

А. В. КАРАКУРКЧИ, М. В. ВЕДЬ, Н. Д. САХНЕНКО, Г. Ш. ЯР-МУХАМЕДОВА

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРООКСИДНЫХ СИТЕМ НА ОСНОВЕ TiO₂

Плазменно-электролитическим оксидированием сплавов титана в щелочных электролитах с введением соединений тугоплавких металлов получены гетерооксидные покрытия микроглобулярной морфологии с высокой адгезией. В роли допантов использованы диспергированные в электролите наноразмерные оксиды ванадия, циркония и молибдена, а также растворы вольфрамата натрия, что позволило формировать гетерооксидные покрытия как из коллоидных, так и истинных растворов. Установлено влияние допантов на параметры процесса и выявлены интервалы напряжений, соответствующих микродуговому режиму. По результатам сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии показано, что управление химическим составом покрытий, топографией поверхности и размером зерен можно варьированием концентрации электролита и плотности тока плазменно-электролитического оксидирования. Установлено, что сформованные оксидные слои имеют высокую стойкость к абразивному износу и существенно повышают коррозионную стойкость титана в хлоридсодержащих средах вследствие инкорпорации тугоплавких компонентов и сглаживания рельефа поверхности.

Ключевые слова: сплавы титана, плазменно-электролитное оксидирование, гетерооксидные покрытия, тугоплавкие металлы, коррозионная стойкость, стойкость к абразивному износу.

А.В. КАРАКУРКЧИ, М. В. ВЕДЬ, М. Д. САХНЕНКО, Г. Ш. ЯР-МУХАМЕДОВА

ФУНКЦИОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРООКСИДНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ TiO₂

Плазмово-електролітним оксидуванням сплавів титану в лужних електролітах з додаванням сполук тугоплавких металів отримані гетерооксидні покриття мікроглобулярної морфології з високою адгезією. В ролі допантів застосовано дисперговані в електроліті нанорозмірні оксиди ванадію, цирконію і молібдену та розчини вольфрамату натрію, що дозволило формувати гетерооксидні покриття як з колоїдних, так і істинних розчинів. Встановлено вплив допантів на параметри процесу та виявлено інтервали напруг, які відповідають мікродуговому режиму. За результатами сканівної електронної та атомно-силової мікроскопії показано, що управляти хімічним складом покриттів, топографією поверхні і розміром зерен можна шляхом зміння концентрації електроліту і густини струму плазмово-електролітного оксидування. Встановлено, що сформовані оксидні шари мають високу стійкість до абразивного зношування і суттєво підвищують корозійну тривкість титану в хлоридвмісних середовищах завдяки інкорпорації тугоплавких компонентів і згладжуванню рельєфу поверхні.

Ключові слова: сплави титану, плазмово-електролітне оксидування, гетерооксидні покриття, тугоплавкі метали, корозійна тривкість, стійкість до абразивного зношування.

A. V. KARAKURKCHI, M. V. VED', N. D. SAKHNENKO, G. SH. YAR-MUKHAMEDOVA

FUNCTIONAL PROPERTIES HETEROXIDES SYSTEMS ON TiO₂ BASE

Plasma-electrolytic oxidizing of titanium alloy in alkaline electrolytes with additions of refractory metal compounds produced heteroxide coatings of microglobular morphology with high adhesion. In the role of dopants, nanosized vanadium, zirconium and molybdenum oxides dispersed in the electrolyte, as well as solutions of sodium tungstate, which allowed the formation of heteroxide coatings of both colloidal and true solutions, are used. The effect of the dopants on the process parameters is determined and the overvoltage intervals corresponding to the microarc regime are revealed. Based on the results of scanning electron and atomic force microscopy, it was shown that the chemical composition of the coatings, surface topography and grain size can be controlled by varying the electrolyte concentration and the current density of the plasma-electrolytic oxidizing process. It has been found that the formed oxide layers have a high resistance to abrasion and significantly increases the corrosion resistance of titanium in chloride-containing media due to the incorporation of refractory components and smoothing of the surface relief.

Key words: abrasion resistance, corrosion resistance, mixed oxide coating, plasma electrolytic oxidation, refractory metals, titanium alloy.

Введение. Совершенствование технологий формирования оксидных покрытий на сплавах титана, как одного из наиболее востребованных материалов в энергетике, электронике, приборо- и судостроении вызывают значительный интерес. Применение таких покрытий в ряд актуальных выдвигает проблему формирования гетерооксидных композиций, сферы использования которых существенно шире – от нанокатализа до IT-технологий. Однако подавляющее большинство традиционных методов не способно обеспечить высокую адгезию, износо- и коррозионную стойкость в сочетании с тем или иным комплексом свойств, определяющих функциональное предназначение материалов и изделий. В этой связи весьма привлекательным представляется метод плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО), который позволяет формировать на поверхности металла прочно сцепленные с основой оксидные покрытия с широким спектром физико-химических и физико-механических характеристик: защитных, диэлектри-

ческих, антифрикционных, каталитических и др. Химическая инертность ПЭО покрытий наряду с заданными трибологическими свойствами и биологической совместимостью представляют значительный интерес для медицины, экологического катализа, противокоррозионной защиты и упрочнения поверхности [1–3].

Успешное решение задач научного обоснования выбора состава электролита, а также оптимизации параметров ПЭО создают предпосылки для разработки технологии гетерооксидных покрытий на основе TiO₂ с оксидами тугоплавких металлов [4, 5], обладающих повышенным ресурсом, химическим сопротивлением к воздействию агрессивных сред, заданной морфологией и трибологическими характеристиками. В этой связи исследование влияния природы допантов на параметры ПЭО титана, состав и морфологию поверхности, коррозионную стойкость и механические свойства гетерооксидных покрытий составило цель данной работы.

Методика эксперимента. Оксидные покрытия формировали на сплаве титана ВТ1-0 состава,

© А.В. Каракуркчи, М. В. Веть, Н. Д. Сахненко, Г.Ш. Яр-Мухамедова, 2018

масс. %: Ti – 99.2–99.7, Fe < 0.25, C < 0.07, Si < 0.1, N < 0.04, O < 0.2, Al до 0.7, остальные примеси – до 0.3. Предварительная обработка образцов включала механическую очистку от технологических загрязнений, обезжиривание в 0.2–0.3 М NaOH, травление в смеси 0.1–0.3 М HF и 0.3–0.9 М HNO₃, промывку дистиллированной водой.

Растворы для предварительной подготовки поверхности и электролиты оксидирования готовили из сертифицированных реактивов марки «хч» и «чда» на дистиллированной воде.

Оксидирование проводили в водных растворах электролитов на основе пирофосфатов, боратов и ацетатов щелочных металлов с добавлением оксидов или оксоанионов металлов-допантов (табл. 1) в термостатированной ячейке с постоянным перемешиванием и проточным циркуляционным охлаждением электролита до 20–25 °С.

Таблица 1 – Состав электролитов и режим ПЭО

№	Состав электролита, моль/дм ³	Напряжение окисления $U_{\text{и}}$, В	Максимальное напряжение, U_{max} , В
1	K ₄ P ₂ O ₇ – 0.3 MoO ₃ – 0.1 Na ₄ B ₄ O ₇ – 0.1	90–110	180–190
2	K ₄ P ₂ O ₇ – 0.3 V ₂ O ₅ – 0.1	100–120	190–200
3	K ₄ P ₂ O ₇ – 0.3 Na ₂ WO ₄ – 0.1 Na ₄ B ₄ O ₇ – 0.1	140–160	210–220
4	K ₄ P ₂ O ₇ – 0.3 ZrO ₂ – 0.1 Na ₃ Cit – 0.1	110–120	230–240

Электролиты для ПЭО представляют собой коллоидные системы, агрегативная устойчивость которых обусловлена частичным растворением и диспергированием кислотных оксидов тугоплавких металлов, в том числе и ZrO₂, в щелочных растворах (рН 9.0–9.2).

Для реализации гальваностатического режима процесса использовали стабилизированный источник постоянного тока Б5-50, плотность тока i варьировали в интервале 1–5 А/дм², обработку проводили до максимального напряжения 250 В, в течение 30–60 мин.

Поверхность образцов исследовали сканирующим электронным микроскопом ZEISS EVO 40XVP. Для обработки изображений использовали программную среду SmartSEM. Химический состав поверхности определяли с помощью анализа характеристического рентгеновского спектра, который регистрировали энерго-дисперсионным спектрометром INCA Energy 350. Возбуждение рентгеновского излучения осуществляли облучением образцов пучком электронов с энергией 15 кВ. Элементный состав покрытий определяли также рентгеновским флуоресцентным методом с применением портативного рентгеновского

универсального технического спектрометра «Спрут», относительное стандартное отклонение 10^{-3} – 10^{-2} .

Шероховатость поверхности покрытий оценивали контактным методом с использованием сканирующего зондового микроскопа ACM NT-206 (Microtestmachine Co, Республика Беларусь). Образцы сканировали зондом CSC-37 (кантиливер В, латеральная разрешающая способность 3 нм) не менее, чем в трех точках поверхности на различных участках образца для усреднения результатов. По 2D- и 3D-картам поверхности оценивали размер зерен кристаллитов и уровень шероховатости поверхности покрытий.

Скорость абразивного износа материалов $\Delta l/\Delta t$ определяли методом *Callotte* на калотестере по глубине повреждения покрытия l за период времени t , в течение которого на поверхности образцов остается отпечаток. Методика тестирования состояла в непрерывном прокатывании сферического стального шарика диаметром d 30 мм с постоянным усилием по поверхности образца, причем для испытаний твердых материалов стальной шарик дополнительно покрывали абразивной алмазной пастой.

Исследования коррозионного поведения сплавов с оксидными покрытиями проведены методом измерения импеданса с использованием автоматического моста переменного тока Р-5083 в диапазоне частот 20 – $1 \cdot 10^5$ Гц в 0.1 М растворе NaCl. Измерения по последовательной схеме реализованы с использованием копланарных вспомогательных электродов из стали Х18Н10Т. Определение скорости коррозии по данным импедансометрии проводили в соответствии с общепринятой методикой [6].

Результаты и их обсуждение. Формовочные зависимости оксидирования сплава ВТ1-0 во всех электролитах имеют аналогичную форму (рис. 1), которая несколько отличается от классического вида [7]. Рост напряжения формовки на начальной стадии процесса чрезвычайно замедлен и на хронограммах напряжения наблюдается пологий участок до напряжения U_1 . Очевидно, такой характер U, t – зависимостей связан с конкуренцией процессов формирования фазового оксида титана и его химическим растворением в щелочной среде.

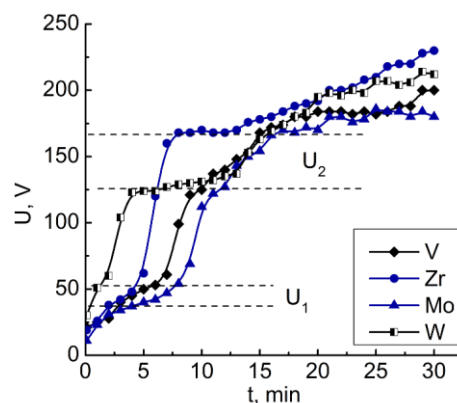


Рис. 1 – Хронограммы напряжения формовки гетерооксидных покрытий. Плотность тока 2 А/дм²

По достижении напряжения 50–55 В на всех зависимостях наблюдается резкий подъем до напряжения U_2 , что соответствует образованию компактного оксидного слоя. Рост напряжения значительно замедляется с наступлением пробоя пленки: на U, t – зависимостях возникают плато, а значения напряжений U_1 и U_2 , как и времени их достижения и стабилизации, зависят от природы допанта.

Очевидно, на этих участках реакции образования – залечивания дефектов покрытия, в том числе и с участием компонентов электролита, протекают с соизмеримыми скоростями [8]. При этом напряжение U_2 для систем $TiO_x \cdot (Mo, V, W)O_y$ находится на уровне 110 – 120 В, а для $TiO_x \cdot ZrO_2$ на 40 В выше вследствие более высокого удельного сопротивления и термической стойкости ZrO_2 . Микродуговая область характеризуется значительным числом осцилляций с ростом напряжения до 200 – 220 В. Это, очевидно, связано с активным включением в состав покрытий компонентов электролита, образующих соединения с различной степенью окисления и различным удельным сопротивлением и термической стойкостью. Механизм включения допантов не отличается от приведенного в [9], и состоит в инкорпорации оксидов по местам искрения и разрушения пленки фазового оксида титана.

Скорость изменения напряжения в доискровой области незначительно снижается и достигает минимума при U 45–50 В, что связано с уравниванием процессов формирования и растворения оксидов титана. С повышением напряжения наблюдается стремительный рост скорости изменения напряжения, отражающий доминанту реакции ообразования и роста оксида над его растворением. Последующее снижение dU/dt , является следствием пробоя оксидной пленки, а также сопутствующих процессов инкорпорации компонентов электролита и их высокотемпературных превращений в зоне искрения. Для микродуговой области характерны нестабильность процесса и наличие осцилляций dU/dt , связанных со стохастическим распределением участков пробоя – залечивания в сложной оксидной системе [10].

Морфология поверхности и содержание легирующих элементов в покрытии (рис. 2) в значительной степени зависят от природы допанта: при формировании оксидных слоев в растворах на основе диспергированных оксидов тугоплавких металлов получены равномерные низкопористые покрытия с содержанием легирующего компонента от 3 до 9 масс. %, содержащие также, как и ПЭО покрытия на титане, значительное количество фосфора в результате термического разложения пирофосфата. Анализ распределения компонентов по равномерной трубчатой-глобулярной структуре покрытий $TiO_x \cdot WO_y$ позволяет заключить, что выступы кластеров обогащены вольфрамом, а матрица – титаном. Следует отметить, что увеличение концентрации вольфрамата натрия в растворе и плотности тока до 4.0 А/дм² способствует росту содержания W в оксидном покрытии до 14.5 масс. %. С повышением содержания вольфрама в покрытии крупные кластеры исчезают и формируется

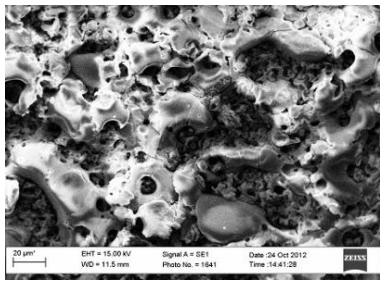
более совершенная микроглобулярная структура с округлыми зернами близкого диаметра (до 1 мкм), а также торообразные структуры. Оценивая топографию поверхности оксидированного в дифосфате калия сплава ВТ1-0, также содержащего помимо оксида титана и значительное до 18 масс. % количество фосфора, можно заключить, что покрытие является неравномерно шероховатым. Профиль поперечного сечения зерна между маркерами 1–2 (рис. 3, а) свидетельствует, что размер зерен находится в пределах 400 – 500 нм, а высота параболических выступов рельефа – 100 – 400 нм (рис. 3, б).

Топография поверхности системы $TiO_x \cdot ZrO_2$ существенно отличается – поверхность более равномерно развита по сравнению с рассмотренными выше оксидами. Профиль поперечного сечения агломерата $TiO_x \cdot ZrO_2$ между маркерами 1–2 характеризуется разнообразием форм мелких зерен с преобладанием конических конгломератов (рис. 3, в). Разброс по размерам агломератов зерен составляет 150 – 300 нм, а по высоте колеблется от 100 до 500 нм (рис. 3, г).

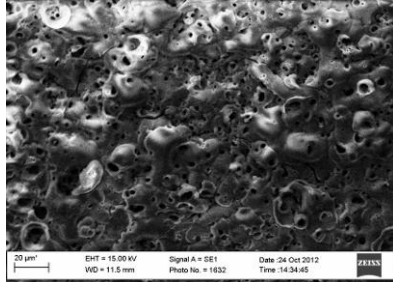
Полученные результаты позволяют заключить, что методом ПЭО можно синтезировать на сплавах титана равномерные микропористые конверсионные и композиционные покрытия с развитой поверхностью, содержащие оксиды тугоплавких металлов и примеси фосфора. Отличительной особенностью синтеза при его технической реализации является вариативность формирования покрытий в электролитах как на основе оксоанионов, так и диспергированных оксидов [11].

Покрытия, содержащие оксиды переходных металлов, представляют значительный интерес, обусловленный, в первую очередь, возможностью их применения в качестве электродных и каталитически активных материалов для электрохимических и гетерофазных превращений, износостойких защитных систем, поэтому необходимо располагать информацией о их коррозионной стойкости в средах различной минерализации и агрессивности. Коррозионные испытания образцов с покрытиями, содержащими смешанные оксиды тугоплавких металлов, проведены в модельном растворе 0,1 М NaCl.

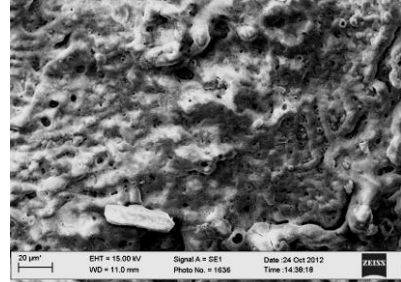
Годографы импеданса образцов с покрытиями $TiO_x \cdot WO_y$, $TiO_x \cdot MoO_y$, содержащими оксиды металлов в промежуточной степени окисления (рис. 4, зависимости 1, 2), состоят из двух участков – фрагмента полукружности и прямой с углом наклона, близким к 45°. Такая форма зависимостей свидетельствует о смешанном диффузионно-кинетическом контроле коррозионного процесса. Эквивалентная схема замещения таких систем включает сопротивление электролита, емкость двойного слоя, импеданс Варбурга и фарадеевское сопротивление, соответствующее току коррозии. Построенные по результатам импедансных измерений годографы импеданса оксидных систем $TiO_x \cdot VO_y$, $TiO_x \cdot ZrO_2$ (рис. 4, зависимости 3, 4) представляют собой фрагменты полукружностей, что отражает кинетический контроль коррозионного процесса.



Ti – 23.7, O – 52.2, P – 17.2, Mo – 6.9
а

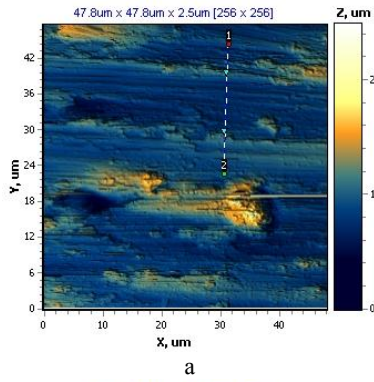


Ti – 24.5, O – 49.2, P – 17.7, V – 8.6
б

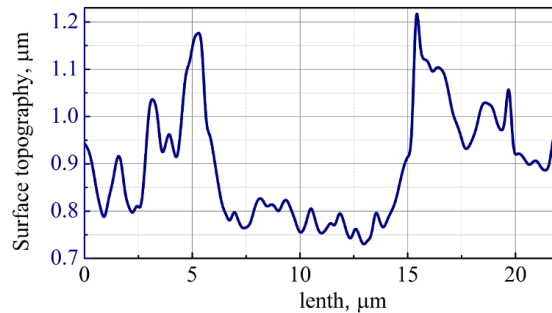


Ti – 29.1, O – 52.8, P – 14.7, Zr – 3.4
в

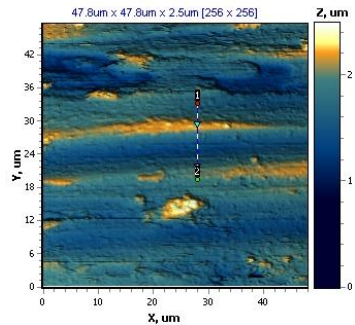
Рис. 2 – Микрофотографии поверхности (× 500) и состав (масс. %) покрытий: а – $TiO_x \cdot MoO_y$; б – $TiO_x \cdot VO_y$; в – $TiO_x \cdot ZrO_2$



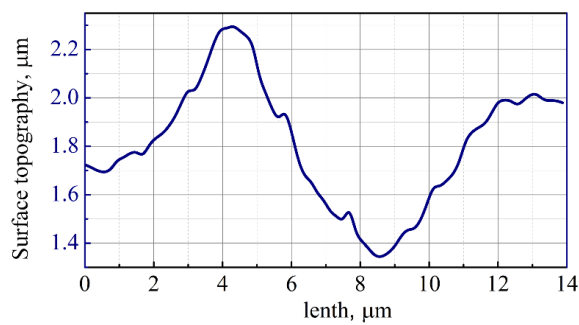
а



б



в



г

Рис. 3 – 2D-карты (а, в) поверхности и профиль поперечного сечения (б, г) ПЭО покрытий TiO_2 (а, б) и $TiO_x \cdot ZrO_2$ (в, г)

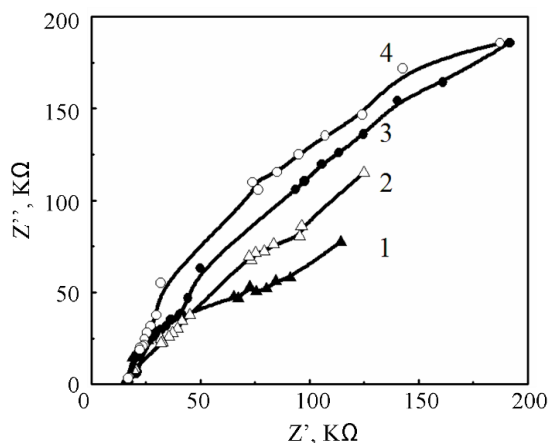


Рис. 4 – Годографы импеданса (а) покрытий смешанными оксидами:

- 1 – $TiO_x \cdot WO_3$; 2 – $TiO_x \cdot MoO_3$; 3 – $TiO_x \cdot VO_3$;
- 4 – $TiO_x \cdot ZrO_2$

Наиболее показательной является более высокая устойчивость смешанных оксидных систем $TiO_x \cdot MO_y$ к абразивному износу (табл. 2).

По значению стойкости к абразивному износу оксидные системы можно представить в виде ранжированного ряда: $TiO_x \cdot ZrO_2 > TiO_x \cdot WO_3 > TiO_x \cdot VO_3 > TiO_x \cdot MoO_3 > TiO_2$.

Скорость истирания покрытий толщиной 30 мкм шариком с алмазной крошкой снижается практически вдвое по сравнению с чистым оксидом титана благодаря глобулярно-трубчатой структуре и сравнительно равномерному распределению допанта по поверхности.

Значения глубинного k_h показателя скорости коррозии свидетельствуют о достаточно высокой коррозионной стойкости исследуемых систем и позволяют отнести материалы к группе весьма стойких (табл. 2). Наиболее высокими защитными свойствами обладают покрытия, содержащие оксид циркония в количестве 1 ат %. Полученные результаты вполне закономерны, поскольку цирконий повышает стойкость к питтинговой коррозии [12].

Таблиця 2 – Показатели коррозии гетерооксидных покрытий толщиной 20 ± 2 мкм в растворе 0.1 М NaCl

ПЭО покрытие	Содержание допанта, ат %	Скорость абразивного износа $\Delta l/\Delta t$, мкм/ч	Скорость коррозии, kh-104, мм/год
TiO ₂	0	1.05	2.33
TiO _x ·WO _y	1.4	0.5	1.92
TiO _x ·MoO _y	1.6	0.75	0.98
TiO _x ·VO _y	3.8	0.65	0.49
TiO _x ·ZrO ₂	1.0	0.45	0.36

Таким образом, метод плазменно-электролитического оксидирования позволяет синтезировать на сплавах титана покрытия, содержащие оксиды редких металлов, различающиеся составом, морфологией поверхности, коррозионной стойкостью в агрессивных средах и скоростью абразивного износа.

Работа выполнена при поддержке Казахского национального университета им. Аль-Фараби в рамках проекта AP05130069 «Разработка нанотехнологии синтеза функциональных гальванических покрытий для комплекующих электрооборудования».

Выводы. 1. Плазменно-электролитическая обработка сплавов титана в щелочных электролитах с добавками соединений тугоплавких металлов позволяет формировать гетерооксидные системы с различным содержанием допантов и управлять морфологией поверхности покрытия. Установлено, что различная скорость изменения напряжения на отдельных участках формовочных зависимостей определяется удельным электрическим сопротивлением и термической стойкостью оксидов допантов.

2. Покрытия смешанными оксидами имеют микропористую глобулярную поверхность, что в совокупности с инкорпорацией оксидов тугоплавких металлов обеспечивает высокое сопротивление абразивному износу.

3. Полученные смешанные оксидные покрытия характеризуются развитой поверхностью и высокой коррозионной стойкостью в сравнении с оксидом титана, полученным оксидированием как в фарадеевском режиме, так и плазменно-электролитическом в пирофосфатном электролите.

Список литературы

1. N. Sakhnenko, M. Ved, V. Bykanova, K. Nikiforov Characterization and photocatalytic activity of Ti/TinOm ZrxOy coatings for azo-dye degradation Open Chem., 2015; Vol.13. pp.614–619.
2. D. M. Brunett, P. Tengvall, M. Textor et al. Titanium in medicine: Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications (Engineering Materials). Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2001.
3. N. D. Sakhnenko, M. V. Ved', A. V. Karakurkchi. Morphology and Properties of Coatings Obtained by Plasma-Electrolytic Oxidation of Titanium Alloys in Pyrophosphate Electrolytes Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2017, Vol. 53, No. 6, pp. 1082–1090.
4. A. V. Karakurkchi, M. V. Ved', I. Yu. Ermolenko, and N. D. Sakhnenko Electrochemical Deposition of Fe–Mo–W Alloy Coatings from Citrate Electrolyte Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 43–49.
5. A. V. Karakurkchi, M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, I. Yu. Yermolenko, S. I. Zyubanova, Z. I. Kolupayeva. Functional properties of multicomponent galvanic alloys of iron with molybdenum and tungsten Funct. Mater., 2015; Vol. 22, No 2, pp. 181–187.
6. M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, K.V. Nikiforov, Stability control of adhesional interaction in a protective coating/metal system Journal of Adhesion Science and Technology. 1998, Vol 12, pp 175–183 .
7. A. Karakurkchi, M. Sakhnenko, M. Ved', A. Galak, S. Petrukhin Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017, Vol. 89, pp. 12 – 18.
8. M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, O. V. Bohoyavlenska, T. O. Nenastina Modeling of the surface treatment of passive metals Materials Science 2008, Vol. 44, No. 1, pp 79–86.
9. M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurkchi, M. V. Mayba, A. V. Galak Synthesis and functional properties of mixed titanium and cobalt oxides Functional materials, 2017, Vol. 24, No. 4, pp. 534–540.
10. Nikolay D Sakhnenko, Maryna V. Ved, and Ann V. Karakurkchi. Nanoscale Oxide PEO Coatings Forming from Diphosphate Electrolytes. Chapter 38: in the book Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications, Springer Proceedings in Physics 195. O. Fesenko, L. Yatsenko (eds.). – Springer International Publishing AG, 2017. pp. 507–531.
11. N. Sakhnenko, M. Ved, A. Karakurkchi, A. Galak. A study of synthesis and properties of manganese-containing oxide coatings on alloy VT1-0 Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, Vol. 81, pp. 37–43
12. G. Yar-Mukhamedova, M. Ved', N. Sakhnenko, M. Koziar Ternary cobalt-molybdenum-zirconium coatings for alternative energies Applied Surface Science, 2017, Vol. 421 PA, pp. 68–76.

Надійшло (received) 10.09.18

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Каракуркчі Ганна Володимирівна (Каракуркчи Анна Владимировна, Karakurkchi Anna Volodymyrivna) – кандидат технічних наук, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», начальник навчального відділу, Харків; тел.:(063) 417–35–44, e-mail: anyutikukr@gmail.com .

Ведь Марина Віталіївна (Ведь Марина Витальевна, Ved' Maryna Vitaliyivna) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної та неорганічної хімії, Харків; тел.: (057) 707–61–04, e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua

Сахненко Микола Дмитрович (Сахненко Николай Дмитриевич, Sakhnenko Nikolay Dmytrovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії, Харків, тел.: (057) 707–63–27, e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua

Яр-Мухамедова Гульміра Шаріповна (Яр-Мухамедова Гульмира Шариповна, Yar-Mukhamedova Gulmira Shariphovna) – доктор фізико-математичних наук, професор, Казахський національний університет імені Аль-Фарабі, професор кафедри фізики твердого тіла і нелінійної фізики, Алмати, Казахстан, тел.: +7773773412, e-mail: gulmira-alma-ata@mail.ru