

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-79-84

УДК 678.742.2

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ К МОДИФИЦИРОВАННЫМ МДО-ПОКРЫТИЯМ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ

В. М. ШАПОВАЛОВ¹, И. И. ЗЛОТНИКОВ²⁺

¹Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

²Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, пр-т Октября, 48, 246746, г. Гомель, Беларусь

Целью работы является изучение влияния состава электролита на физико-механические свойства оксидно-керамических покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на поверхности алюминия. В качестве объектов исследований использовали фольгу и пластины из алюминия. Процесс оксидирования проводили в симметричном анодно-катодном режиме с использованием переменного тока частотой 50 Гц при постоянной плотности тока равной 6 А/дм². В качестве базового электролита использовали раствор, содержащий натриевое жидкое стекло — 13 г/л и гидроксид калия — 2,5 г/л. Модификаторами электролита служили соли поливалентных металлов: сульфат меди, хромокалиевые квасцы и бихромат калия в количестве 0,4 г/л. Установлено, что микродуговое оксидирование алюминия в щелочно-силикатных электролитах, содержащих соли поливалентных металлов, приводит к внедрению ионов металлов в оксидно-керамическое покрытие, что приводит к увеличению его микротвердости на 28–34%, снижению пористости. Была измерена прочность адгезионного соединения оксидированной алюминиевой фольги к различным термопластичным полимерам: полиамид 6, полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления и полиэтилентерефталат. Установлено, что применение для обработки алюминия щелочно-силикатных электролитов, содержащих соли поливалентных металлов, обеспечивает повышение до 90% адгезии полимеров к алюминию. Показано, что улучшению адгезионного взаимодействия в исследуемой системе способствует физико-химическое (хемосорбционное) взаимодействие между полимером и модифицированной оксидно-керамической поверхностью. Разработанные методы обработки поверхности алюминия позволяют значительно расширить области применения алюминия и его сплавов в качестве конструкционных материалов, в частности, для создания новых металлополимерных слоистых композитов с повышенной механической прочностью и долговечностью.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминий, оксидно-керамическое покрытие, адгезия, полимерное покрытие.

THE STUDY OF ADHESION OF POLYMER MATERIALS, MODIFIED WITH MAO-COATINGS ON ALUMINUM'S SURFACE

V. M. SHAPOVALOV¹, I. I. ZLOTNIKOV²⁺

¹V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

²Sukhoi State Technical University of Gomel, Octiabria Ave, 48, 246746, Gomel, Belarus

The aim of the work is to study the effect of the electrolyte composition on the physical and mechanical properties of oxide-ceramic coatings obtained by microarc oxidation on the surface of aluminum. Aluminum foil and plates were used as objects of research. The oxidation process was carried out in a symmetrical anode-cathode mode using an alternating current of 50 Hz at a constant current density of 6 A/dm². A solution

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: z_ai@tut.by

containing 13 g/l sodium liquid glass and 2.5 g/l potassium hydroxide was used as the base electrolyte. Electrolyte modifiers were the salts of polyvalent metals: copper sulfate, chromic acid and potassium bichromate in the amount of 0.4 g/L. It is established the microarc oxidation of aluminium in alkaline silicate electrolytes containing salts of polyvalent metals leads to the introduction of metal ions in the oxide-ceramic coating. As a result its microhardness increases at 28–34%, porosity decreases. The adhesive strength of oxidized aluminum foil to various thermoplastic polymers was measured: polyamide 6, high-pressure polyethylene, low-pressure polyethylene and polyethylene terephthalate. It was found that the use of alkali-silicate electrolytes containing salts of polyvalent metals for processing aluminum provides an increase of the adhesion of polymers to aluminum to 90%. It is shown that the physical and chemical (chemisorption) interaction between the polymer and the modified oxide-ceramic surface contributes to the improvement of the adhesion interaction in the system under study. The developed methods of surface treatment of aluminum can significantly expand the application fields of aluminum and its alloys as structural materials, in particular, to create new metal-polymer layered composites with increased mechanical strength and durability.

Keywords: micro-arc oxidation, aluminum, oxide-ceramic coating, adhesion, polymer coating.

Введение

Конструкционные элементы из алюминия и его сплавов находят широкое применение во многих отраслях техники: авиационной промышленности, машиностроении, строительстве и др. В то же время в процессе эксплуатации под воздействием агрессивных сред и неблагоприятных атмосферных факторов происходит ухудшение их свойств, что проявляется в интенсификации коррозионных процессов на поверхности алюминия и изменении, вследствие этого, физико-механических характеристик материала. Это приводит к снижению долговечности алюминиевых изделий, а иногда и к потере их эксплуатационной пригодности. В связи с этим возникает необходимость нанесения на такие изделия защитных покрытий, которые повышают их стойкость к воздействию различных агрессивных сред. Одним из эффективных направлений при получении таких покрытий является использование термопластичных полимерных материалов. Их применение позволяет не только защитить поверхность деталей, но и улучшить их декоративные свойства. Однако адгезионная прочность большинства полимерных покрытий к поверхности алюминия и его сплавов не всегда отвечает необходимым требованиям, что приводит к отслаиванию покрытия и ухудшению работоспособности эксплуатируемых изделий.

Для улучшения адгезионной прочности поверхность металла подвергают различным видам обработки. Так, известно [1–2], что предварительное оксидирование поверхности алюминия или его сплавов значительно повышает адгезионную прочность полимерных покрытий. Оксидные пленки на поверхности алюминиевых сплавов получают либо путем химической обработки, либо путем анодирования в электролитах при соответствующих токовых режимах. В частности, в тех же работах [1–2] проанализировано влияние химического окисления и анодного оксидирования в различных растворах на прочность клеевых соединений алюминиевых сплавов и отмечено, что оксидирование с использованием хромовокислотных электролитов является оптимальным способом подготовки поверхности алюминиевых сплавов. Однако такие виды обработки часто не обеспе-

чивают достаточно высокую адгезионную прочность полимеров к металлической поверхности.

Известны попытки применить технологию микродугового оксидирования (МДО) поверхности алюминиевых сплавов для повышения их адгезии к сверхвысокомолекулярному полиэтилену [3], полиамиду [4], а также фторопласту [5]. Однако систематические исследования адгезионных явлений между полимерами и оксидно-керамическими покрытиями, полученными методом МДО, не проводили. Это связано с тем, что МДО алюминия и его сплавов, которое проводят, как правило, в растворе щелочно-силикатных электролитов, является сложным многофакторным процессом, зависящим от состава электролита, токового режима, состава алюминиевого сплава и др. Под действием высокого напряжения на поверхности алюминия возникают мигрирующие точечные разряды, которые в процессе оксидирования образуют оксидно-керамическое покрытие, прочно сцепленное с основой. Согласно современным представлениям [6–8] разряд при МДО является газовым и возникает в результате электрического пробоя парогазовых «пробок», образующихся в микропорах растущего пористого оксидного слоя. В результате на поверхности анода формируется оксидно-керамическое покрытие, состоящее преимущественно из кристаллических оксидов алюминия: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ во внутренних слоях и муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) во внешних. Регулируя составы электролита и режимы проведения оксидирования, можно в значительной степени изменять механические и физико-химические свойства получаемых покрытий, а, следовательно, и их адгезионные свойства. Результаты ранее проведенных авторами исследований [4] свидетельствуют о том, что при МДО возможен переход ионов металлов из электролита в объем формируемого оксидного слоя, что изменяет свойства покрытия. Однако влияние такого процесса на адгезионные свойства получаемых МДО-покрытий не изучали.

Цель работы — изучение влияния состава электролита на физико-механические свойства оксидно-керамических покрытий, полученных методом МДО на поверхности алюминия. Исследование возможности повышения адгезионной прочности соединений полимер-алюминий путем предварительной обработки

поверхности алюминия методом МДО в щелочно-силикатных электролитах, содержащих модифицирующие ионы поливалентных металлов.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследований использовали алюминиевую фольгу марки АД1 толщиной 100 мкм и алюминиевые пластины толщиной 1 мм, из которых изготавливали прямоугольные электроды площадью 10 см². Процесс МДО алюминия проводили в симметричном анодно-катодном режиме с использованием промышленного переменного тока частотой 50 Гц при постоянной плотности тока равной 6 А/дм², которую поддерживали, повышая напряжение по мере роста толщины покрытия, начиная с нескольких вольт до конечного напряжения 380 В. Применение для проведения процесса МДО синусоидального тока с частотой 50 Гц позволяет использовать обычное промышленное напряжение, не прибегая к преобразователям частоты и выпрямителям, что значительно упрощает процесс. Плотность тока 6 А/дм² выбрали исходя из того, что при большей плотности тока происходит быстрый перегрев электролита, при меньшей — значительно увеличивается длительность процесса.

На основе ранее проведенных исследований [4, 9], в качестве базового электролита использовали раствор, содержащий натриевое жидкое стекло (ЖС) марки А по ГОСТ 13078 в количестве 13 г/л и гидроксид калия (КОН) в количестве 2,5 г/л. В качестве модификаторов в состав электролитов вводили водорастворимые соли поливалентных металлов: сульфат меди CuSO₄ марки А по ГОСТ 19347, хромокалиевые квасцы KCr(SO₄)₂ марки «Ч» по ГОСТ 4162 и бихромат калия K₂Cr₂O₇ марки «Ч» по ГОСТ 4220 в количестве 0,4 г/л. В выбранных солях хром имеет различную валентность – три и шесть соответственно. Согласно литературным данным, например [1, 2], именно эти соли наиболее перспективны при химическом окислении поверхности алюминия и его сплавов. Процесс МДО проводили в течение 40 мин. После завершения процесса образцы промывали сначала проточной, а затем дистиллированной водой и сушили при температуре 110–120 °С.

Для нанесения полимерных покрытий на обработанную методом МДО алюминиевую поверхность использовали: криогенно измельченный полиамид 6 (ПА6) марки ПА6-210/310 производитель ОАО «Гродно Азот», полиэтилен высокого давления (ПЭВД) марки 102-01К по ГОСТ 16336, полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 20308-005 по ГОСТ 16338 и полиэтилентерефталат (ПЭТ) марки ПЭТФ-С-75 по ГОСТ Р 51695. Покрытия формировали методом наплавления. Порошкообразный полимер насыпали на алюминиевую подложку, задавая толщину с помощью трафаретной рамки; прикатывали резиновым валиком через фторопластовую пленку и помещали в печь с температурой на 20–25 °С выше температуры плавления данного полимера. После оплавления полимера образцы термообработывали в печи при

температуре 140–160 °С в течение 30 мин.

Шероховатость поверхности образцов измеряли на профилометре-профилографе «Калибр ВЭИ» (завод «Калибр», Россия) согласно ГОСТ 19300 с относительной погрешностью ~10%. Толщину керамических покрытий оценивали с помощью оптического микроскопа на поперечных шлифах. Пористость покрытий (количество пор на единицу площади) определяли путем подсчета числа пор на выбранном участке микрофотографии покрытия. Подсчитывали поры, размеры которых лежат в пределах от 0,1 мкм до 10 мкм. Микротвердость покрытий измеряли по стандартной методике на микротвердомере «ПМТ-3» (АО «ЛОМО», Россия) при нагрузке 2 Н.

Для определения краевого угла смачивания использовали метод непосредственного измерения угла по форме изображения находящейся на исследуемой поверхности капли полифенилметилсилоксана, который был выбран как химически инертная жидкость, по смачивающей способности которой можно проводить сравнительный анализ энергетического состояния поверхности исследуемых покрытий. Прочность адгезионного соединения определяли методом отслаивания под углом 180° на образцах шириной 10 мм на универсальной испытательной машине «Instron» («Instron», США) при скорости 5 мм/мин.

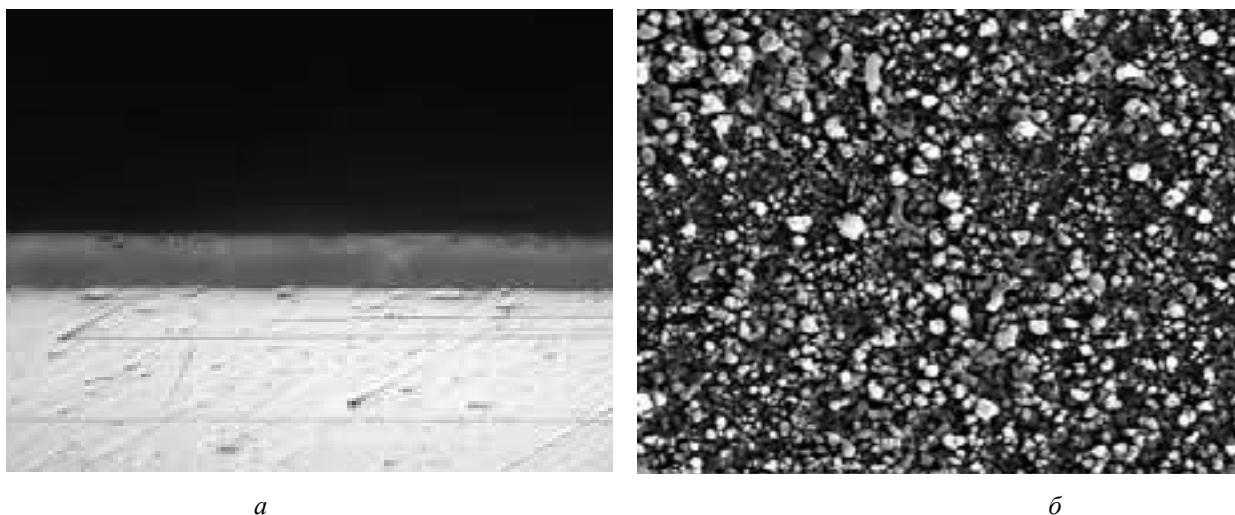
Результаты и их обсуждение

На рис. 1, а приведен вид поперечного шлифа алюминиевого образца с нанесенным покрытием толщиной около 60 мкм, а на рис. 1, б — вид поверхности оксидно-керамического покрытия после окончания процесса МДО. Их анализ указывает на формирование шероховато-пористой структуры поверхности покрытия, которая обеспечивает высокую механическую адгезию керамического покрытия к полимерам.

В табл. 1 приведены свойства оксидно-керамических покрытий, полученных по описанной выше технологии при использовании в составе электролита выбранных солей.

Проведенные исследования показали, что введение выбранных солей в состав электролита в процессе МДО способствует значительному изменению свойств получаемых покрытий. Так, цвет покрытия полностью изменяется, что свидетельствует о внедрении ионов металлов в материал покрытия. Микротвердость покрытия увеличивается на 28–34%, что обусловлено изменением структуры покрытия, а не его элементного состава. Известно [6], что сложные алумооксидные соединения состава Al_xMe_yO_z и керамика типа Al₂O₃–MeO, которые могут образовываться в результате внедрения ионов металла в состав МДО-покрытия, обладают меньшими показателями микротвердости в сравнении с чистой алюмооксидной керамикой Al₂O₃ и кристаллическим корундом. Образование более плотной структуры в материале приводит к снижению пористости покрытия.

При исследовании шероховатости покрытия установлено некоторое снижение этого показателя, что вероятно связано с уменьшением количества пор на единицу площади и уменьшением их размера.



а

б

Рисунок 1 — Микрофотографии: а – поперечного шлифа керамического покрытия на алюминии ($\times 120$); б – поверхности покрытия ($\times 400$)

Fig. 1 — Micrographs: а – cross-section of ceramic coating on aluminum ($\times 120$); б – surface of ceramic coating ($\times 400$)

Таблица 1 — Свойства модифицированных покрытий

Table 1 — Properties of modified coatings

Показатель	Соль-модификатор / № образца			
	Нет / №1	CuSO_4 / №2	$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$ / №3	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ / №4
Толщина, мкм	65	70	70	60
Цвет покрытия	Светло-серый	Темно-синий	Желто-серый	Коричневый
Микротвердость, ГПа	8,2	11,0	10,5	10,5
Пористость, см^{-2}	56	44	42	45
Шероховатость, R_a , мкм	2,8	2,1	2,0	2,2
Угол смачивания полифенилметилсилоксаном, θ , °	70	64	56	52

Представленные в табл. 2 данные по влиянию модифицирующих ионов на адгезионную прочность соединения полимер–алюминий для различных способов обработки поверхности алюминия показывают, что адгезия выбранных полимеров к не модифицированному керамическому покрытию имеет близкие значения для всех выбранных полимеров.

В то же время после введения в состав покрытия ионов переходных металлов, адгезионная прочность между покрытием и полимерами имеет существенное различие для различных полимеров и различных ионов-модификаторов. Так, например, адгезионная прочность ПА6 к МДО-покрытию модифицированному ионами хрома (образец № 4), возрастает на 90%, по сравнению с немодифицированным покры-

тием (образец № 1), в то время как для образцов № 2 и № 3 этот показатель значительно ниже.

Это нельзя объяснить изменением только механической составляющей адгезии, так как при модифицировании покрытий его шероховатость и пористость изменились незначительно. Поэтому механизм увеличения прочности адгезионного соединения полимер–алюминий при его МДО связан с изменением энергетического состояния поверхности керамического покрытия, т. е. увеличением поверхностной энергии. Об этом свидетельствует заметное повышение ее смачиваемости (табл. 1). Установлено, что краевой угол смачивания МДО-покрытия полифенилметилсилоксаном уменьшается до 25%, в сравнении с этим показателем для немодифицированного покрытия.

Таблица 2 — Адгезионная прочность соединения полимер–алюминий, кН/м

Table 2 — Adhesive strength of the polymer–aluminum joint, kN/m

Полимер	Образцы покрытия (табл. 1)			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
ПА6	1,52	2,28	2,71	2,92
ПЭНД	1,35	1,67	1,85	1,88
ПЭВД	1,38	1,62	1,80	1,92
ПЭТ	1,44	1,95	2,38	2,35

Улучшению адгезионного взаимодействия в исследуемой системе, по-видимому, способствует и физико-химическое (хемосорбционное) взаимодействие между полимером и модифицированной оксидно-керамической поверхностью. Так, в работах [10, 11] установлено, что наличие в полимерах (на примере полипропилена) таких активных групп как карбоксильные или гидроксильные (даже в небольшом количестве) значительно увеличивает адгезионное взаимодействие вследствие образования водородных связей между полимером и гидратированной поверхностью оксида алюминия, а в случае дегидратированной поверхности полипропилен способен взаимодействовать с координационно-ненасыщенными ионами Al^{3+} с образованием комплексных соединений. При этом в работах [2, 12], показано, что эпоксидные полимеры химически взаимодействуют с имеющимися на поверхности оксида алюминия активными кислотными и основными центрами Al^{3+} , O^{-2} , OH^- . Это позволяет предположить возможность протекания аналогичных процессов и в рассматриваемых адгезионных соединениях.

Положительное влияние модифицирования МДО-покрытий на адгезионную прочность соединения полимер-керамическое покрытие подтверждается также изменением характера разрушения данного соединения. Визуальный осмотр поверхностей разрушения (после отслаивания полиамидного покрытия) показал, что в случае использования немодифицированного покрытия разрушение носит смешанный характер, т. е. площадь адгезионного отслаивания полимера относится к площади когезионного разрушения полимерного слоя примерно, как 1:1. В случае использования модифицированных керамических покрытий площадь когезионного разрушения соединения ПА6 составляет более 80%. Этот факт также свидетельствует об усилении физико-химического взаимодействия между керамическим покрытием и полимерной фазой в исследуемой системе. В то же время для выяснения закономерностей взаимодействия в таких системах и его влияния на адгезионную прочность соединения полимеров с керамической поверхностью необходимо проведение дополнительных исследований.

Результаты проведенных исследований использовали при разработке новых высокопрочных слоистых металлополимерных композиционных материалов конструкционного назначения. Такие материалы широко используют в изделиях авиастроительной промышленности с целью уменьшения массы конструкций и увеличения срока их эксплуатации при увеличении надежности и безопасности. В качестве полимерного связующего использовали ПА6, в качестве армирующих элементов — листы из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм, подвергнутые МДО обработке по режиму образца № 4. Для сравнения использовали листы алюминия, изготовленные по режиму образца № 1

(без введения в электролит соли-модификатора). Слоистые материалы получали путем горячего прессования пакета из двух обработанных алюминиевых листов, разделенных слоем полимерного связующего толщиной около 1 мм. Свойства полученного модельного композиционного материала приведены в табл. 3. Контрольные образцы изготавливали так же, но алюминиевые листы подвергали только обезжириванию ацетоном.

Таблица 3 — Свойства слоистого материала
Table 3 — Properties of laminate

Показатель	Образец		
	Без МДО обработки	С обработкой № 1	С обработкой № 4
Межслоевая адгезия, кН/м	1,20	2,30	2,85
Характер разрушения (когезионный/-адгезионный), %	20/80	50/50	90/10

Как видно из данных табл. 3, модифицирование МДО-покрытий на поверхности алюминия ионами переходных металлов, в особенности ионами хрома (образец № 4), позволяет увеличить межслоевую адгезионную прочность в металлополимерном материале в среднем в 2 раза, по сравнению с необработанными образцами. Как следствие, это будет способствовать увеличению прочности таких материалов, а также их надежности и долговечности.

Выводы

Показано, что МДО алюминия в щелочно-силикатных электролитах, содержащих соли поливалентных металлов, способствует внедрению ионов металлов в оксидно-керамическое покрытие, что приводит к увеличению его микротвердости на 28–34%, снижению пористости, изменению физико-химических свойств керамической поверхности. В результате адгезионная прочность соединения полимер-алюминий повышается до 90%. Это позволяет значительно расширить области применения алюминия и его сплавов в качестве конструкционных материалов, в частности, для создания новых металлополимерных слоистых композитов с повышенной механической прочностью и долговечностью.

Обозначения

МДО — микродуговое оксидирование; ПА6 — полиамид 6; ПЭВД — полиэтилен высокого давления; ПЭНД — полиэтилен низкого давления; ПЭТ — полиэтилентерефталат; R_a , мкм — показатель шероховатости; θ , ° — угол смачивания.

Литература

1. Вёнецк З. Свойства адгезионных соединений окисленных и анодированных сплавов алюминия // Химическая промышленность. 2002. № 12. С. 52–55.
2. Вёнецк З. Влияние энергетического состояния поверхностей сплавов алюминия на прочность адгезионных клеевых со-

- единений // *Материалы, технологии, инструменты*. 2015. № 2. С. 80–83.
3. Вольхин А. М., Малышев В. Н. Исследование прочности сцепления сверхвысокомолекулярного полиэтилена с МДО-покрытием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 1. С. 27–32.
 4. Шаповалов В. М., Валенков А. М., Злотников И. И. Исследование структуры и свойств МДО-покрытий, модифицированных ионами переходных металлов // *Горная механика и машиностроение*. 2017. № 2. С. 90–95.
 5. Пятерко И. А. Оксидирование алюминия и его сплавов с образованием комбинированных покрытий с фторопластом при поляризации переменным асимметричным током: дис. канд. техн. наук: 05.17.03. Новочеркасск, 1999. 273 с.
 6. Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
 7. Парфенов Е. В., Невьянцева Р. Р., Горбатов С. А., Ерохин А. Л. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление. М.: Машиностроение, 2014. 380 с.
 8. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. Т. 2 / под ред. И. В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. 511 с.
 9. Пат. 19849 РБ, МПК С 25D 11/06. Способ получения светопоглощающего покрытия на поверхности алюминия или его сплавов / И. И. Злотников, С. В. Пискунов. 2016.
 10. Дорфман А. М., Ляхович А. М., Решетников С. М. Формирование координационных связей на границе оксид алюминия–полипропилен // *Защита металлов*. 1998. Т. 34, № 2. С. 134–138.
 11. Дорфман А. М., Ляхович А. М., Повстугар В. И., Столярова В. А., Решетников С. М. РФЭ-исследование взаимодействия модифицированного полипропилена с оксидом алюминия // *Защита металлов*. 1999. Т. 35, № 2. С. 139–145.
 12. Ситников П. А., Рябков Ю. И., Рязанов М. А., Белых А. Г., Васенева И. Н., Федосеев М. С., Терешатов В. В. Влияние кислотно-основных свойств поверхности оксида алюминия на реакционную способность с эпоксидными соединениями // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2013. Вып. 3. С. 19–26.
 3. Vol'khin A. M., Malyshev V. N. Issledovanie prochnosti stsepleniya sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena s MDO-pokrytiem [Study of adhesion strength of ultra-high molecular weight polyethylene with MDO coating]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2014, no. 1, pp. 27–32.
 4. Shapovalov V. M., Valenkov A. M., Zlotnikov I. I. Issledovanie struktury i svoystv MDO-pokrytyy, modifitsirovannykh ionami perekhodnykh metallov [Study of structure and properties of MDO coatings modified by transition metal ions]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mine mechanical engineering and machine-building], 2017, no. 2, pp. 90–95.
 5. Pyaterko I. A. Oksidirovanie alyuminiya i ego splavov s obrazovaniem kombinirovannykh pokrytyy s ftoroplastom pri polarizatsii peremennym asimmetrichnym tokom: dis. kand. tekhn. nauk [Oxidation of aluminium and its alloys with the formation of composite coatings with PTFE when the polarization variable asymmetric shock. Ph. D. eng. sci. diss.]. Novocherkassk, 1999. 273 p.
 6. Suminov I. V., Epel'fel'd A. V., Lyudin V. B., Krit B. L., Borisov A. M. *Mikrodugovoe oksidirovanie (teoriya, tekhnologiya, oborudovanie)* [Microarc oxidation (theory, technology, equipment)]. Moscow: EKOMET Publ., 2005. 368 p.
 7. Parfenov E. V., Nev'yantseva R. R., Gorbatkov S. A., Erokhin A. L. *Elektrolitno-plazmennaya obrabotka: modelirovanie, diagnostika, upravlenie* [Electrolyte-plasma treatment: modeling, diagnostics, control]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2014. 380 p.
 8. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov. T. 2* [Plasma electrolytic surface modification of metals and alloys. Vol. 2]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2011. 511 p.
 9. Zlotnikov I. I., Piskunov S. V. Sposob polucheniya svetopogloshchayushchego pokrytiya na poverkhnosti alyuminiya ili ego splavov [A method for obtaining a light-absorbing coating on the surface of aluminum or its alloys]. Patent RB, no. 19849, 2016.
 10. Dorfman A. M., Lyakhovich A. M., Reshetnikov S. M. Formirovanie koordinatsionnykh svyazey na granitse oksid alyuminiya–polipropilen [Formation of coordination links at the border of aluminum oxide-polypropylene]. *Zashchita metallov* [Protection of metals], 1998, vol. 34, no. 2, pp. 134–138.
 11. Dorfman A. M., Lyakhovich A. M., Povstugar V. I., Stolyarova V. A., Reshetnikov S. M. RFE-issledovanie vzaimodeystviya modifitsirovannogo polipropilena s oksidom alyuminiya [RFE-investigation of interaction of modified polypropylene with aluminum oxide]. *Zashchita metallov* [Protection of metals], 1999, vol. 35, no. 2, pp. 139–145.
 12. Sitnikov P. A., Ryabkov Yu. I., Ryazanov M. A., Belykh A. G., Vaseneva I. N., Fedoseev M. S., Tereshatov V. V. Vliyanie kislотно-osnovnykh svoystv poverkhnosti oksida alyuminiya na reaktivnost' s epoksidnymi soedineniyami [Influence of acid-base properties of aluminum oxide surface on reactivity with epoxy compounds]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Bulletin of the Komi Center, Ural Branch of RAS], 2013, is. 3, pp. 19–26.

References

Поступила в редакцию 05.04.2019

© В. М. Шаповалов, И. И. Злотников, 2019