

УДК 669.295

В.А. Дуюнова¹, М.С. Оглодков¹, М.В. Герасимов², И.А. Козлов¹, А.В. Князев¹

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-86-94

Рассмотрено влияние добавок сульфата никеля в силикатно-щелочной электролит для микродугового оксидирования титановых сплавов на свойства формируемых электролитно-плазменных покрытий. Установлено влияние компонентного состава электролита на химический состав покрытий, их защитную способность, пористость и электрические характеристики. Показано, что наиболее коррозионностойкие покрытия формируются из электролитов с низким содержанием сульфата никеля, а увеличение содержания никеля в покрытии не приводит к значительному изменению его электрической проводимости.

Ключевые слова: титановый сплав, микродуговое оксидирование, электролитно-плазменное покрытие, электрическая проводимость, коррозионная стойкость.

V.A. Dyuynova¹, M.S. Oglodkov¹, M.V. Gerasimov², I.A. Kozlov¹, A.V. Knyazev¹

FEATURES OF FORMATION OF ELECTROLYTE-PLASMA COATINGS FROM NICKEL-CONTAINING ELECTROLYTES ON TITANIUM ALLOYS

Influence of nickel sulfate additives in silicate-alkaline electrolyte for microarc oxidation of titanium alloys on properties of formed electrolyte-plasma coatings was investigated. The influence of the component composition of the electrolyte on the chemical composition of the coatings, their protective ability, porosity and electrical characteristics was established. It is shown that the most corrosion-resistant coatings are formed from electrolytes with a low content of nickel sulfate, and an increase in the content of nickel in the coating does not lead to a significant change in its electrical conductivity.

Keywords: titanium alloy, microarc oxidation, electrolyte-plasma coating, electrical conductivity, corrosion resistance.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук» [Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences]; e-mail: dir@phyche.ac.ru

Введение

Титановые сплавы благодаря ряду преимуществ (инертность во многих средах, высокие коррозионная стойкость и прочность, низкая плотность) получили широкое распространение во многих отраслях промышленности (авиационной, медицине и др.). Однако их недостатками являются склонность к наводороживанию и охрупчиванию, недостаточная для применения в парах трения твердость, а также низкая адгезия к полимерным материалам [1–5].

Известно, что адгезия клеев (полимеров) к поверхности изделий из титановых сплавов невысокая и значительно снижается (на 70 % и более) при выдержке склеенного изделия во влажных средах. Для преодоления этого недостатка применяют различные методы обработки, направленные на увеличение как механической, так и химической связи поверхности титана с полимерами [1]. Наиболее простыми и распространенными методами являются механическая обработка и травление в растворах кислот и щелочей [6, 7]. Часто для создания максимально развитой поверхности с иерархической структурой пескоструйную обработку и травление в растворах кислот совмещают. Лучшие результаты, по сравнению с механической подготовкой и травлением, показывает фосфатнофтористая обработка, на основании которой разработано множество модифицированных способов обработки. В процессе химической обработки (фосфатнофтористой и аналогичным ей) на поверхности формируется конверсионное покрытие, состоящее из солей титановых и фтортитановых кислот, с максимально развитой поверхностью и высокой смачиваемостью, что обеспечивает хорошую адгезию полимеров [8, 9]. Традиционным электрохимическим способом повышения адгезии титана к полимерным материалам является анодирование в растворах щелочей, при этом в раствор анодирования вводят добавки (например, фторид натрия, кремнийорганические соединения) для создания определенной структуры и морфологии оксида титана на поверхности, что способствует увеличению адгезии [1]. Повышение износостойкости поверхности деталей из титановых сплавов возможно путем оксидирования, насыщения бором, азотом, кремнием и др. [10, 11].

К одному из наиболее перспективных способов обработки поверхности изделий из титановых сплавов относят микродуговое оксидирование (МДО), которое позволяет за короткое время сформировать прочно сцепленное с подложкой покрытие. Электролитно-плазменные покрытия в зависимости от параметров процесса формирования могут быть защитными (от коррозии), износостойкими, гидрофобными или гидрофильными либо в различных вариациях сочетать перечисленные свойства [12–14]. Изделия и детали из титановых сплавов, обработанные методом МДО, могут быть лишены присутствующих им недостатков, поскольку электролитно-плазменное покрытие представляет собой защитный износостойкий керамоподобный слой толщиной до нескольких сотен микрометров. Покрытия хорошо сцеплены с подложкой, компактны и термостойки, не разрушаются под воздействием механических и термических нагрузок [14–19].

Данные коррозионно- и износостойкие слои могут быть получены на титане и его сплавах в водных растворах нетоксичных электролитов под высоким напряжением (до 600 В). Возможно формирование покрытий с малой сквозной пористостью, что обеспечивает «экранирование» поверхности, при существенном повышении ее износостойкости по сравнению с необработанным титановым сплавом. Покрытие представляет собой керамоподобный слой на металлической основе. В составе покрытия ввиду особенностей процесса МДО формируются высокотемпературные фазы и модификации – например, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и TiO_2 в виде рутила, обладающие повышенной микротвердостью, износостойкостью и адгезией к клеям [20–26].

В данной статье рассмотрен способ формирования покрытий на изделиях из титановых сплавов, который позволяет формировать как износостойкие, так и адгезионные покрытия путем варьирования концентраций входящих в состав электролита компонентов. Предложенный способ может найти применение при подготовке поверхности титановых сплавов к нанесению полимерных покрытий, для повышения износ- и коррозионной стойкости деталей из титановых сплавов. Подобные покрытия используются в авиа- и кораблестроении, в медицине для обработки имплантатов и в качестве материалов пары трения – например, при изготовлении протезов суставов.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводили на образцах из титанового сплава марки VT5 диаметром 20 мм и толщиной 7 мм. Химический состав данного сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава марки VT5 (% (по массе))

Ti	Al	Mo	V	Zr	Si	Fe	C	O	N	H
Основа	5,420	0,270	0,420	0,020	0,017	0,065	0,005	0,100	0,008	0,003

Микродуговое оксидирование проведено в анодно-катодном режиме при частоте 50 Гц, равенстве анодного и катодного токов и их суммарной плотности 30 А/дм². Продолжительность обработки составила 20 мин.

Исследование влияния состава электролита на толщину и морфологию поверхности, а также на состав, электрофизические характеристики и электрохимическое поведение электролитно-плазменных покрытий проводили в силикатно-щелочных электролитах, содержащих 2,5 г/л раствора гидроксида калия (KOH), 9 г/л жидкого натриевого стекла и добавку сульфата никеля (NiSO₄) в концентрации 0,5 (электролит 1) и 5 г/л (электролит 2).

Толщину электролитно-плазменных покрытий определяли с помощью вихревого толщиномера VT-201, а морфологические характеристики поверхности исследовали при помощи оптического микроскопа Neophot.

Исследования элементного состава поверхностного слоя покрытий проводили методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа на приборе Camebax. При этом использовали твердотельный Si(Li)-детектор. Глубина анализа составляла ~1 мкм при растре сканирования 50 мкм², ускоряющем напряжении 15 кэВ, токе 150 нА и продолжительности набора спектра 100 с.

Электрические характеристики электролитно-плазменных покрытий исследовали путем измерения проводимости с помощью универсального автоматического измерителя RLC (E7-8) на переменном токе с частотой 1000 Гц после нанесения на поверхность образцов токопроводящего клея «Контактол» (площадь нанесения 1 см²) и последующего расчета удельного электрического сопротивления оксидного слоя.

Пробойное напряжение измеряли с помощью пробойной установки УПУ-5М. К тестируемому образцу с электролитно-плазменным покрытием прикладывалось линейно нарастающее во времени напряжение со скоростью развертки 10 В/с, одновременно измеряли протекающий через покрытие электрический ток. В момент превышения протекающим через диэлектрическое покрытие током порогового значения (0,1 мА – рекомендуемый ток регистрации пробоя) фиксировали напряжение пробоя. Электрическую прочность покрытий рассчитывали как отношение пробойного напряжения к толщине покрытия.

Электрохимические исследования проводили в растворе серной кислоты концентрацией 25 % (по массе) при температуре 25 °С. После выдержки в катодной области в течение 500 с при значении потенциала –1,0 В (относительно насыщенного хлор-серебряного электрода) задавалась потенциодинамическая поляризация из катодной области в анодную со скоростью развертки 1 мВ/с.

Результаты и обсуждение

Можно выделить два принципиально разных вида электролитно-плазменных покрытий, формируемых на титановых сплавах из силикатно-щелочных электролитов. Первый вид представляет собой коррозионностойкое покрытие с относительно невысокой износостойкостью, состоит преимущественно из диоксида кремния и характеризуется высокой поверхностной пористостью. Второй вид покрытий состоит в основном из

диоксида титана в фазе рутил с включениями диоксида кремния и обладает более высокой износостойкостью, но меньшей коррозионной стойкостью по сравнению с первым видом. Первый вариант больше подходит для подготовки поверхности к нанесению полимерных материалов вследствие большей поверхностной пористости, второй – предпочтителен для обработки трущихся поверхностей. Возможен промежуточный вариант, когда покрытие состоит из смеси диоксида кремния и диоксида титана [27].

При одинаковой продолжительности оксидирования (20 мин) из электролита 1 (0,5 г/л NiSO₄) формируется покрытие молочно-белого цвета толщиной ~40 мкм, а из электролита 2 (5 г/л NiSO₄) – покрытие черного цвета толщиной ~15 мкм, что обеспечено включением соединений никеля в его состав. Морфология поверхности электролитно-плазменных покрытий представлена на рис. 1.

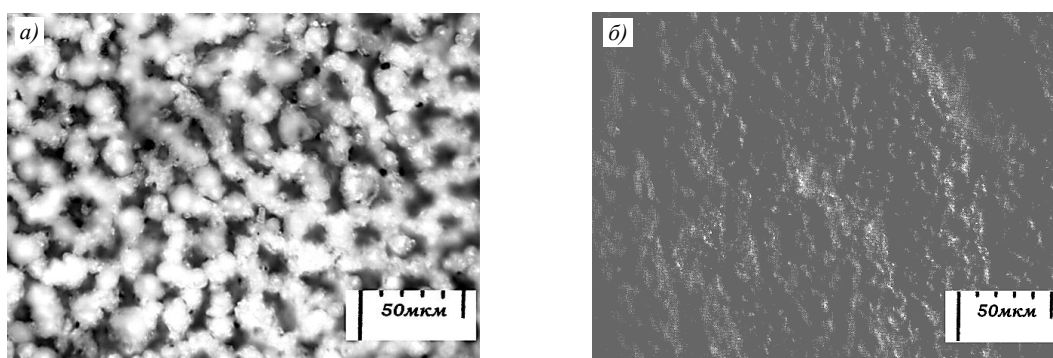


Рис. 1. Морфология поверхности образцов из сплава марки ВТ5 с покрытиями, сформированными методом микродугового оксидирования в электролитах с добавкой 0,5 (а) и 5 г/л (б) сульфата никеля

Покрытия, формируемые методом МДО в электролитах с низким содержанием NiSO₄ (рис. 1, а), обладают ярко выраженной поверхностной пористостью, что является положительным фактором для увеличения прочности соединения с полимерами. В электролитах с высоким содержанием NiSO₄ формируются менее пористые, компактные покрытия, что способствует увеличению износостойкости при изготовлении пар трения.

Элементный состав МДО-покрытий, сформированных в электролитах 1 и 2, приведен в табл. 2. Исследования элементного состава полученных покрытий показали, что при низкой концентрации NiSO₄ в электролите (0,5 г/л) в покрытии преобладают кислород и кремний, при более высокой концентрации NiSO₄ (5 г/л) – кислород, титан и кремний. При увеличении концентрации сульфата никеля в растворе содержание никеля в покрытии увеличивается с 0,47 до 3,50 % (по массе).

Таблица 2

Элементный состав электролитно-плазменных покрытий

Элемент	Содержание элементов в покрытии, сформированном в электролите			
	1		2	
	% (атомн.)	% (по массе)	% (атомн.)	% (по массе)
O	64,66±1,40	50,18±1,09	65,01±1,87	43,33±1,25
Al	1,36±0,77	1,79±1,01	2,22±0,83	2,50±0,94
Si	32,89±3,17	44,94±4,33	14,26±3,91	16,69±4,57
Ti	1,12±0,88	2,62±2,06	16,92±2,13	33,77±4,25
Ni	0,16±0,13	0,47±0,36	1,43±0,85	3,50±2,08

Увеличение содержания в покрытии титана и никеля и уменьшение содержания кремния при оксидировании в электролите с добавкой 5 г/л NiSO₄ свидетельствует о затруднении процесса формирования материала электролитно-плазменных покрытий за счет силикатного компонента электролита при повышенном содержании сульфата никеля в нем. Сульфат никеля в щелочной среде образует гидроксид никеля, который в зоне микродуговых разрядов разлагается с образованием оксидов никеля. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению pH электролита ниже уровня ~11, что запускает процесс гидролиза силиката натрия с образованием геля кремниевой кислоты, снижая возможность участия силикат-анионов в анодном процессе формирования электролитно-плазменного покрытия, о чем свидетельствует уменьшение толщины покрытия с 40 до 15 мкм.

Состав оксидных слоев значительно влияет на характеристики сформированных покрытий, в частности на электрические. Содержание никеля в оксидном слое, сформированном в электролите с добавкой 5 г/л NiSO₄, составляет 3,5 % (по массе) (табл. 1). Исходя из этого, следовало бы ожидать повышения электропроводности и снижения удельного электрического сопротивления покрытия по сравнению с аналогичными электролитно-плазменными покрытиями на титане, полученными в силикатно-щелочных или алюминатных электролитах, не содержащих соединений никеля. Однако, как показали измерения электрических характеристик оксидных слоев, сформированных в никельсодержащих электролитах, наблюдается весьма высокое удельное электрическое сопротивление. Причем для покрытий, полученных в электролите, содержащем 5 г/л NiSO₄, оно в 3,5 раза больше, чем для покрытий, полученных в электролите с добавкой 0,5 г/л NiSO₄ (табл. 3).

Таблица 3

Электрические свойства электролитно-плазменных покрытий

Свойства	Значение свойств для электролита	
	1 (с толщиной покрытия 40 мкм)	2 (с толщиной покрытия 15 мкм)
Электропроводность, нСм	0,3	0,2
Удельное электрическое сопротивление, ГОм·м	8	31
Пробойное напряжение, В	630	260
Электрическая прочность, В/мкм	15,75	17,33

Таким образом, наличие в составе оксидного слоя никеля и повышение его содержания почти на порядок не приводит к увеличению электропроводности электролитно-плазменных покрытий. Это особенно важно для практического применения данных покрытий в парах трения, так как свидетельствует о высоких изоляционных свойствах покрытий, коррозионной стойкости и, косвенно, о низкой сквозной пористости.

Содержание сульфата никеля в электролите влияет также на электрохимические характеристики полученных покрытий. Для исследования их сквозной пористости проведены поляризационные измерения в модельном 25 %-ном растворе серной кислоты. Столь жесткие условия выбраны в связи с тем, что титан и его сплавы пассивируются при анодной поляризации в широком ряду сред.

Анодные поляризационные кривые для образцов из сплава марки VT5 без покрытия и с МДО-покрытиями (рис. 2) имеют сходный характер, а именно: максимум анодного тока находится при значении потенциала: -0,35 В, а область пассивности – положительнее (-0,2 В). Поляризационные кривые для образцов из сплава VT5 и с

электролитно-плазменным покрытием, полученным в электролите с добавкой 5 г/л NiSO_4 , в зоне максимума анодного растворения (от $-0,5$ до $-0,2$ В) практически совпадают. Далее, в пассивной области, ток для образца с покрытием становится меньше, чем для образца из сплава ВТ5 без покрытия. Токи для образца с покрытием, полученным в электролите с добавкой 0,5 г/л NiSO_4 , приблизительно на полпорядка меньше. Это может быть связано с большей толщиной покрытия и, соответственно, с более низкой сквозной пористостью.

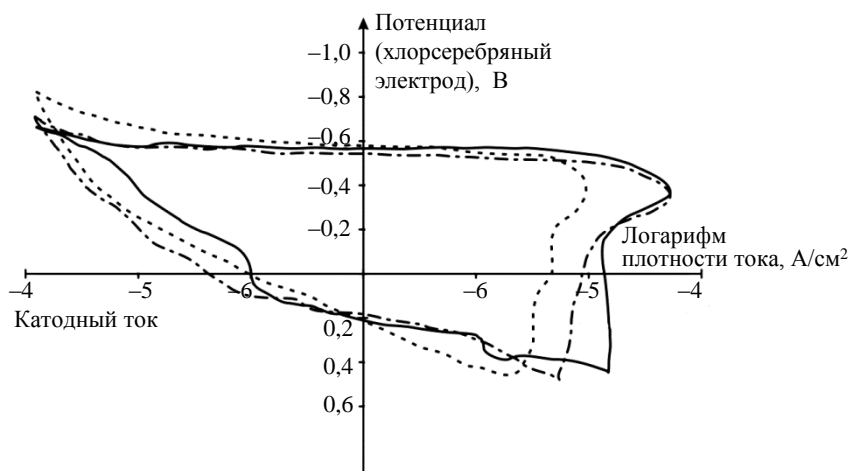


Рис. 2. Поляризационные кривые для образцов из сплава марки ВТ5 без покрытия (—) и с покрытием (— · — электролит 1 и - - - электролит 2), полученные при испытании в растворе серной кислоты (25 % (по массе)) при температуре 25 °С

После анодной поляризации цвет покрытий изменяется, особенно для образцов, полученных в электролите с добавкой 5 г/л NiSO_4 (рис. 3), – поверхность светлеет, что обусловлено вытравлением соединений никеля.

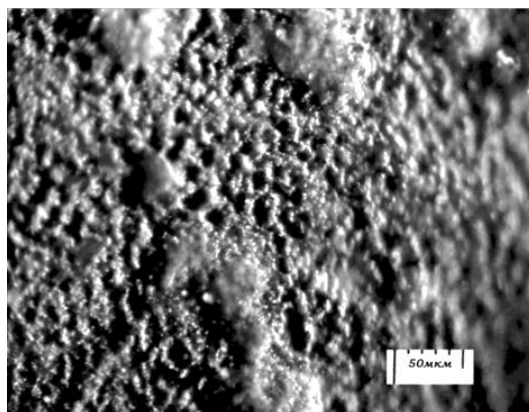


Рис. 3. Морфология поверхности образца из сплава марки ВТ5 с покрытием (электролит 2) после анодной поляризации

Таким образом, образцы с электролитно-плазменным покрытием, полученным в электролите с добавкой 0,5 г/л NiSO_4 , состоящие преимущественно из диоксида кремния, показали наилучшую коррозионную стойкость при анодном растворении (наименьшие токи). При этом введение сульфата никеля в электролит для МДО в количестве 0,5 г/л несущественно влияет на состав полученного покрытия. Увеличение

содержания NiSO_4 в электролите до 5 г/л приводит к значительному уменьшению толщины МДО-покрытия и изменению его состава, существенно увеличивая в нем содержание оксидов титана и никеля.

Кроме того, покрытие, содержащее значительное количество оксида титана, должно обладать более высокой износостойкостью [28, 29], что является необходимым условием для применения подобных покрытий в качестве пар трения.

Коррозионные испытания покрытий в модельном 25 %-ном растворе серной кислоты при 100 °С подтвердили сделанные на основании анодных поляризационных кривых предположения о более высокой коррозионной стойкости покрытий, формируемых в электролите с добавкой 0,5 г/л NiSO_4 . Так, время до разрушения покрытия, состоящего преимущественно из диоксида кремния, было больше по сравнению с покрытием, содержащим большую часть диоксида титана. Разрушение зафиксировано как визуально, так и по резкому смещению потенциала коррозии в область отрицательных значений.

Заключения

Увеличение концентрации сульфата никеля в электролите с 0,5 до 5 г/л приводит к уменьшению толщины электролитно-плазменного покрытия с 40 до 15 мкм и снижению его сквозной пористости.

Введение сульфата никеля в количестве 0,5 г/л в электролит для обработки методом МДО не оказывает значительного влияния на состав покрытия, состоящего преимущественно из оксида кремния.

Увеличение концентрации сульфата никеля в силикатно-щелочном электролите до 5 г/л приводит к снижению содержания в покрытии кремния и увеличению содержания титана и никеля.

Увеличение содержания никеля в покрытии с 0,47 до 3,5 % (по массе) не приводит к повышению его электрической проводимости.

Увеличение концентрации сульфата никеля с 0,5 до 5 г/л в электролите для обработки методом МДО снижает коррозионную стойкость покрытий в модельном растворе серной кислоты (25 % (по массе)).

Библиографический список

1. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 25–35.
2. Томашов Н.Д. Титан и коррозионностойкие сплавы на его основе. М.: Металлургия, 1985. 80 с.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // *Наука и жизнь*. 2012. № 11. С. 16–21.
5. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо-альфа-титанового сплава ВТ4 // *Титан*. 2016. № 2 (52). С. 33–42.
6. Molitor P., Young T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2002. Vol. 22. P. 101–107.
7. Ditchek B.M., Breen K.R., Sun T.S., Venables J.D. Morphology and composition of titanium adherends prepared for adhesive bonding // *Proceedings of 25th National SAMPE Symposium*. 1980. P. 13–24.
8. Method of coating titanium articles and product thereof: pat. US 2864732; filed 05.10.53; publ. 16.12.58.

9. Mahoon A. Titanium adherens // *Durability of structural adhesives* / ed. A.J. Kinloch. London: Applied Science Publishers, 1983. P. 255.
10. Горлов Д.С., Александров Д.А., Заклякова О.В., Азаровский Е.Н. Исследование возможности защиты интерметаллидного титанового сплава от фреттинг-износа путем нанесения ионно-плазменного покрытия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 4 (64). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-51-58.
11. Белкин П.Н., Кусманов С.А. Азотирование технического титана при анодной электролитно-плазменной обработке // *Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф. (Москва, 25–26 нояб. 2014 г.)*. М.: Моск. авиац. технол. ин-т, 2014. С. 273–276.
12. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое оксидирование магниевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
13. Гнеденков С.В., Сидорова М.В., Синебрюхов С.Л., Антипов В.В., Бузник В.М., Волкова Е.Ф., Сергиенко В.И. Строение и свойства покрытий, полученных методом плазменного электролитического оксидирования на авиационных магниевых сплавах // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 36–45.
14. Сибилева С.В., Козлова Л.С. Обзор технологий получения покрытий на титановых сплавах плазменным электролитическим оксидированием // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S2 (44). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-3-10.
15. Шашкина Г.А., Иванов М.Б., Легостаева Е.В., Шаркеев Ю.П. и др. Биокерамические покрытия с высоким содержанием кальция для медицины // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № S1-2. С. 123–126.
16. Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В. и др. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2019. Т. 24. № 4. С. 363–369. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-4-363-369.
17. Легостаева Е.В., Комарова Е.Г., Шаркеев Ю.П., Уваркин П.В. Исследование влияния напряжения микродугового оксидирования на физико-химические свойства кальцийфосфатных покрытий на титане // *Перспективные материалы*. 2011. № S13. С. 456–465.
18. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое оксидирование магниевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
19. Сибилева С.В., Князев А.В., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Плазменное электролитическое оксидирование титановых сплавов с целью защиты от контактной коррозии сопряженных элементов из алюминиевых сплавов // *Коррозия: материалы, защита*. 2019. № 6. С. 1–6. DOI: 10.31044/1813-7016-2019-0-6-1-6.
20. Штефан В.В., Смирнова А.Ю. Получение Se-, Zr-, Cu-содержащих оксидных покрытий на титане методом микродугового оксидирования // *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 12. С. 1309–1316. DOI: 10.7868/S0424857015120105.
21. Нечаев Г.Г. Микродуговое оксидирование титановых сплавов в щелочных электролитах // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2012. Т. 14. № 4. С. 453–455.
22. Митрошин А.Н., Иванов П.В., Розен А.Е. и др. Сравнительная оценка остеоинтеграции винтовых конических и цилиндрических титановых имплантатов, обработанных методом микродугового оксидирования // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 9-3. С. 447–451.
23. Легостаева Е.В., Толкачева Т.В., Комарова Е.Г. и др. Микроструктура и физико-механические свойства кальцийфосфатных покрытий, полученных методами микродугового оксидирования и детонационно-газового напыления // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. № 1 (58). С. 63–68.
24. Андреев А.С., Снежко А.А. Влияние состава электролита на структуру и свойства оксидных покрытий, сформированных на титановых сплавах микродуговым оксидированием // *Решетневские чтения: материалы XIII Международ. науч. конф., посвящ. 50-летию Сибирск. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск, 10–12 нояб. 2009 г.)*: в 2 ч. Красноярск, 2009. Ч. 1. С. 307–308.

25. Легостаева Е.В., Шаркеев Ю.П., Эшле М., Примаков О. Структура и свойства микродуговых кальцийфосфатных покрытий на поверхности сплавов титана и циркония // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 10. С. 23–28.
26. Печерская Е.А., Голубков П.Е., Карпанин О.В. и др. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2019. Т. 24. № 4. С. 363–369.
27. Герасимов М.В., Богдашкина Н.Л., Залавутдинов Р.Х. и др. Влияние добавок Ni, Co и Fe в силикатно-щелочной электролит для микродугового оксидирования на характеристики сформированных на титане покрытий // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 11. С. 35–40.
28. Алякрещкий Р.В., Раводина Д.В., Трушкина Т.В. и др. Исследование коррозионной стойкости защитных покрытий на титановых сплавах, полученных методом микродугового оксидирования // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения ген. конструктора ракетно-космических систем акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск, 11–14 нояб. 2014 г.): в 2 ч. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 7–8.
29. Кузнецов Ю.А., Кулаков К.В. Исследование микротвердости покрытий, сформированных микродуговым оксидированием // Наукові нотатки. 2011. № 33. С. 104–106.