

МАТЕРИАЛТАНУ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATERIALS SCIENCEDOI 10.51885/1561-4212_2022_1_100
MPHTI 55.22.23**Б.К. Рахадиллов^{1,3}, П. Ковалевский², Д.Р. Байжан³, Ж.Б. Сагдолдина¹**¹Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан²Вроцлавский университет науки и технологии, г. Вроцлав, Польша³Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: rakhadilov@mail.ru*

E-mail: sagdoldiba@mail.ru

E-mail: piotrus.kowalewski@gmail.com

E-mail: daryn.baizhan@mail.ru

E-mail: rakhadilov@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАН
Ti-6Al-4V МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ****Ti-6Al-4V ПЛАЗМАЛЫҚ ЭЛЕКТРОЛИТТІК ТОТЫҒУ ӘДІСІМЕН ЖАБЫНДАРДЫ
ЖАҒУ РЕЖИМДЕРІН ЗЕРТТЕУ****RESEARCH OF REGIMES OF APPLYING COATS BY THE METHOD OF PLASMA
ELECTROLYTIC OXIDATION ON Ti-6Al-4V**

Аннотация. В данной работе керамические покрытия были сформированы на титановом сплаве Ti6Al4V методом плазменно-электролитического оксидирования в электролитах с различным химическим составом. Оценивалось влияние электролита на макро- и микроструктуру, размер пор, фазовый состав и износостойкость покрытий. Использовались три типа электролита на основе соединений натрия, включая фосфат, гидроксид и силикат. Процессы плазменно-электролитического оксидирования проводились при фиксированном напряжении (270 В) в течение 5 минут. Результаты показали, что наиболее однородная структура с меньшей пористостью и большим количеством кристаллических фаз анатаза была получена в покрытии, приготовленном в электролите на основе силиката. Морфологию и фазовый состав образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновского дифрактометра соответственно.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое оксидирование, анатаз, рутил, структура, фаза.

Аңдатпа. Бұл жұмыста плазмалық электролиттік тотығу әдісімен Ti-6Al-4V титан қорытпасындағы керамикалық жабындар алынды. Плазмалық электролиттік тотығу әр түрлі химиялық құрамы бар электролиттерде жүргізілді және электролиттің макро- және микроқұрылымға әсерін, қуыстық мөлшерін, фазалық құрамын және жабындардың тозуға төзімділігін бағалады. Натрий қосылыстарына негізделген электролиттің үш түрі қолданылды, соның ішінде фосфат, гидроксид және силикат. Плазмалық электролиттік тотығу процесстері тіркелген кернеу кезінде (270 В) 5 минут ішінде жүргізілді. Нәтижелер көрсеткендей, кеуектілігі аз және көп кристалды фазалары бар ең біртекті құрылым силикат негізіндегі электролитте

дайындалған жабындыда алынған. Үлгілердің морфологиясы мен фазалық құрамы сәйкесінше сканерлейтін электронды микроскоп пен рентгендік дифрактометр көмегімен зерттелді.

Түйін сөздер: Плазмалық электролиттік тотығу, анатаза, рутил, құрылым, фаза

Abstract. In this work, ceramic coatings were formed on Ti6Al4V titanium alloy using a technique of plasma electrolytic oxidation. Plasma electrolytic oxidation was carried out in electrolytes with different chemical compositions and the effect of the electrolyte on the macro- and microstructure, pore size, phase composition and wear resistance of coatings was estimated. Three types of electrolyte based on sodium compounds were used, including phosphate, hydroxide, and silicate. The plasma electrolytic oxidation processes were carried out at a fixed voltage (270 V) for 5 minutes. The results showed that the most homogeneous structure with lower porosity and a large amount of crystalline anatase phases was obtained in the coating prepared in the silicate-based electrolyte. The morphology and phase composition of the samples were studied using a scanning electron microscope and an X-ray diffractometer, respectively.

Keywords: Plasma electrolytic oxidation, anatase, rutile, structure, phase.

Введение. Имплантаты, изготовленные из сплавов на основе титана, считаются предпочтительными по сравнению с другими материалами благодаря их биоинертным свойствам, отличным характеристикам коррозионной стойкости и высокой совместимости с костной тканью [1]. Недостатком применения титановых сплавов, в том числе и наиболее широко используемого в хирургии титанового сплава Ti-6Al-4V, является содержание вредных легирующих компонентов, а использованию чистого титана препятствует недостаточная прочность. Однако механическое несоответствие между стандартными немодифицированными титановыми имплантатами и окружающей костью может привести к плохой интеграции имплантата, усугублению поражения и длительному заживлению [2]. Таким образом, получение био-многослойных покрытий для имплантатов, имеющих высокие антибактериальные, адгезионные и трибологические характеристики, является одной из важнейших задач при производстве современных имплантатов. В настоящее время предложен ряд технологических подходов, направленных на модификацию поверхности имплантата. Это включает активацию поверхности и нанесение покрытий для улучшения адгезии кости к имплантату и, таким образом, усиления остеоинтеграции имплантата. В связи с этим в качестве выгодного подхода для улучшения адгезионных свойств было предложено осаждение покрытий из оксидов металлов (таких как TiO₂) на титановые имплантаты [3]. Таким образом, плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) является перспективным процессом для получения высокопористых поверхностей с высокой долей кристаллических фаз в оксидном слое на титановых сплавах. В целом, в процессах ПЭО используются слабощелочные и экологически чистые электролиты, содержащие силикатные, фосфатные анионы [4]. Процесс ПЭО осуществляется при более высоких напряжениях, чем напряжение пробоя диэлектрика покрытия. Следовательно, образуются каналы плазменного разряда с локальным диапазоном температур примерно от 1500 до 10000 °C [5]. Затем на поверхности во время роста покрытия устойчиво образуются короткоживущие микродисперсные заряды с падением света и газовым излучением. Эти воздействия позволяют образовывать оксидное покрытие [6]. Из-за вовлечения ионов электролита в оксидную пленку в процессах диффузии и электрофореза во время окисления ПЭО-покрытия содержат в основном оксид металла подложки и более сложные соединения компонентов электролита [7]. Кроме того, из-за высокого давления и температуры в каналах разряда ПЭО-покрытия могут содержать фазы, которые не образуются при обычном анодировании [8]. Другими преимуществами этой методики являются возможность нанесения покрытий на материалы сложной формы и низкая стоимость возможность нанесения покрытий на материалы сложной формы и низкая стоимость.

Однако кальций-фосфатные ПЭО-покрытия демонстрируют плохие трибологические

свойства, такие как сильная склонность к адгезии, высокие и нестабильные коэффициенты трения, низкое сопротивление износу при фреттинге. Поэтому представляет интерес модификация и прогрессирование свойств кальций-фосфатного ПЭО-покрытия путем включения в него компонентов, существующих в электролите. Включение нано- и микрочастиц в состав покрытий рассматривается как важнейшая стратегия повышения свойств покрытий и расширения диапазона их химического состава. Добавление нано- и микрочастиц в электролиты может оказывать существенное влияние на фазовый состав, микроструктуру, толщину и, следовательно, на коррозионные свойства ПЭО-покрытий на титане и его сплавах. В большинстве случаев частицы могут участвовать в ПЭО-покрытиях с помощью электрофоретической силы и механического перемешивания. Эти два подкрепления переносят отрицательно заряженные частицы, взвешенные в электролите, на проводящую подложку с противоположным зарядом. Затем частицы включаются в ПЭО-покрытия. Частицы, попадая, заполняя и герметизируя микропоры, уменьшают пористость ПЭО-покрытий в целом и тем самым модифицируют микроструктуру. Такая улучшенная микроструктура уменьшает проникновение деструктивных ионов из покрытия в подложку. Это приводит к повышению коррозионной стойкости ПЭО-покрытий. В результате многих исследований было изучено влияние добавления различных частиц на свойства ПЭО-покрытий на титане и его сплавах, но лишь немногие из этих работ изучали коррозионные свойства, а именно трибокоррозионные свойства.

По технологии, разработанной Dalian University of Technology (Китай), в качестве биоматериала получают нанопористую пленку диоксида титана в результате ПЭО в растворе тетраборат натрия [9]. Применение данного электролита и определенного режима процесса позволяют получать покрытие, обладающее превосходной смачиваемостью и устойчивостью к разрушению. Установлено, что образующийся диоксид титана – рутил.

Пензенским государственным университетом [10] запатентован способ ПЭО в режиме переменного тока в комбинированном электролите, содержащем 80-120 г/л силиката натрия, 5-10 г/л фосфата натрия и 5-15 г/л гидроксида натрия, продолжительностью 5-80 мин при плотности тока 5-30 А/дм² и напряжении 120-220 В. Согласно предлагаемому способу, силикат натрия в указанных пределах позволяет увеличить скорость роста покрытия, гидроксид натрия увеличивает микротвердость и снижает пористость покрытия.

Согласно ранее опубликованным работам, изменяя химический состав электролита, время окисления и электрические параметры (плотность, режим и частоту тока), методом ПЭО можно получать плёнки биосовместимого оксида – анатаза (TiO₂) и развить рельеф поверхности, чтобы благотворно влиять на остеоинтеграцию поверхности имплантата в организме реципиента

Материалы и методы исследования. В качестве материала подложки для обработки были выбраны образцы квадратной формы из титанового сплава Ti6Al4V размером 20 мм × 20 мм × 3 мм. Состав титанового сплава Ti6Al4V приведен в табл. 1. Образцы были отшлифованы и отполированы с использованием бумаги SiC с зернистостью от 100 до 2000 и пасты ГОИ (абразивная способность 0,3-0,1 мкм), промыты дистиллированной водой и высушены. Для нанесения покрытий использовались ванны ПЭО с различным составом, как показано в табл. 2. Кроме того, для повышения проводимости электролита во все ванны добавляли 4 г КОН (гидроксид калия). Образец Ti6Al4V действовал в качестве анода, контейнер из нержавеющей стали использовался в качестве катода. Процессы ПЭО выполнялись с использованием постоянного напряжения (270 В) в течение 5 минут. Источником питания служил мощный выпрямитель, дающий на выходе макси-мальное значение 360V/100A в виде постоянного тока. С помощью системы

охлаждения температура электролита во время экспериментов была охлаждена ниже 40 °С. Образцы промывали дистиллированной водой и сушили в потоке холодного воздуха после каждой обработки. Схематическое изображение установки обработки ПЭО показана на рис. 1.

Таблица 1. Химический состав титанового сплава Ti6Al4V (весовые проценты)

Ti	Al	V	Fe	C	O	N	H
88.5-92.5	5.5-6.5	3.5-4.5	<0.25	<0.08	<0.13	<0.05	<0.012

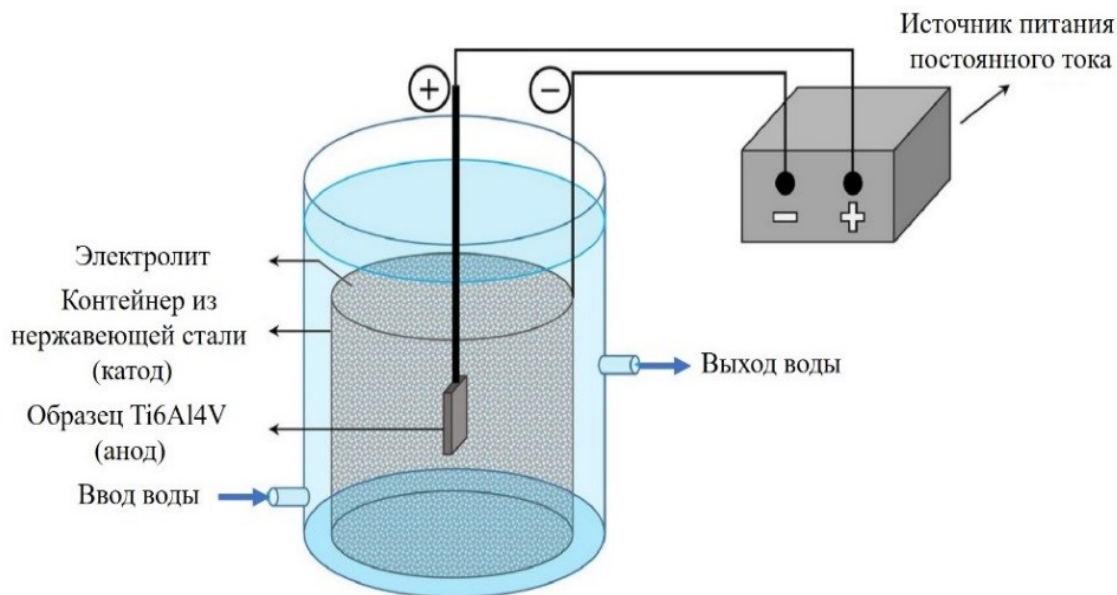


Рисунок 1. Схематическое изображение установки обработки ПЭО

Таблица 2. Состав электролита для процессов ПЭО

Код электролита	Состав электролита
№ 1	20 g L ⁻¹ NaOH
№ 2	20 g L ⁻¹ Na ₃ PO ₄
№ 3	20 g L ⁻¹ Na ₂ SiO ₃

Рентгеноструктурные исследования образцов выполняли на дифрактометре X'PertPRO (Philips Corporation, Netherlands). Съемку дифрактограмм проводили с использованием CuK α -излучения ($\lambda=2,2897$) при напряжении 40 кВ и токе 30 мА. Расшифровка дифрактограмм проводилась вручную с использованием стандартных методик и базы данных PDF-4, количественный анализ выполнялся с помощью программы Powder Cell 2.4. Морфологию поверхности изучали методом сканирующей электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA/LMU (Брно, Чешская Республика) с электронно-зондовой установкой для локального микроанализа. Площадь поверхности пор измерялась с помощью анализатора изображений (Altami, Санкт-Петербург, Российская Федерация). Трибологические испытания на износ при сухом скольжении проводились на высокотемпературном трибометре TRB³ (Anton Paar Srl, Песе, Швейцария).

Результаты и обсуждение. Химический состав электролита значительно влияет на ускорение пассивации металла и пробоя диэлектрика и, как следствие, на образование тонкой изолирующей пленки [4]. Поэтому здесь были выбраны различные электролиты разных оснований (фосфат, силикат и гидроксид). Фактически искровой разряд, известный как явление горения и экзотермическая реакция, содержащая окислитель, возникает в результате поглощения достаточного количества кислорода. Микродуговой разряд приводит к извержению расплавленных веществ из каналов разряда и последующему образованию микропор в форме кратеров на поверхности покрытия [7-8] (рис. 2).

Значения искровых напряжений, обусловленные природой электролитов (состав электролита), были различными для каждого электролита (табл. 2). Состав электролита влияет на интенсивность и размер микроразрядов и объем газовой выделенной различных электролитов. На поверхности образца, приготовленного в электролите № 1, было несколько темных черных пятен, которые могли быть вызваны большим размером и высокой интенсивностью образующихся искр в точках с низкой диэлектрической прочностью на поверхности покрытия во время процесса.

Морфология поверхности различных покрытий, сформированных на титановом сплаве Ti6Al4V, показана на рис. 2, 3. Ясно, что покрытия, изготовленные разными электролитами, демонстрировали совершенно разные микроструктуры. Из-за образования микропор в результате разрядов, сопровождающихся лавиной электронов на границе раздела электролита и оксидного слоя, все покрытия, полученные методом ПЭО, показали типичную структуру, которая содержала микропоры в форме кратеров. На самом деле, когда расплавленные оксиды покидают разрядные каналы и контактируют с окружающим электролитом, они быстро затвердевают, и в результате на поверхности покрытия образуются поры [6-10]. С другой стороны, в разрядных каналах образуется большое количество газа, который затем выделяется в электролит. На ранней стадии процесса ПЭО интенсивность искр и количество газа, образующегося в выпускных каналах, значительно выше. Из-за выброса газа расплавленные оксиды отбрасываются из выпускных каналов, они не могут полностью заполнить выпускные каналы, и, соответственно, образуется большое количество микропор. За счет уменьшения интенсивности искр в некоторой степени уменьшается объем газов, образующихся в разрядных каналах [11].

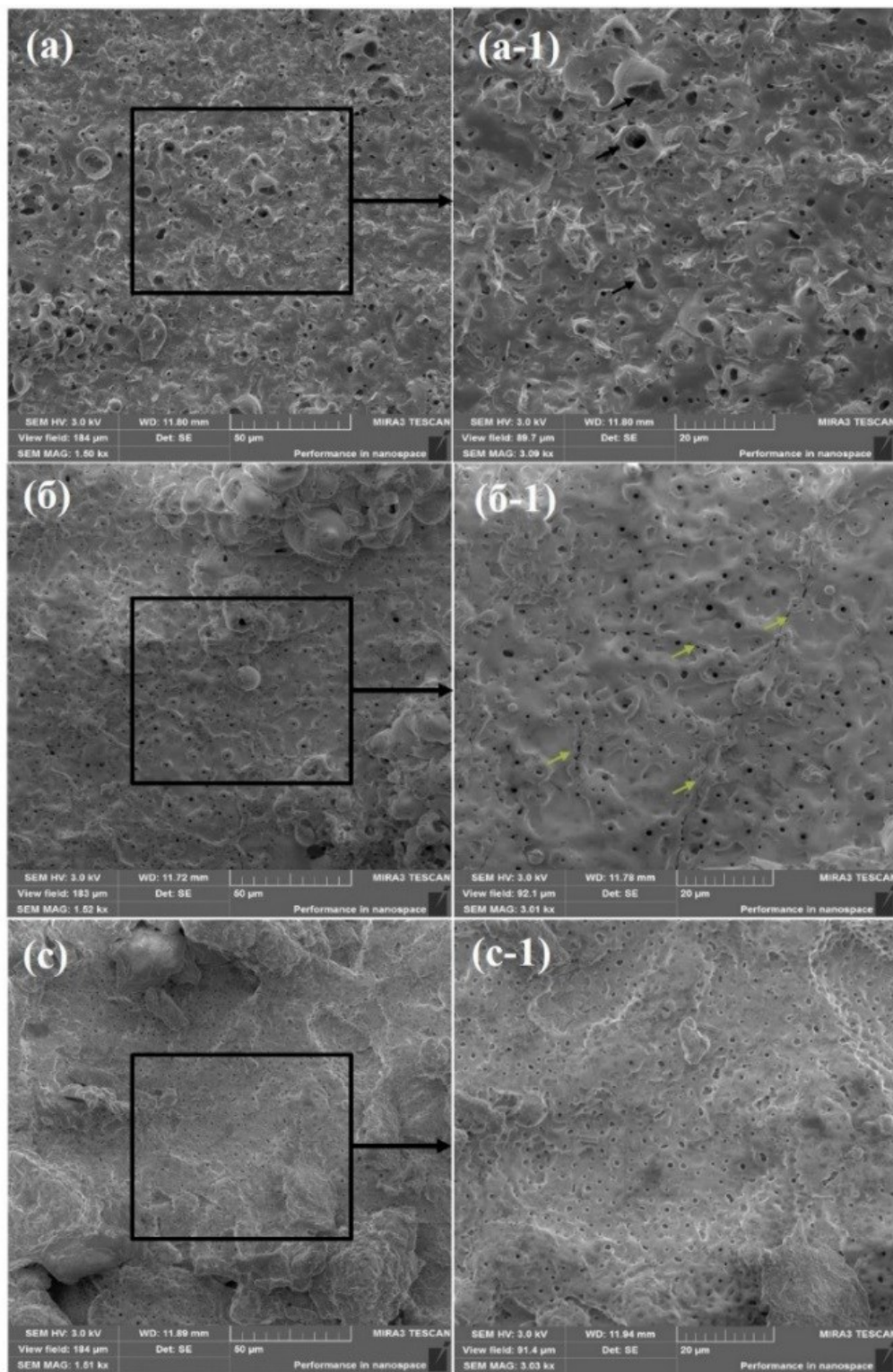


Рисунок 2. Морфология поверхности ПЭО-покрытий различных электролитов:

а – № 1; б – № 2; с – № 3

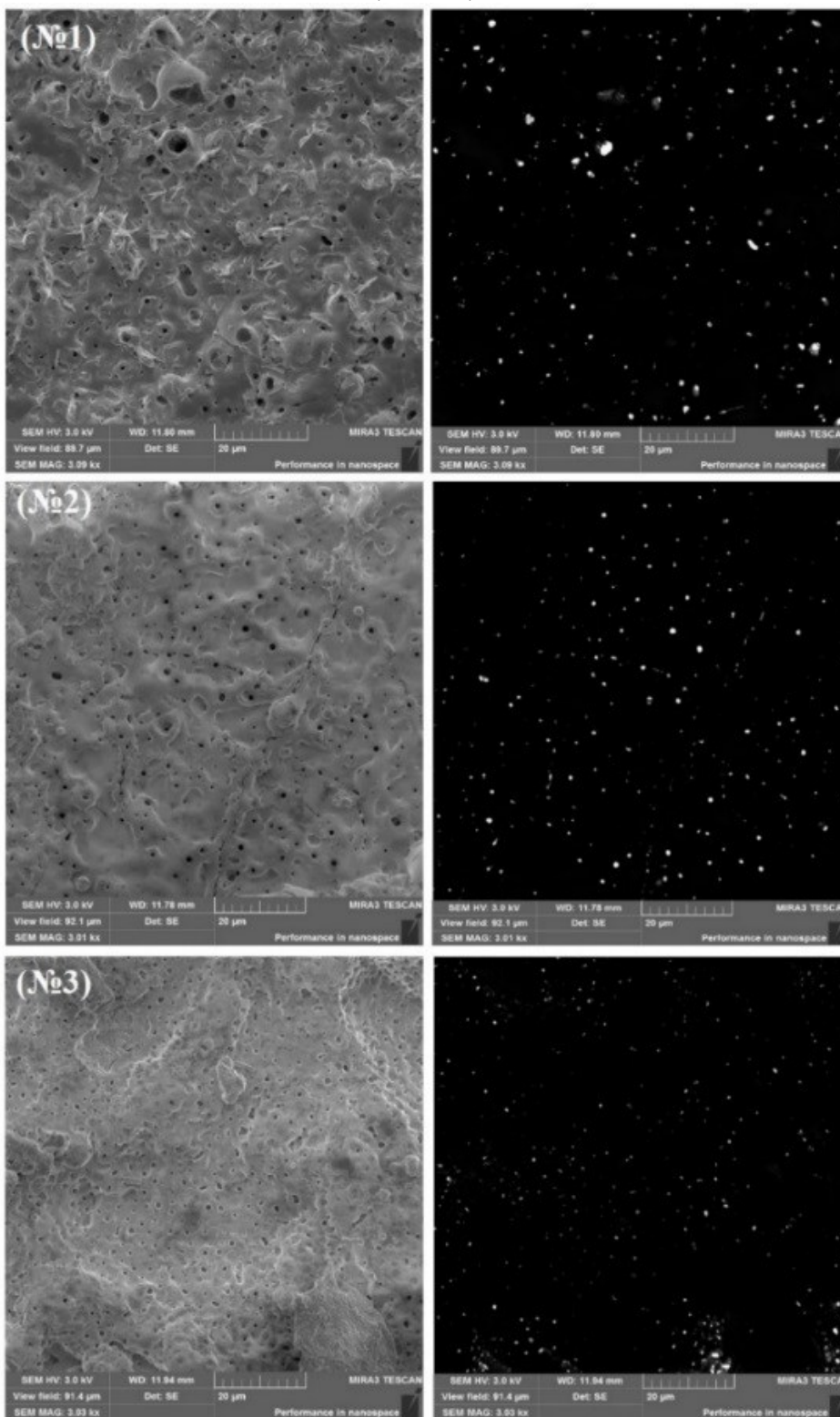


Рисунок 3. Распределение пор ПЭО-покрытий различных электролитов

В процессах ПЭО характеристики искр и объем газовыделения влияют на морфологию поверхности покрытий. Большие искры приводят к образованию больших и мелких микропор, в то время как меньшие искры образуют больше более мелких микропор и, как следствие, образуют более однородную структуру. Средний размер микропор и процент пористости покрытий приведены на рис. 4. Согласно рис. 3 и 4, очевидно, что из-за большого количества мелких искр и малого количества выделения газа покрытие электролита № 3 (рис. 3) обладало наименьшими микропорами (с пористостью 1,22 % и средним размером 0,48 мкм). В этом образце микропоры хорошо распределены по поверхности покрытия и идентичны по размеру. Образец, приготовленный в электролите № 1 (рис. 4), обладал некоторыми крупными микропорами с неоднородной дисперсией, а также крупными сферическими продуктами конденсации, образованными быстрым ростом покрытия в результате сильных разрядов [12]. Кроме того, наибольший средний размер микропор (1,49 мкм) был связан с этим образцом. На поверхности образца № 2 наблюдалось несколько микропор и множество микротрещин (рис. 4). Микротрещины возникают во время процесса роста покрытия из-за высвобождения теплового напряжения и разрядной активности [13]. Таким образом, высокая температура плазменных разрядов приводит к плавлению оксидов вокруг разрядных каналов с последующим быстрым охлаждением электролитом. Затем быстрое изменение температуры вызывает появление микротрещин [14]. Хотя средний размер микропор в образце № 2 был меньше, чем в образце № 1, процент пористости был большим.

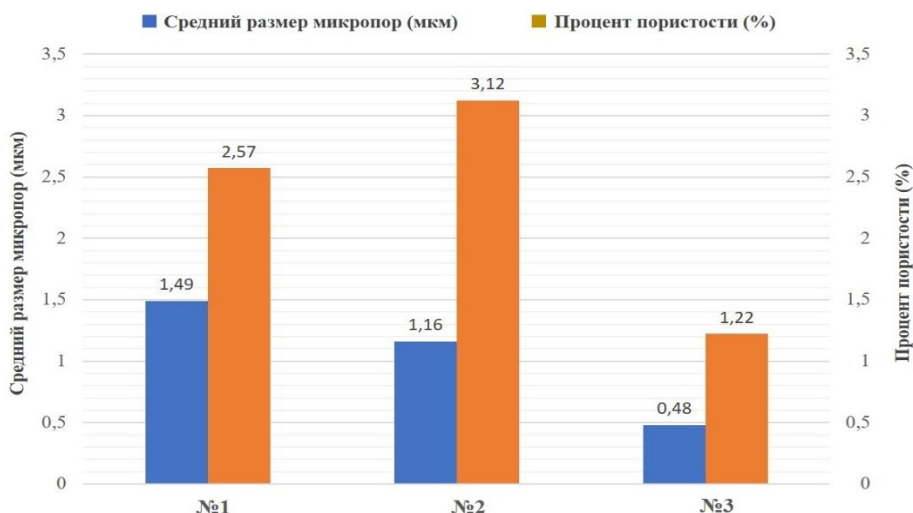


Рисунок 4. Средние размеры микропор и процент пористости ПЭО-покрытий различных электролитов

Анализ, рутил и брукит являются тремя основными полиморфами оксида Ti (TiO_2) [15]. Фактически TiO_2 , особенно полиморф анатаза, считается биосовместимым. Кроме того, рутил обладает более высокой стабильностью, высокой твердостью и, как следствие, лучшими механическими свойствами и более высокой плотностью, чем анатаз [16]. На первой стадии процесса ПЭО температура низкая. Таким образом, фаза анатаза образуется раньше, чем рутил. С прогрессом в процессе и увеличением приложенного напряжения и

плотности тока температура повышается, и при 915 °С анатаз превращается в рутил, который является более стабильной фазой оксида Ti при высоких температурах. Рентгенограммы различных покрытий показаны на рис. 5. Как видно на рисунке, все покрытия состояли как из кристаллических фаз рутила, так и анатаза. В рентгенограммах электролитов (№ 1, № 2 и № 3) не было обнаружено пиков кристаллических фаз, связанных с анионами PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} . Это означает, что эти анионы включали в состав покрытий только кислород.

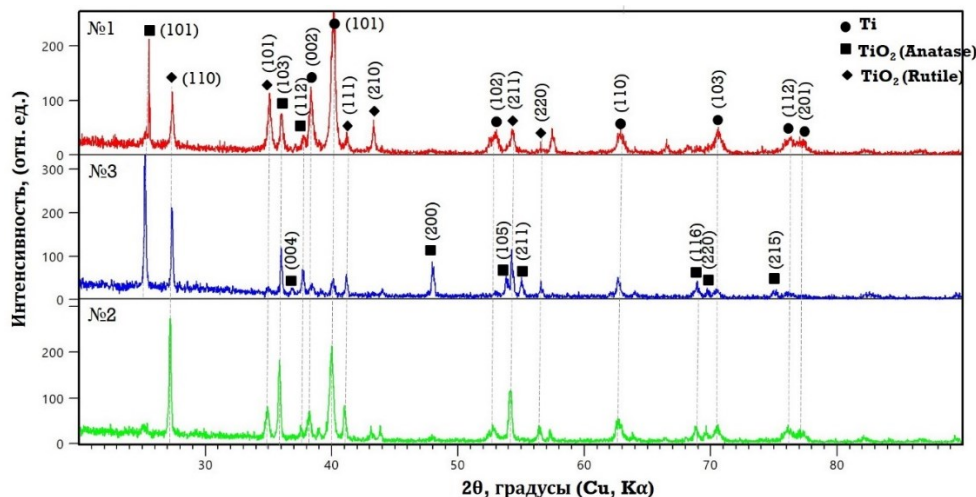


Рисунок 5. Рентгенограммы ПЭО-покрытий, полученных в различных электролитах

Износостойкость различных покрытий, сформированных на титановом сплаве Ti6Al4V, показана на рис. 6. Ясно, что покрытия, изготовленные разными электролитами, показывали совершенно разную износостойкость. Самый низкий коэффициент трения ($\mu=0,3$) показало покрытие, полученное ПЭО в электролите № 2. Это может быть связано с большим количеством кристаллических фаз рутила. Образец, приготовленный в электролите № 1, показывал высокий коэффициент износа ($\mu=0,52$). Этот эффект может быть получен за счет устранения поверхностных дефектов (микротрещин и микропор).

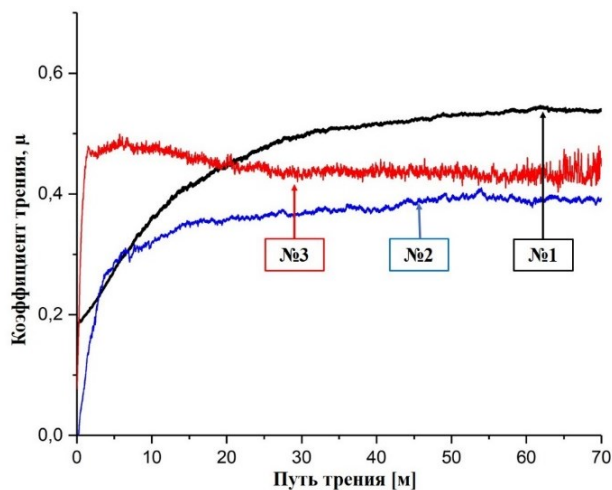


Рисунок 6. Результаты трибологических испытаний

ПЭО-покрытий различных электролитов

Полученные результаты показывают, что наиболее однородная структура с меньшей пористостью, большим количеством кристаллических фаз анатаза и средним коэффициентом износа к стальному контртелу была получена в покрытии, приготовленном в электролите на основе силиката.

Заключение. Цвет и внешний вид, напряжение искры и характеристики искры, морфология поверхности, фазовый состав и трибологическое поведение покрытий варьировались в зависимости от типа добавки. Структуры покрытий, сформированных с использованием электролитов, содержащих добавки Na_2SiO_3 , были однородными и компактными с хорошо диспергированными микропорами. Эти технические характеристики также были связаны с образованием регулярных, равномерных искр в процессе нанесения покрытия. Высокая электропроводность электролита, содержащего Na_3PO_4 , привела к образованию покрытия, содержащего относительно крупные микропоры с неправильной формой и распределением. Из-за высвобождения термических напряжений во время роста это покрытие имело микротрещины. Это покрытие показало отличную износостойкость по сравнению с другими покрытиями. Хорошая износостойкость этого покрытия обусловлена высоким содержанием рутиловой фазы. Результаты исследования показали, что наиболее однородная структура с меньшей пористостью и большим количеством кристаллических фаз анатаза была получена в покрытии, приготовленном методом ПЭО в электролите на основе силиката. Этот режим представляет практический интерес с точки зрения получения биосовместимого покрытия.

Список литературы

1. Яо З.П. Окислительное поведение керамических покрытий на Ti-6Al-4V методом микроплазменного окисления / З.Х. Цзян, Ф.П. Ван, Г. Д. Хао // Журнал технологии обработки материалов. – 2007. – Т.190. – С. 117-122.
2. Ерохин А.Л. Плазменный электролиз для поверхностной инженерии / Х. Не, А. Лейланд, А. Мэтьюс, С.Дж. Дауи // Технология поверхностей и покрытий. – 1999. – Т.122. – С. 73-93.
3. Ерохин А.Л. Характеристика оксидных пленок, полученных плазменным электролитическим окислением сплава Ti-6Al-4V / Х. Ни, А. Лейланд, А.Мэтьюс // Технология поверхностей и покрытий. – 2000. – Т.130. – С.195-206.
4. Сан Х.Т. Влияние времени окисления на свойства керамических покрытий, полученных на Ti-6Al-4V методом микродугового окисления / З.Х. Цзян, Ю.П. Ли, Ф.П. Ван, Ю. Д.Л. // Журнал технологии обработки материалов. – 2005. – Том 21. – С. 281-285.
5. Каид Т.Х. Микродуговое окисление биокерамических покрытий, содержащих гидроксиапатит, полученный из яичной скорлупы, на титановой подложке / С.Рамеш, Ф. Юсоф, У.Дж. Басирун, Ю.С. Чинг, Х. Чандрани, С. Кришнасами // Международная керамика. – 2019. – Том 45. – С. 18371-18381.
6. Дурду С. Характеристика и образование гидроксиапатита на Ti6Al4V, покрытого плазменным электролитическим окислением / О.Ф. Дениз, И. Кутбай, М.Уста // Журнал сплавов и соединений. – 2013. – Т. 551. – С. 422-429.
7. Лю Ф. Образование гидроксиапатита на сплаве Ti-6Al-4V путем микродугового окисления и гидротермальной обработки / Ф.Ван, Т. Симидзу, К. Игараши, Л. Чжао // Технология поверхностей и покрытий. – 2005. – Т.199. – С. 220-224.
8. Арунеллаиппан Т. Влияние частоты и рабочего цикла на микроструктуру плазменного электролитического окисленного AA7075 и корреляцию с его коррозионным поведением / Н. Кишоре Бабу, Л. Рама Кришна, Н. Рамешбабу // Технология поверхностей и покрытий. – 2015. – Т.280. – С.136-147.
9. Джуринский Д. Характеристика и оценка коррозии покрытий $\text{TiO}_2:n\text{-HA}$ на титановом сплаве, образованных плазменным электролитическим окислением / Ю. Гао, В.К. Юнг, Э. Струмбан, В. Лещинский, П.Дж. Чу, А. Мэтьюс, А. Ерохин, Р.Г. Маев // Технология поверхностей и покрытий. – 2015. – Т. 269. – С. 258-265.

10. Рахадиллов Б.К. Эрозия поверхности вольфрама облучением водородной плазмой / М.К. Скаков, Т. Р. Туленберген // Ключевые инженерные материалы. – 2017. – Т. 736. – С. 46-51
11. Рахадиллов Б. Структурные особенности и трибологические свойства напыляемого из детонационного пистолета покрытия Ti-Si-C / Д. Буйткенов, З. Сагдолдина, Б. Сеитов, С. Курбанбеков, М. Адильканова // Покрyтия. – 2021. – 11:2. – С. 1-13.
12. Буйткенов Д.Б. Исследование механико-трибологических характеристик покрытий Ti₃SiC₂/TiC после отжига / Б.К. Рахадиллов, З.Б. Сагдолдина, Д. Ерболатулы // Евразийский журнал физики и функциональных материалов. – 2020. – 4:1. – С. 86-92.
13. Буйткенов Д.Б. Структура и свойства детонационных покрытий на основе карбосилицида титана / Б.К. Рахадиллов, Б.Т. Туякбаев, З.Б. Сагдолдина, А.Б. Кенесбеков // Ключевые инженерные материалы. – 2019. – Т. 821. – С. 301-306.
14. Буйткенов Д. Влияние термической обработки на фазовый состав и микротвердость покрытий на основе Ti₃SiC₂/TiC / Б.Рахадиллов, Р., Д.Ерболатулы, Ж. Строительные леса // Ключевые инженерные материалы. – 2020. – V.839. – С.137-143.
15. Рахадиллов Б. Влияние импульсно-плазменной обработки на структурно-фазовый состав и трибологические свойства детонационных покрытий на основе Ti-Si-C/Д.Буйткенов, З.Идришева, М.Жаманбаева, С.Пазылбек, Д.Байжан // Покрyтие. – 2021. – 11:7. – С. 795.
16. Рахадиллов Б.К. Фазовый состав и структура композитных покрытий Ti/HA, синтезированных методом детонационного напыления / Д.Р. Байжан, Ж.Б. Сагдолдина, Д.Б. Буйткенов, М. Маулет // Материалы конференции AIP. – 2020. – T.2297:1. – 020022.

References

1. Yao Z.P. Oxidation behavior of ceramic coatings on Ti-6Al-4V by micro-plasma oxidation / Z.H. Jiang, F.P. Wang, G.D. Hao // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 190. – P. 117-122.
2. Yerokhin A.L. Plasma electrolysis for surface engineering / X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.J. Dowey // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 122. – P. 73-93.
3. Yerokhin A.L. Characterization of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy / X. Nie, A. Leyland, A. Matthews // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 130. – P. 195-206.
4. Sun X.T. Effect of the oxidation time on properties of ceramic coatings produced on Ti-6Al-4V by micro-arc oxidation / Z.H. Jiang, Y.P. Li, F.P. Wang, Y.D. Lv // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol 21. – P. 281-285.
5. Qaid T.H. Micro-arc oxidation of bioceramic coatings containing eggshell-derived hydroxyapatite on titanium substrate / S. Ramesh, F. Yusof, W.J. Basirun, Y.C. Ching, H. Chandran, S. Krishnasamy // Ceramics International. – 2019. – Vol. 45. – P. 18371-18381.
6. Durdu S. Characterization and formation of hydroxyapatite on Ti6Al4V coated by plasma electrolytic oxidation / Ö.F. Deniz, I. Kutbay, M. Usta // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 551. – P. 422-429.
7. Liu F. Formation of hydroxyapatite on Ti-6Al-4V alloy by microarc oxidation and hydrothermal treatment / F. Wang, T. Shimizu, K. Igarashi, L. Zhao // Surface and Coatings Technology. – 2005. – Vol. 199. – P. 220-224.
8. Arunnellaiappan T. Influence of frequency and duty cycle on micro-structure of plasma electrolytic oxidized AA7075 and the correlation to its corrosion behavior / N. Kishore Babu, L. Rama Krishna, N. Rameshbabu // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 280. – P. 136-147.
9. Dzhurinskiy D. Characterization and corrosion evaluation of TiO₂:n-HA coatings on titanium alloy formed by plasma electrolytic oxidation / Y. Gao, W.K. Yeung, E. Strumban, V. Leshchinsky, P.J. Chu, A. Matthews, A. Yerokhin, R.G. Maev // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 269. – P. 258-265.
10. Rahadilov B. K. Tungsten surface erosion by hydrogen plasma irradiation / M.K. Skakov, T.R. Tulenbergenov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 46-51
11. Rakhadilov B. Structural features and tribological properties of detonation gun sprayed Ti-Si-C coating / D. Buitkenov, Z. Sagdoldina, B. Seitov, S. Kurbanbekov, M. Adilkanova // Coatings. – 2021. – 11:2. – P. 1-13.
12. Buitkenov D. B. Reserach of the mechanic-tribological characteristics of Ti₃SiC₂/TiC coatings after annealing / B.K. Rakhadilov, Z.B. Sagdoldina, D. Erbolatuly // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2020. – 4:1. – P. 86-92.
13. Buitkenov D. B. Structure and properties of detonation coatings based on titanium carbosilicide / B.

- K. Rakhadilov, B. T. Tuyakbaev, Z. B. Sagdoldina, A. B. Kenesbekov // *Key Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 821. – P. 301-306.
14. Buitkenov D. Influence of heat treatment on the phase composition and microhardness of coatings based on Ti₃SiC₂/TiC / B. Rakhadilov, R., D.Erbolatuly, Zh. Sagdoldina // *Key Engineering Materials*. – 2020. – V. 839. – P. 137-143.
15. Rakhadilov B. Effect of pulsed-plasma treatment on the structural-phase composition and tribological properties of detonation coatings based on Ti-Si-C / D. Buitkenov, Z. Idrisheva, M. Zhamanbayeva, S. Pazyzbek, D. Baizhan // *Coating*. – 2021. – 11:7. – P. 795.
16. Rakhadilov B.K. Phase composition and structure of composite Ti/HA coatings synthesized by detonation spraying / D.R. Baizhan, Zh.B. Sagdoldina, D.B. Buitkenov, M. Maulet // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2297:1. – 020022.