

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-46](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-46)

МРНТИ: 55.22.23



А.Ж. Жасұлан¹, А.Б. Леонидова¹, Ж. Турар², Ж.Ә. Бақыт¹

¹Шәкәрім университет, Инжиниринговый центр,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Университет Сакарья,
54050, Турция, г. Сакарья, ул. Академийолу, 5-20

*e-mail: ainur.zhassulan.99@mail.ru

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТРИБОКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Аннотация: Исследование посвящено детальному анализу воздействия уровня напряжения, применяемого в процессе микродугового оксидирования, на трибокоррозионные свойства кальций-фосфатных покрытий, формируемых на титановых подложках. В работе рассматриваются различные значения напряжения (100 В, 200 В, 300 В), которые использовались для создания покрытий с уникальными морфологическими, структурными и физико-химическими характеристиками. Эти особенности, в свою очередь, оказывают значительное влияние на механические свойства покрытий, их износостойкость и коррозионную стойкость. Методология исследования включает профилометрию для детального анализа поверхностной текстуры, измерение микротвердости для оценки механических характеристик, трибологические испытания с целью изучения устойчивости к износу, а также потенциодинамические исследования в физиологическом растворе, позволяющие оценить уровень коррозионной стойкости покрытий. Полученные результаты дадут возможность глубже понять механизмы влияния параметров микродугового оксидирования на процесс формирования кальций-фосфатных покрытий и их эксплуатационные характеристики. Это, в свою очередь, будет полезно для разработки новых материалов с улучшенными функциональными свойствами, которые могут найти широкое применение в биомедицинской сфере, включая производство имплантатов, а также в промышленности, где требуется высокая коррозионная стойкость покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, кальций-фосфатные покрытия, титан, трибология, коррозия, напряжение, твердость.

Введение

В современном инженерном мире поверхностные технологии становятся ключевым фактором для улучшения свойств материалов и повышения их производительности в различных областях применения. Метод микродугового оксидирования (МДО) представляет собой важный инструмент в создании высокофункциональных поверхностных покрытий на металлических материалах [1-3].

Одним из перспективных направлений применения метода МДО является модификация титановых сплавов для биомедицинских целей. Титан и его сплавы широко используются в производстве имплантатов благодаря их высокой коррозионной стойкости, биосовместимости и механической прочности [4-6]. Однако их функциональность может быть значительно улучшена путем нанесения кальций-фосфатных покрытий, обладающих высокой биологической активностью и способствующих остеоинтеграции [7-9]. В частности, трибокоррозионные свойства таких покрытий играют важную роль в долговечности и надежности имплантатов, так как в организме они подвергаются одновременно механическим и химическим нагрузкам [10-12].

В литературе представлено множество исследований, посвященных методам формирования кальций-фосфатных покрытий на титановых сплавах. Различные подходы,

включая химическое осаждение, анодное оксидирование, газотермическое напыление и гидротермальную обработку, продемонстрировали свою эффективность в улучшении биосовместимости и коррозионной стойкости титановых имплантатов [13-15]. Однако именно метод МДО привлекает внимание исследователей благодаря его способности формировать прочные, пористые и адгезионно стойкие покрытия с регулируемым фазовым составом [16-17].

Одним из важных параметров процесса МДО является напряжение, которое оказывает значительное влияние на морфологию, пористость, толщину и кристаллическую структуру покрытий. Эти характеристики, в свою очередь, определяют механические и трибокоррозионные свойства покрытий, такие как твердость, износостойкость и устойчивость к коррозии в агрессивных биологических средах [18-19]. Тем не менее, влияние напряжения на трибокоррозионные характеристики кальций-фосфатных покрытий остается недостаточно изученным, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Целью данного исследования является систематическое изучение влияния различных режимов напряжения в процессе МДО на формирование кальций-фосфатных покрытий на титановых подложках и оценка их трибокоррозионных свойств.

Настоящее исследование направлено на определение оптимальных условий МДО для формирования кальций-фосфатных покрытий с улучшенными трибокоррозионными свойствами, а также на получение глубокого понимания механизмов, лежащих в основе этих изменений. Ожидается, что результаты данного исследования позволят разработать более эффективные методы поверхностной обработки титановых имплантатов, что, в свою очередь, повысит их долговечность и надежность в биомедицинских приложениях.

Методы исследования

Нанесение покрытий методом МДО проведено на импульсном источнике питания-выпрямителе КР-НІ-F-40А600V (рисунок 1). Устройство МДО состоит из программируемого импульсного источника питания, гальванической охлаждающей ванны, набора электродов (рис. 1). В целом рабочая конструкция для МДО состоит из: силового оборудования- источника питания; ванны, в которых производится подготовка, обработка и промывка поверхности; вспомогательное оборудование – станции охлаждения. Параметры процесса МДО для данной работы представлены в таблице 1. В данном исследовании использовались образцы титана VT1-0 размером 2 × 2 × 2 см. Перед проведением МДО поверхности были предварительно отшлифованы абразивными материалами (размер зерен P800-P1200) для устранения грубых неровностей и обеспечения однородности поверхности.



Рисунок 1 – Импульсный источник питания-выпрямитель КР-НІ-F-40А600V

Таблица 1 – Режимы МДО

Наименование	Состав электролита	Напряжение, В	Частота, Гц	Время, сек
№1	Na ₂ HPO ₄ +гидроксиапатит (ГА)	100	100	600
№2	Na ₂ HPO ₄ +гидроксиапатит (ГА)	200	100	600
№3	Na ₂ HPO ₄ +гидроксиапатит (ГА)	300	100	600

Морфологию поверхности покрытий рассмотрели на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA четвертого поколения с термоэмиссионным вольфрамовым катодом. Шероховатость покрытий измеряли с помощью профилометра NY2300 Anytester. Определение твердости проводили с использованием измерительной системы FISCHERSCOPE HM2000. Трибологические свойства покрытия оценивались с использованием трибометра Anton Paar TRB³ по схеме шар-диск. Испытания проводились при следующих условиях: нагрузка до 3 Н, скорость – 2,5 см/с, радиус – 2 мм, радиус шара (контртело Si₃N₄) – 3 мм. Коррозионные испытания проводились потенциодинамическим методом с помощью патенциостата-гальваностата в 3,5% растворе NaCl при температуре ±25°C.

Результаты и обсуждение

Изменение цвета образцов титана после МДО указывает на образование оксидного слоя на поверхности (рис. 2). Различные цвета, являются результатом изменений толщины оксидного слоя, на которую влияет напряжение, приложенное во время процесса МДО. На рис.2б показан образец с фиолетово-синим цветом. Более низкие напряжения, как правило, приводят к образованию тончайших оксидных слоев, что часто приводит к появлению цветов в фиолетовой или синей части спектра из-за тонкопленочных помех. На рис. 2в показан образец с зеленоватым оттенком. При таком промежуточном напряжении обычно образуется более тонкий оксидный слой, чем при обработке 300 В, что приводит к другому цвету интерференции.

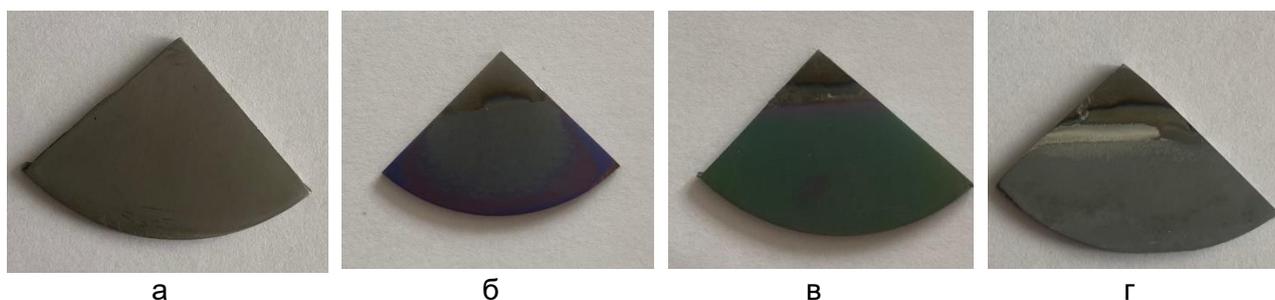


Рисунок 2 – Образцы до и после МДО
а) исходный; б) № 1; в) № 2; г) № 3

Результаты коэффициента трения и механических свойств образцов до и после МДО представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследований

Наименование	HV _{0,1}	Шероховатость, мкм	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания
Исходный титан	151,3±1,0	2,13±0,5	0,773	0,01578 мм ³ /мН
№1	160,1±2,8	2,54±0,4	0,453	0,003724 мм ³ /мН
№2	198,1±3,4	2,96±0,4	0,228	0,002317 мм ³ /мН
№3	296,8±1,3	3,03±0,2	0,102	0,001925 мм ³ /мН

На СЭМ изображениях (рис. 3) показана морфология кальций-фосфатных покрытий, сформированных при различных напряжениях: 100 В (а), 200 В (б) и 300 В (в).

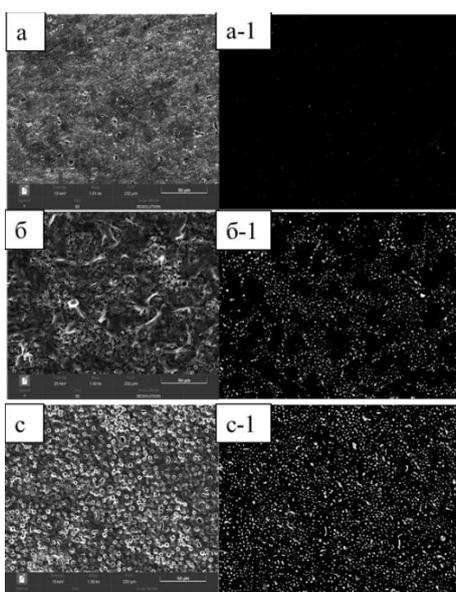


Рисунок 3 – СЭМ снимки образцов после МДО
а) № 1; б) № 2; с) № 3

Пористость покрытий: а – 1) № 1; б – 1) № 2; с – 1) № 3

Соответствующие бинарные изображения (а-1, б-1, в-1) демонстрируют распределение пор в покрытиях, что позволяет количественно оценить пористость. При напряжении 100 В (изображения а и а-1) наблюдается относительно гладкая поверхность с минимальным количеством пор, что свидетельствует о недостаточном развитии пористой структуры покрытия. При увеличении напряжения до 200 В (изображения б и б-1) пористость покрытия значительно возрастает, появляются выраженные поры различного размера. На изображениях в и в-1 (300 В) фиксируется еще более выраженная пористая структура с равномерным распределением пор по всей поверхности покрытия. Это связано с повышенной интенсивностью разрядов при увеличении напряжения, что способствует образованию более пористого слоя [20].

На рисунке 4 представлены поляризационные кривые титана до и после МДО. Черная кривая показывает электрохимическое поведение исходной титановой подложки. Заметные шумы и неровности на этой кривой указывают на неоднородность поверхности и нестабильность формирования пассивной пленки. Исходная титановая кривая задает точку отсчета для оценки эффекта покрытий, полученных при различных напряжениях. Красная кривая для образца № 1, обработанного напряжением 100 В, расположена выше «исходной» кривой. Покрытие, нанесенное при этом напряжении, демонстрирует сдвиг в сторону более положительного потенциала, но также демонстрирует увеличение плотности тока, что указывает на более активное электрохимическое поведение. Это может свидетельствовать об образовании менее защитного оксидного слоя по сравнению с другими образцами с покрытием. Синяя кривая для образца № 2, обработанного напряжением 200 В, показывает более отрицательный потенциал, чем «исходный», и образец № 1 с пониженной плотностью тока. Это указывает на более благородное поведение и предполагает образование более стабильного и защитного оксидного слоя при таком напряжении, обеспечивающего лучшую коррозионную стойкость, чем у «исходного» титана и образца, обработанного 100 В. Зеленая кривая для образца №3, обработанного напряжением 300 В, показывает самый отрицательный потенциал и самую низкую плотность тока среди образцов. Значительный сдвиг в сторону отрицательных потенциалов и снижение уровня шума свидетельствуют о том, что было сформировано высокозащитное покрытие. Низкая плотность тока указывает на превосходную коррозионную стойкость, подразумевая, что оксидный слой, образующийся при таком высоком напряжении, является наиболее эффективным барьером против электролита

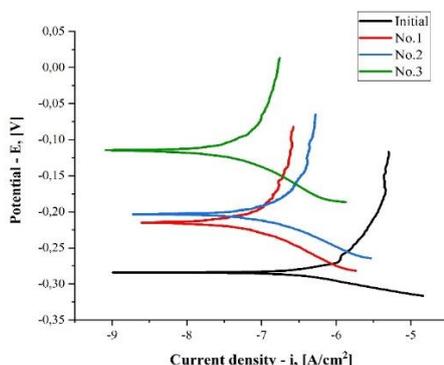


Рисунок 4 – Поляризационные кривые титана до и после МДО

Заключение

Настоящее исследование было направлено на изучение влияния напряжения микродугового оксидирования на трибокоррозионные свойства кальций-фосфатных покрытий, сформированных на титановых сплавах. Проведенные эксперименты позволили установить закономерности изменения морфологии и эксплуатационных характеристик покрытий в зависимости от применяемого напряжения. Показано, что с увеличением напряжения от 100 до 300 В наблюдается формирование более выраженной пористой структуры, что может оказывать влияние на долговечность и износостойкость покрытий. Анализ трибологических и коррозионных свойств продемонстрировал, что оптимальный баланс между механической прочностью и коррозионной стойкостью достигается при определенных параметрах МДО, что подтверждается экспериментальными данными. Полученные результаты свидетельствуют о том, что регулирование напряжения при МДО

является эффективным инструментом для управления свойствами кальций-фосфатных покрытий, что может найти применение в разработке функциональных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Plasma formation mechanism of microarc oxidation / T. Mi et al // *Electrochimica Acta*. – 2014. – Vol. 123. – P. 369-377.
2. Review of the biocompatibility of micro-arc oxidation coated titanium alloys / Y. Wang et al // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 85. – P. 640-652.
3. Model concepts on the mechanism of microarc oxidation of metal materials and the control over this process / A.G. Rakoch et al // *Protection of Metals*. – 2006. – Vol. 42. – P. 158-169.
4. Effect of microplasma modes and electrolyte composition on micro-arc oxidation coatings on titanium for medical applications / O.P. Terleeva et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, № 6. – P. 1723-1729.
5. Corrosion behavior and biological activity of micro arc oxidation coatings with berberine on a pure magnesium surface / L. Mu et al // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, № 9. – P. 837.
6. The effect of TiO₂ coating on biological NiTi alloys after micro-arc oxidation treatment for corrosion resistance / E.E. Sukuroglu et al // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. – 2017. – Vol. 231, № 8. – P. 699-704.
7. Tribo-corrosion mechanisms of CoCrMo alloy coatings for artificial hip joints: Influence of carbide microstructure and third body phases / R. Pourzal et al // *Acta Biomaterialia*. – 2015. – Vol. 11. – P. 471-484.
8. Tribocorrosion behavior of biomedical titanium in artificial saliva: Influence of applied potential / J. Zhang et al // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 139. – P. 106168.
9. In vitro tribocorrosion behavior of titanium alloys for biomedical applications: Influence of applied load and reciprocating sliding motion / A. Ibrahim et al // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – P. 106264.
10. Kumar A. Surface modification of Ti6Al4V alloy via advanced coatings: mechanical, tribological, corrosion, wetting, and biocompatibility studies / A. Kumar, G. Singh // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – P. 174418.
11. Tribo-Corrosion Behavior of Implants / M. Murugan et al // *Tribo-Behaviors of Biomaterials and their Applications*. – CRC Press. – 2024. – P. 71-93.
12. Wood R.J.K. Coatings and surface modification of alloys for tribo-corrosion applications / R.J.K. Wood, P. Lu // *Coatings*. – 2024. – Т. 14, № 1. – P. 99.
13. Effect of microarc oxidation voltage on the tribological properties of Ti6Al4V alloy / X. Li, et al // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 139. – P. 105934.
14. The growth and characterisation of oxide coatings on titanium by micro-arc techniques / G. Skeldon et al // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. – Vol. 116-119. – P. 1023-1030.
15. Effect of aluminum by magnetron sputtering on the micro-arc oxide film layer of titanium alloy / C. Wang et al // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2024. – P. 1-9.
16. Особенности микродугового оксидирования титана в электролите на основе гидроксида натрия / К.О. Галкин и др. // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. – 2015. – № 3. – С. 51-54.
17. Чернов А.А. Исследование структуры и механических свойств покрытий, полученных методом микродугового оксидирования титана / А.А. Чернов, А.А. Шибанов // *Вестник Челябинского государственного университета*. – 2012. – № 24(268). – С. 99-102.
18. Морфология и физико-химические свойства покрытий, полученных методом микродугового оксидирования титана в различных электролитах / В.А. Лавров и др. // *Материалы конференции «Физика и техника высоких давлений»*. – 2017. – С. 168-169.
19. Исследование структуры и механических свойств покрытий, полученных методом микродугового оксидирования титана в электролите на основе гидроксида натрия / В.В. Барашков и др. // *Материалы Международной научной конференции «Современные технологии в материаловедении, машиностроении и транспорте»*. – 2013. – С. 220-222.
20. Chemical incorporation of SiO₂ into TiO₂ layer by green plasma enhancer and quencher agents for synchronized improvements in the protective and bioactive properties / M. Kaseem et al // *Nano Materials Science*. – 2024. – Т. 6, № 5. – P. 596-610.

References

1. Plasma formation mechanism of microarc oxidation / T. Mi et al // *Electrochimica Acta*. – 2014. – Vol. 123. – P. 369-377. (In English).
2. Review of the biocompatibility of micro-arc oxidation coated titanium alloys / Y. Wang et al // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 85. – P. 640-652. (In English).
3. Model concepts on the mechanism of microarc oxidation of metal materials and the control over this process / A.G. Rakoch et al // *Protection of Metals*. – 2006. – Vol. 42. – P. 158-169. (In English).
4. Effect of microplasma modes and electrolyte composition on micro-arc oxidation coatings on titanium for medical applications / O.P. Terleeva et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, № 6. – P. 1723-1729. (In English).
5. Corrosion behavior and biological activity of micro arc oxidation coatings with berberine on a pure magnesium surface / L. Mu et al // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, № 9. – P. 837. (In English).
6. The effect of TiO₂ coating on biological NiTi alloys after micro-arc oxidation treatment for corrosion resistance / E.E. Sukuroglu et al // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. – 2017. – Vol. 231, № 8. – P. 699-704. (In English).
7. Tribo-corrosion mechanisms of CoCrMo alloy coatings for artificial hip joints: Influence of carbide microstructure and third body phases / R. Pourzal et al // *Acta Biomaterialia*. – 2015. – Vol. 11. – P. 471-484. (In English).
8. Tribocorrosion behavior of biomedical titanium in artificial saliva: Influence of applied potential / J. Zhang et al // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 139. – P. 106168. (In English).
9. In vitro tribocorrosion behavior of titanium alloys for biomedical applications: Influence of applied load and reciprocating sliding motion / A. Ibrahim et al // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 147. – P. 106264. (In English).
10. Kumar A. Surface modification of Ti6Al4V alloy via advanced coatings: mechanical, tribological, corrosion, wetting, and biocompatibility studies / A. Kumar, G. Singh // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – R. 174418. (In English).
11. Tribo-Corrosion Behavior of Implants / M. Murugan et al // *Tribo-Behaviors of Biomaterials and their Applications*. – CRC Press. – 2024. – R. 71-93. (In English).
12. Wood R.J.K. Coatings and surface modification of alloys for tribo-corrosion applications / R.J.K. Wood, P. Lu // *Coatings*. – 2024. – T. 14, № 1. – R. 99. (In English).
13. Effect of microarc oxidation voltage on the tribological properties of Ti6Al4V alloy / X. Li, et al // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 139. – P. 105934. (In English).
14. The growth and characterisation of oxide coatings on titanium by micro-arc techniques / G. Skeldon et al // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. – Vol. 116-119. – P. 1023-1030. (In English).
15. Effect of aluminum by magnetron sputtering on the micro-arc oxide film layer of titanium alloy / S. Wang et al // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2024. – R. 1-9. (In English).
16. Osobennosti mikrodogovogo oksidirovaniya titana v ehlektrolite na osnove gidroksida natriya / K.O. Galkin i dr. // *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova*. – 2015. – № 3. – S. 51-54. (In Russian).
17. Chernov A.A. Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoistv pokrytii, poluchennykh metodom mikrodogovogo oksidirovaniya titana / A.A. Chernov, A.A. Shibanov // *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*. – 2012. – № 24(268). – S. 99-102. (In Russian).
18. Morfologiya i fiziko-khimicheskie svoistva pokrytii, poluchennykh metodom mikrodogovogo oksidirovaniya titana v razlichnykh ehlektrolitakh / V.A. Lavrov i dr. // *Materialy konferentsii «Fizika i tekhnika vysokikh davlenii»*. – 2017. – S. 168-169. (In Russian).
19. Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoistv pokrytii, poluchennykh metodom mikrodogovogo oksidirovaniya titana v ehlektrolite na osnove gidroksida natriya / V.V. Barashkov i dr. // *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sovremennye tekhnologii v materialovedenii, mashinostroenii i transportE»*. – 2013. – S. 220-222. (In Russian).
20. Chemical incorporation of SiO₂ into TiO₂ layer by green plasma enhancer and quencher agents for synchronized improvements in the protective and bioactive properties / M. Kaseem et al // *Nano Materials Science*. – 2024. – T. 6, № 5. – R. 596-610. (In English).

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МНУВО РК BR24992870 «Обеспечение устойчивого развития машиностроительной отрасли Казахстана на основе разработки, научного обоснования и реализации промышленных технологий инженерии поверхности».

А.Ж. Жасұлан¹, А.Б. Леонидова¹, Ж. Турар², Ж.Ә. Бақыт¹

¹Шәкәрім университеті, Инженерлік орталық,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., көш. Глинка, 20 А

²Сакарья Университеті,
54050, Түркия, Сакарья қ., Академиолу к-сі, 5-20

*e-mail: ainur.zhassulan.99@mail.ru

МИКРО ДОҒАЛЫҚ ТОТЫҒУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТРИБОКОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ КЕРНЕУДІҢ ӘСЕРІ

Зерттеу микро доғалық тотығу процесінде қолданылатын кернеу деңгейінің титан субстраттарында түзілетін кальций-фосфат жабындарының трибокоррозиялық қасиеттеріне әсерін егжей-тегжейлі талдауға арналған. Жұмыста бірегей морфологиялық, құрылымдық және физика-химиялық сипаттамалары бар жабындарды жасау үшін пайдаланылған әртүрлі кернеу мәндері (100В, 200В, 300в) қарастырылады. Бұл ерекшеліктер, өз кезегінде, жабындардың механикалық қасиеттеріне, олардың тозуға төзімділігіне және коррозияға төзімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Зерттеу әдістемесі беткі құрылымды егжей-тегжейлі талдауға арналған профометрияны, механикалық өнімділікті бағалау үшін микроқаттылықты өлшеуді, тозуға төзімділікті зерттеу мақсатында трибологиялық сынақтарды және жабындардың коррозияға төзімділік деңгейін бағалауға мүмкіндік беретін тұзды ерітіндідегі потенциодинамикалық зерттеулерді қамтиды. Алынған нәтижелер микро доғалық тотығу параметрлерінің кальций-фосфат жабындарының түзілу процесіне әсер ету механизмдерін және олардың пайдалану сипаттамаларын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде биомедициналық салада, соның ішінде импланттар өндірісінде, сондай-ақ жабындардың коррозияға төзімділігі жоғары өнеркәсіпте кеңінен қолданылуы мүмкін жақсартылған функционалдық қасиеттері бар жаңа материалдарды әзірлеу үшін пайдалы болады.

Түйін сөздер: микро доғалық тотығу, кальций-фосфат жабындары, титан, трибология, коррозия, кернеу, қаттылық.

A. Zhasulan¹, A. Leonidova¹, Zh. Turar², Zh. Bakyt¹

¹Shakarim University, Engineering Center,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A

²Sakarya University,
54050, Turkey, Sakarya, Akademiyolu str., 5-20

*e-mail: ainur.zhassulan.99@mail.ru

INFLUENCE OF VOLTAGE ON TRIBOCORROSIVE PROPERTIES OF CALCIUM PHOSPHATE COATINGS OBTAINED BY MICROARC OXIDATION

The study is devoted to a detailed analysis of the effect of the voltage level used in the microarc oxidation process on the tribocorrosive properties of calcium phosphate coatings formed on titanium substrates. The paper considers various voltage values (100 V, 200 V, 300 V), which were used to create coatings with unique morphological, structural and physicochemical characteristics. These features, in turn, have a significant impact on the mechanical properties of the coatings, their wear resistance and corrosion resistance. The research methodology includes profilometry for detailed analysis of surface texture, microhardness measurement for evaluation of mechanical properties, tribological tests for wear resistance, and potentiodynamic studies in saline solution to evaluate the level of corrosion resistance of coatings. The obtained results will provide an opportunity to better understand the mechanisms of influence of microarc oxidation parameters on the formation of calcium phosphate coatings and their performance characteristics. This, in turn, will be useful for the development of new materials with improved functional properties that can find wide application in the biomedical field, including the production of implants, as well as in industry where high corrosion resistance of coatings is required.

Key words: microarc oxidation, calcium phosphate coatings, titanium, tribology, corrosion, stress, hardness.

Сведения об авторах

Айнур Жасұланқызы Жасұлан* – докторант специальности «Техническая физика»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; Старший научный сотрудник Инжинирингового центра; e-mail: ainur.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Айым Бауыржанқызы Леонидова – докторант специальности «Техническая физика»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aiym.leonidova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2981-2041>.

Жанабай Турар – магистрант, Университет Сакарья, г. Сакарья, Турция; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Жанел Әділжанқызы Бақыт – Младший научный сотрудник Инжинирингового центра; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: bakytzhanel@gmail.com.

Авторлар туралы мәліметтер

Айнур Жасұланқызы Жасұлан* – «Техникалық физика» мамандығының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; Инженерлік орталықтың аға ғылыми қызметкері; e-mail: ainur.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Айым Бауыржанқызы Леонидова – «Техникалық физика» мамандығының докторанты; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aiym.leonidova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2981-2041>.

Жанабай Турар – Сакарья университетінің магистранты, Сакарья қ., Түркия; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Жанел Әділжанқызы Бақыт – Инжиниринг орталығының кіші ғылыми қызметкері; Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: bakytzhanel@gmail.com.

Information about the authors

Ainur Zhassulan* – PhD student in the specialty «Technical Physics»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Senior Researcher, Engineering Center; e-mail: ainur.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Aiym Leonidova – PhD student in the specialty «Technical Physics»; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aiym.leonidova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2981-2041>.

Zhangabay Turar – Master's student in Physics, Sakarya University, Sakarya, Turkey; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Zhanel Bakyt – Junior research fellow, Engineering Center; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bakytzhanel@gmail.com.

Поступила в редакцию 26.02.2025

Поступила после доработки 28.03.2025

Принята к публикации 31.03.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-47](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-47)

IRSTI: 29.35.15



K. Astemessova¹, M. Rymgaliyeva^{2*}

¹Satbayev Kazakh National Research Technical University,
050013, Republic of Kazakhstan Almaty, Satbayev street 22

²International School of Astana,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Turkestan Street 32/1

*e-mail: rymgalievamalika67@gmail.com

HOW MAY SIGNAL LOSS BE DECREASED AND ENCRYPTION IMPROVED BY QUANTUM ENTANGLEMENT IN SATELLITE COMMUNICATION

Abstract: *Satellite communication is a critical component of global connectivity, enabling data transmission across vast distances for applications such as telecommunications, navigation, and broadcasting. However, signal degradation due to atmospheric interference, scattering, and attenuation presents a significant challenge to maintaining reliable communication. This study explores the role of quantum entanglement in mitigating signal loss and improving encryption in satellite communication systems. By leveraging quantum key distribution (QKD) and quantum error correction techniques, secure and efficient data transmission can be achieved. Various strategies, including adaptive beamforming, higher frequency bands, satellite relays, and real-time atmospheric monitoring, are examined to enhance communication reliability. The integration of quantum communication with advanced signal processing techniques demonstrates potential*