в зависимости от параметров процесса МДО. При микродуговом оксидировании титана в составе покрытий появляются кристаллические фазы оксида титана [17, 18]. В исследованиях было показано, что присутствие рутила и анатаза влияет на рост и морфологию оксидных покрытий на поверхности титана при микродуговом оксидировании. Рутил, благодаря своей компактной кристаллической структуре, способствует формированию плотных и гладких покрытий с высокой стойкостью к коррозии. С другой стороны, анатаз с его более открытой и пористой структурой может способствовать образованию покрытий с более большой поверхностной площадью и более высокой адгезией.

Целью данной работы было исследование влияния состава электролита на формирование структуры и свойства покрытий, полученных методом МДО на поверхности титана ВТ1-0.

2. Методы

Нанесение покрытий методом МДО проведено на установке Guintek «APS-77300». Устройство МДО Guintek «APS-77300» состоит из программируемого источника переменного тока, гальванической охлаждающей ванны, набора электродов и программного обеспечения для управления и контроля параметров электрофизического сжигания, а также цифрового осциллографа, позволяющего получать кинетическую зависимость в процессе. Получение МДО-покрытия проводилось в анодном потенциостатическом режиме. Рисунок 1 иллюстрирует принципиальную схему установки МДО. В качестве анода используется вентильный металл, который погружают в перемешанный электролит. В качестве электролитического элемента и катода выбран контейнер из нержавеющей стали. Электрический ток подается от источника питания МДО. Температура электролита регулируется ниже 40°C с помощью конденсированной воды. Поддержание температуры

необходимо для получения качественного оксидного слоя [11-12]. Для удержания температуры вокруг посуды с электролитом была обмотана медная трубка, подключенная к станции охлаждения sl-1500/aurora-pro/.

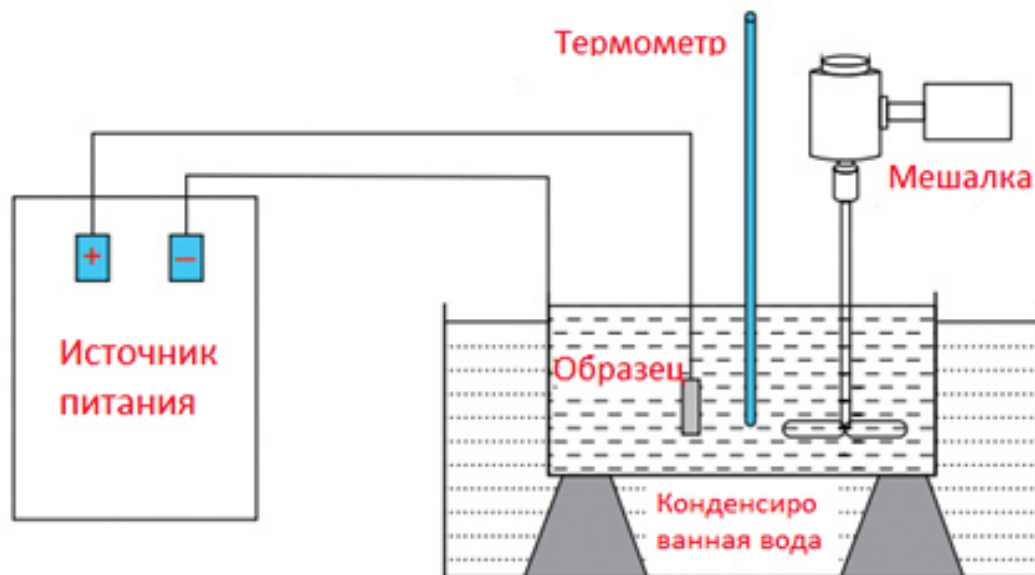


Рисунок 1. Принципиальная схема экспериментальной установки МДО

В соответствии с поставленными целями в качестве объекта исследования был выбран титан ВТ1-0. Перед МДО проведена подготовка поверхности образцов титана к нанесению покрытий (шлифовки и пескоструйная обработка). В таблице 1 приведены режимы и состав электролита для МДО титана. Химический состав электролита значительно влияет на ускорение пассивации металла и пробоя диэлектрика и, как следствие, на образование тонкой изолирующей пленки. Исходя из этого выбраны различные электролиты (фосфат натрия, гидрофосфат натрия, гидроксид калия и гидроксиапатит) для МДО титана.

Таблица 1. Состав электролита и режимы МДО титана

Состав электролита	Режимы МДО				
	Частота, Гц	Напряжение, В	Время, мин	Ток, А/см ²	Ток
Na ₃ PO ₄ (6г), гидроксиапатит (0,75г), KOH(2 г)	100	200	10	20	Переменный
Na ₃ HPO ₄ (5 г) и гидроксиапатит (0,5 г)	50	300	10	20	
Na ₃ PO ₄ (5 г) и гидроксиапатит (0,5г)	200	300	10	12,6	

Морфологию поверхности рассмотрели на низковакуумном растровом электронном микроскопе JSM-6390 LVJEOL. Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов выполнялся на дифрактометре X-pertPRO в CuKα излучении при ускоряющем напряжении 40 кВ и анодном токе 30мА. Расшифровка дифрактограмм выполнялась вручную с помощью базы данных PDWin (рисунок 2). Шероховатость покрытия измеряли с помощью профилометра модели 130.

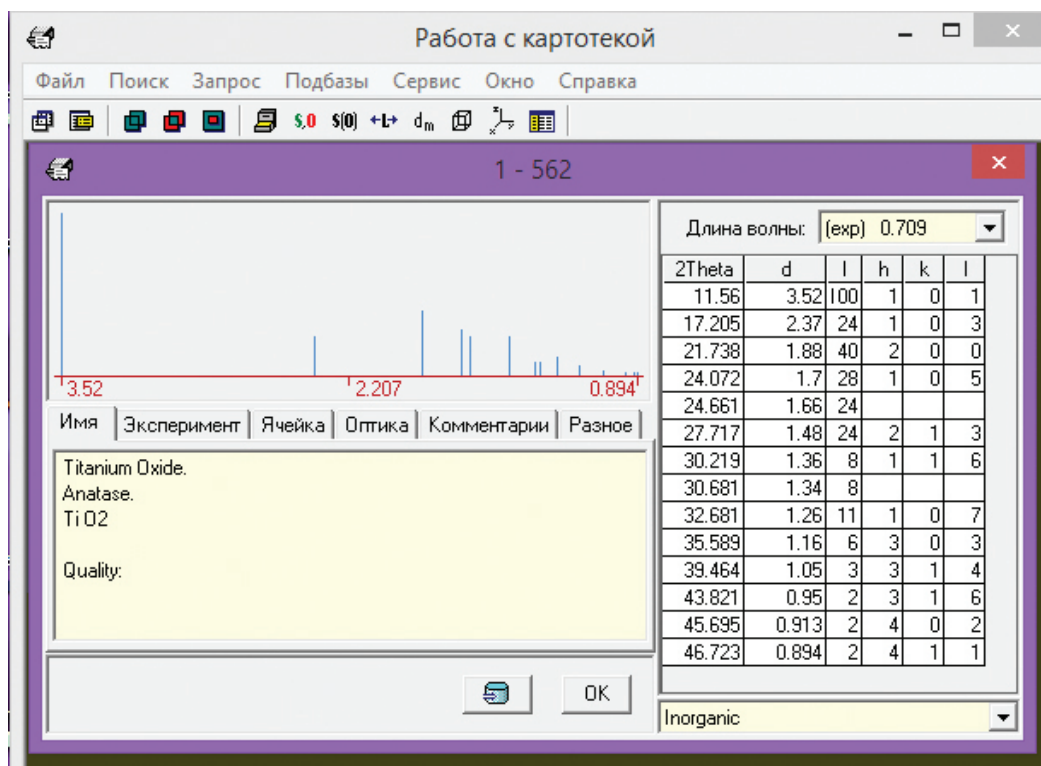


Рисунок 2. База данных порошковой дифрактометрии

3. Результаты и обсуждение

Морфология поверхности покрытия (размеры, количество пор, наличия трещин), сформированных методом МДО, зависит от состава электролита и субстрата (подложки). Однако для всех МДО-покрытий характерно наличие пор, которые являются каналами электрических пробоев и следствием выхода газовых пузырей на поверхность. Микроструктура МДО-покрытий имеет типичную пористую структуру (рисунок 3). В ходе этого процесса тонкий оксидный слой формируется на поверхности титана путем воздействия электрического дугового разряда. Один из главных эффектов МДО титана - это образование микрорельефа на поверхности. В начальных стадиях процесса образования покрытия наблюдается образование мелких выступов, покрытых оксидными частицами. С развитием процесса рельеф становится более выраженным и образуются микротрубочки и поры, пронизывающие покрытие. Также наблюдается появление так называемых «островков» на поверхности. Эти островки представляют собой места, где процесс оксидирования протекает более интенсивно, что приводит к формированию более плотного и толстого покрытия по сравнению с окружающей поверхностью. Морфологические изменения структуры при микродуговом оксидировании титана могут играть важную роль в определении свойств покрытий, таких, как адгезия, трибологическая устойчивость и коррозионная стойкость. Понимание этих изменений помогает оптимизировать процесс формирования покрытий и разработать материалы с желаемыми характеристиками для различных промышленных приложений.

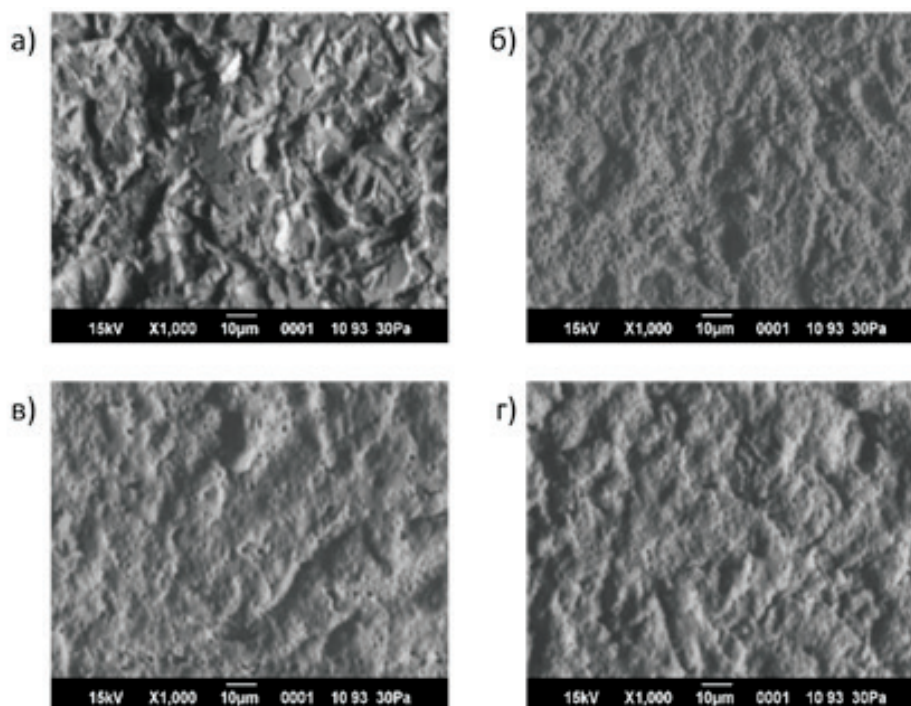


Рисунок 3. Микроструктура поверхности образца до и после нанесения МДО-покрытий в различных электролитах: а) титан (исходный); б) $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{ГА} + \text{КОН}$; в) $\text{Na}_3\text{HPO}_4 + \text{ГА}$; г) $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{ГА}$

Анализ изображений поверхности образцов с покрытиями, сформированными в электролитах различного состава, полученных с помощью РЭМ показал, что наиболее пористой поверхностью из всех исследуемых покрытий обладают покрытия, сформированные в электролите с добавлением гидроксида калия (КОН). Возможно добавление в электролит КОН и увеличение плотности тока способствует возрастанию интенсивности процесса газовой выделению при МДО. Стоит отметить, что для стабильности электролита необходима щелочная среда, требуемый рН которой создают обычно с помощью гидроксида калия КОН или натрия NaOH. Эксперименты по изучению влияния компонентов электролитов показали, что при концентрации КОН или NaOH в электролите менее 3 г/л приводит к увеличению энергоёмкости процесса. При содержании КОН или NaOH более 6 г/л электролит имеет высокую агрессивность, что приводит к травлению поверхности и уменьшению толщины оксидного слоя [13].

Состояние поверхностного слоя характеризуется наличием шероховатости и волнистости, которые образовались в результате пескоструйной обработки. После МДО микрогеометрия поверхности не меняется, т.е. на поверхности титана формируется тонкое покрытие толщиной 5-7 мкм. Следует отметить, что профилометрические измерения, выполненные до и после нанесения покрытия, не выявили существенного изменения шероховатости поверхности (таблица 2).

Таблица 2. Шероховатость поверхности образца до и после нанесения МДО-покрытий

Образцы	Шероховатость R_a , мкм
До нанесения покрытий	1.65±0.22
МДО-покрытие в электролите $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{КОН} + \text{ГА}$	1.57±0.32
МДО-покрытие в электролите $\text{Na}_3\text{HPO}_4 + \text{ГА}$	1.68±0.25
МДО-покрытие в электролите $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{ГА}$	1.47±0.39

На рисунке 4 показаны результаты рентгенофазового анализа МДО-покрытий, полученных в разных электролитах. На графике рентгенофазового анализа были зарегистрированы: дифракционные пики титана (от подложки) и кристаллические фазы рутила и анатаза. Анатаз, рутил и брукит являются тремя основными полиморфами оксида титана (TiO₂) [14]. С увеличением приложенного напряжения и плотности тока температура повышается, и анатаз превращается в рутил при 815 °С, который является более стабильной фазой TiO₂ при высоких температурах [15,16]. Фазовый состав покрытий, полученных в электролите Na₃PO₄+ ГА+КОН, состоит из Ti и высокотемпературной модификации диоксида титана – рутила, т.е. добавление в раствор КОН приводит к увеличению энергоемкости процесса МДО. Основная роль раствора КОН заключается в обеспечении оптимальных условий для процесса гидратации титанового диоксида и формирования рутила и анатаза. Раствор КОН может регулировать pH-значение реакционной среды, обеспечивая щелочную среду, которая способствует эффективной гидратации титанового диоксида и образованию желаемых фаз. Общая химическая формула образования рутила и анатаза при микродуговом оксидировании титана может быть представлена следующим образом:



Участие КОН в этой реакции заключается в предоставлении гидроксильных ионов (ОН⁻) для взаимодействия с титаном и кислородом. Гидроксидные ионы служат катализаторами окислительной реакции, способствуя образованию рутила и анатаза.

Однако стоит отметить, что реакция формирования рутила и анатаза является сложным процессом, и в ней может участвовать не только раствор КОН, но и другие факторы, такие, как температура, время реакции и концентрация реагентов. Поэтому точные условия реакции и конкретные соотношения между компонентами могут варьироваться в зависимости от конкретного эксперимента или процесса.

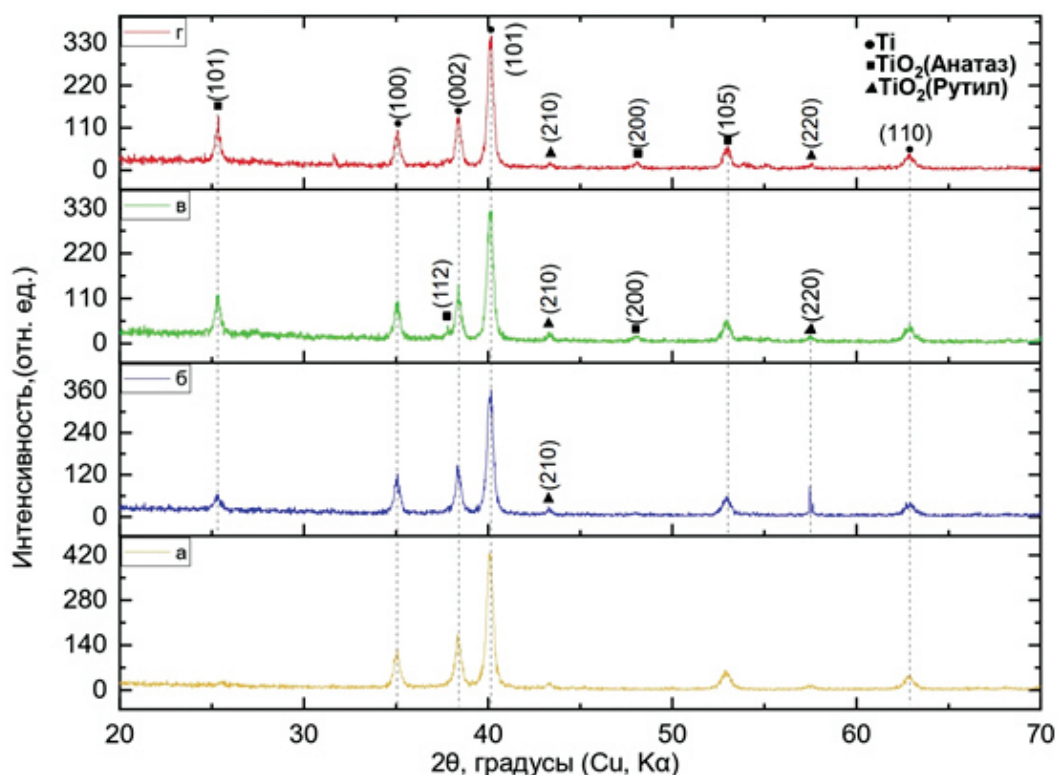


Рисунок 4. Дифрактограмма образца до и после нанесения МДО-покрытий в различных электролитах: а) титан (исходный); б) Na₃PO₄+ ГА+КОН; в) Na₃HPO₄+ГА; г) Na₃PO₄+ГА

4. Выводы

Методом микродугового оксидирования на поверхности титана были получены покрытия диоксида титана TiO_2 в модификации рутила и анатаза. Был исследован процесс формирования МДО покрытий в анодном режиме в течение 10 минут в различных электролитах на основе фосфорной кислоты, ортофосфата натрия, гидроксида калия и гидроксиапатита. Результаты рентгенофазового анализа не показали существенных изменений фазового состава исследуемых покрытий. Эксперименты по изучению влияния компонентов электролитов показали, что добавление в раствор КОН приводит к увеличению энергоемкости процесса и в результате образуется диоксид титана в модификации рутила, а также из-за интенсивности процесса газовой выделения образуется пористая структура покрытий. Таким образом, состав электролита является одним из определяющих факторов процесса МДО и имеет решающее значение для применения МДО. Кроме того, изменяя режимы процесса и составы электролитов при МДО можно получить покрытие с регулируемой пористостью.

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МНиВО РК AP13068451 «Получение многофункциональных кальций-фосфатных покрытий с наночастицами диоксида титана методом плазменно-электролитического оксидирования».

Список литературы

1. Владимиров Б. В. и др. Микродуговое оксидирование магниевых сплавов (обзор) // Электронная обработка материалов. – 2014. – №. 3. – С. 1-38.
2. Батышев К. А., Батышев А. И. Микродуговое оксидирование алюминиевых сплавов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. – 2016. – С. 212-214.
3. Нечаев Г. Г. Микродуговое оксидирование титановых сплавов в щелочных электролитах // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14. – №. 4. – С. 453-455.
4. Esmaili S. et al. Коррозионное поведение и биосовместимость покрытий с оксидом графена, полученных методом микродугового оксидирования на магниевом сплаве // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 25. – №. 4. – С. 122-138.
5. Савушкина С. В. и др. Исследование керамикоподобных покрытий, формируемых на алюминиевых композитах методом микродугового оксидирования // XIV-я международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия». 29-30 ноября 2016 года. – Litres, 2022. – С. 87.
6. Ситдиков В. М. и др. Снижение токсичности отработавших газов в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания // Труды НАМИ. – 2023. – №. 4. – С. 83-95.
7. Ramazanova Z. M. et al. Effect of microarc oxidation on the properties of aluminum alloy samples // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra. – 2023. – Т. 325. – №. 2. – С. 39-46.
8. Xiao-ming Wang, Fu-qin Zhang, Bioactive submicron-pore design of microarc oxidation coating on Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting method, Surface and Coatings Technology, Volume 444, 2022, 128696, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128696>.
9. Qiaoqin Guo, Dapeng Xu, Wei Yang, Yongchun Guo, Zhong Yang, Jianping Li, Peihu Gao, Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium, Surface and Coatings Technology, Volume 386, 2020, 125454, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125454>.
10. Дударева Н. Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – №. 3 (56). – С. 217-222.
11. Шаталов В. К., Штокал А. О., Блатов А. А. Микродуговое оксидирование поверхностей изделий вне ванны // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №. 3. – С. 1-14.

12. Дударева Н. Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – №. 3 (56). – С. 217-222.
13. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Ред. Суминов И.В. В 2-х томах. Т. 2. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
14. Choe, H.C.; Brantley, W.A. Electrochemical characteristics of Ti-6Al-4V after plasma electrolytic oxidation in solutions containing Ca, P, and Zn ions. Surf. Coat. Technol. 2017, 320, 458–466.
15. Zuo, Y.; Li, T.; Yu, P.; Zhao, Z.; Chen, X.; Zhang, Y.; Chen, F. Effect of graphene oxide additive on tribocorrosion behavior of MAO coatings prepared on Ti6Al4V alloy. Appl. Surf. Sci. 2019, 480, 26–34.
16. Li, T.; Li, L.; Qi, J.; Chen, F. Corrosion protection of Ti6Al4V by a composite coating with a plasma electrolytic oxidation layer and sol-gel layer filled with graphene oxide. Prog. Org. Coat. 2020, 144, 105632.
17. Нечаев Г. Г., Кошуру В. А. Баротермическое воздействие микроаркадных на покрытие, формируемое в процессе микродугового оксидирования //Физика и химия обработки материалов. – 2015. – №. 5. – С. 29-34.
18. Кошуру В. А. и др. Изменение фазово-структурного состояния и повышение механических характеристик газотермических покрытий на титане после проведения микродугового оксидирования //Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13. – №. 4. – С. 501-505.

А.Ж. Жасулан^{1*}, Б.К. Рахадиллов², Д.Р. Байжан¹, А.Б. Шынарбек¹, К.Д. Орманбеков¹

¹Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Семей, Қазақстан

²ЖШС «PlasmaScience», Өскемен, Қазақстан

Титанның микродоғалық тотығуы кезінде жабындардың түзілу процесін зерттеу

Аңдатпа. Жұмыста титан бетінде микро доғалық тотығу (МДТ) әдісімен қалыптасқан жабындардың құрылымдық-фазалық күйі зерттелді. Зерттеу барысында процесс параметрлері мен электролит құрамының өзгеруімен бірқатар эксперименттер жүргізілді. Әр түрлі аналитикалық әдістерді, соның ішінде электронды микроскопия мен рентгендік дифракцияны қолдана отырып, жабындардың морфологиялық және құрылымдық өзгерістері талданды. Титанның микро доғалық тотығуы анодты потенциостатикалық режимде 10 минут бойы фосфор қышқылы, натрий ортофосфаты, калий гидроксиді және гидроксипатит негізіндегі әртүрлі электролиттерде жүргізілді. МДТ-дан кейін беттің микрогеометриясы өзгермейді, яғни титанның бетінде қалыңдығы 5-7 мкм болатын жұқа жабын пайда болады. Сканерлеуші электронды микроскопия әдісімен жабын бетін зерттеу нәтижелері барлық зерттелетін жабындардың ең кеуекті бетінде калий гидроксиді (KOH) қосылған электролитте түзілген жабындар бар екенін көрсетті. Рентгендік дифракция нәтижелері анатаза мен рутил жабындардың негізгі фазасы екенін көрсетті. Электролиттің құрамы МДТ процесінің анықтаушы факторларының бірі болып табылады және МДТ қолдану үшін өте маңызды. Зерттеу нәтижелері титанның микро доғалық тотығуында жабындардың пайда болу процесін терең түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: микродоғалық тотығу, кальций-фосфат жабыны, физика-механикалық қасиеттері, электролит.

A. Zhassulan¹, B. Rakhadilov², D. Baizhan¹, A. Shynarbek¹, K. Ormanbekov¹

¹Shakarim University of Semey, Semey, Kazakhstan

²LLP PlasmaScience, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Investigation of the process of coating formation during microarc oxidation of titanium

Abstract. The structural and phase states of coatings formed on the surface of titanium by the method of microarc oxidation (MAO) are investigated. In the course of the study, a series of experiments were conducted with varying process parameters and electrolyte composition. Morphological and structural changes of the coatings were analyzed using various analytical methods, including electron microscopy

and X-ray diffraction. Microarc oxidation of titanium was carried out in anodic potentiostatic mode for 10 minutes in various electrolytes based on phosphoric acid, sodium orthophosphate, potassium hydroxide and hydroxyapatite. After the MAO, the microgeometry of the surface does not change, i.e. a thin coating with a thickness of 5-7 microns is formed on the surface of titanium. The results of the examination of the coating surface by scanning electron microscopy showed that the coatings formed in an electrolyte with the addition of potassium hydroxide (KOH) have the most porous surface of all the coatings studied. The results of X-ray diffraction showed that anatase and rutile are the main phase in coatings. The composition of the electrolyte is one of the determining factors of the MAO process and is crucial for the application of MAO. The results of the study allow us to gain a deep understanding of the process of coating formation during microarc oxidation of titanium.

Keywords: microarc oxidation, calcium-phosphate coating, physical and mechanical properties, electrolyte.

References

1. Vladimirov B.V. et al. Microarc oxidation of magnesium alloys (review) //Electronic processing of materials. – 2014. – № 3. – Pp. 1-38.
2. Batyshev K. A., Batyshev A. I. Microarc oxidation of aluminum alloys //Modern technologies in mechanical engineering and foundry production. - 2016. – pp. 212-214.
3. Nechaev G. G. Microarc oxidation of titanium alloys in alkaline electrolytes //Condensed media and interphase boundaries. - 2012. – Vol. 14. – No. 4. – pp. 453-455.
4. Esmaili S. et al. Corrosion behavior and biocompatibility of coatings with graphene oxide obtained by microarc oxidation on magnesium alloy //Physical Mesomechanics. – 2022. – Vol. 25. – No. 4. – pp. 122-138.
5. Savushkina S. V. et al. Investigation of ceramic-like coatings formed on aluminum composites by microarc oxidation //XIV-th International Scientific and Technical Conference “Quick-hardened materials and coatings”. November 29-30, 2016. – Leters, 2022. – p. 87.
6. Sitdikov V. M. et al. Reducing the toxicity of exhaust gases in the combustion chamber of an internal combustion engine //Works by US. – 2023. – № 4. – Pp. 83-95.
7. Ramazanova Z. M. et al. Effect of microarc oxidation on the properties of aluminum alloy samples //Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra. – 2023. – Vol. 325. – No. 2. – pp. 39-46.
8. Xiao-ming Wang, Fu-qin Zhang, Bioactive submicron-pore design of microarc oxidation coating on Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting method, Surface and Coatings Technology, Volume 444, 2022, 128696, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128696>.
9. Qiaoqin Guo, Dapeng Xu, Wei Yang, Yongchun Guo, Zhong Yang, Jianping Li, Peihu Gao, Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium, Surface and Coatings Technology, Volume 386, 2020, 125454, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125454>.
10. Dudareva N. Y. Influence of microarc oxidation modes on the properties of the formed surface // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. – 2013. – T. 17. – № 3 (56). – Pp. 217-222.
11. Shatalov V. K., Shtokal A. O., Blatov A. A. Microarc oxidation of surfaces of products outside the bath //Mechanical engineering and computer technology. - 2015. – No. 3. – pp. 1-14.
12. Dudareva N. Y. Influence of microarc oxidation modes on the properties of the formed surface // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. – 2013. – T. 17. – № 3 (56). – Pp. 217-222.
13. Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V. et al. Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys / Ed. Suminov I.V. In 2 volumes. Vol. 2. M.: Technosphere, 2011. 512 p.
14. Choe, H.C.; Brantley, W.A. Electrochemical characteristics of Ti-6Al-4V after plasma electrolytic oxidation in solutions containing Ca, P, and Zn ions. Surf. Coat. Technol. 2017, 320, 458–466.
15. Zuo, Y.; Li, T.; Yu, P.; Zhao, Z.; Chen, X.; Zhang, Y.; Chen, F. Effect of graphene oxide additive on tribocorrosion behavior of MAO coatings prepared on Ti6Al4V alloy. Appl. Surf. Sci. 2019, 480, 26–34.
16. Li, T.; Li, L.; Qi, J.; Chen, F. Corrosion protection of Ti6Al4V by a composite coating with a plasma electrolytic oxidation layer and sol-gel layer filled with graphene oxide. Prog. Org. Coat. 2020, 144, 105632.
17. Nechaev G. G., Koshuro V. A. Barothermal effect of micro-discharges on the coating formed in the process of micro-arc oxidation //Physics and chemistry of materials processing. – 2015. – № 5. – Pp. 29-34.
18. Koshuro V. A. et al. Changing the phase-structural state and increasing the mechanical characteristics of gas-thermal coatings on titanium after microarc oxidation //Fundamental problems of modern materials science. - 2016. – Vol. 13. – No. 4. – pp. 501-505.

Сведения об авторах:

А.Ж. Жасулан – магистрант, Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан.

Б.К. Рахадиллов – PhD, ассоциированный профессор, ТОО «PlasmaScience», ул. Серикбаева, 37, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Д.Р. Байжан – докторант, Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан.

А.Б. Шынарбек – магистрант, Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан.

К.Д. Орманбеков – магистрант, Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан.

А.Ж. Жасулан – магистрант, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Глинки көш., 20А, Семей, Қазақстан.

Б.К. Рахадиллов – PhD, қауымдастырылған профессор, «PlasmaScience» ЖШС, Серікбаев көш., 37, Өскемен, Қазақстан.

Д.Р. Байжан – докторант, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Глинки көш., 20А, Семей, Қазақстан.

А.Б. Шынарбек – магистрант, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Глинки көш., 20А, Семей, Қазақстан.

К.Д. Орманбеков – магистрант, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Глинки көш., 20А, Семей, Қазақстан.

A. Zhassulan – Master’s student, Shakarim University, 20A Glinki str., Semey, Kazakhstan.

B. Rakhadilov – PhD, Associate Professor, PlasmaScience LLP, 37 Serikbayev str., Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

D. Baizhan – PhD student, Shakarim University, 20A Glinki str., Semey, Kazakhstan.

A. Shynarbek – Master’s student, Shakarim University, 20A Glinki str., Semey, Kazakhstan.

K. Ormanbekov – Master’s student, Shakarim University, 20A Glinki str., Semey, Kazakhstan.