

УДК 620.197:621.794.61

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ

© 2023 г. К. А. Аникин^а, *, А. А. Жуков^б, В. Н. Страполова^с, А. В. Эпельфельд^б

^аГосударственный научно-исследовательский институт приборостроения,
Москва, 129226 Россия

^бНациональный исследовательский университет “Московский авиационный институт”,
Москва, 125993 Россия

^сАкционерное общество “Композит”, Королев, 141070 Россия

*e-mail: airgear12@mail.ru

Поступила в редакцию 19.09.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Экспериментально изучено влияние продолжительности процесса микродугового оксидирования на толщину, шероховатость и оптические характеристики (коэффициент поглощения солнечного излучения α_s и коэффициент теплового излучения ϵ) терморегулирующих белых и черных покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве АМг6, предназначенных для использования в космической отрасли. Найдено, что α_s уменьшается с ростом толщины покрытий при увеличении продолжительности МДО-обработки. Снижение шероховатости белых покрытий сопровождается ростом ϵ . Для черных покрытий главную роль играет степень черноты покрытия (коэффициент излучения), которая зависит от содержания в нем оксида ванадия. Сравнительный анализ оптических характеристик терморегулирующих МДО-покрытий на различных алюминиевых сплавах показал, что белые покрытия класса “солнечный отражатель” лучше формировать на алюминиевом сплаве АМг3, а черные покрытия класса “истинный поглотитель” — на сплаве АМг6 методом микродугового оксидирования в течение 25 мин. Полученные экспериментальные данные могут служить основой для разработки базовой технологии формирования терморегулирующих покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов, предназначенных для использования в космической отрасли.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АМг6, микродуговое оксидирование, терморегулирующие покрытия космического назначения, толщина, шероховатость, коэффициент поглощения солнечного излучения, коэффициент теплового излучения, “солнечный отражатель”, “истинный поглотитель”.

DOI: 10.31857/S1028096023060031, EDN: DHMTRL

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных методов формирования защитных керамикоподобных покрытий на изделиях из вентильных металлов и их сплавов является плазменно-электролитическая обработка или, иначе, микродуговое оксидирование (МДО). В монографиях [1–3] подробно рассмотрены вопросы теории, технологии и оборудования для плазменно-электролитического модифицирования поверхности металлов и сплавов методом микродугового оксидирования. МДО позволяет формировать на поверхности алюминия и его сплавов не только износостойкие, коррозионно-защитные, но и терморегулирующие покрытия (ТРП) для космических аппаратов. Такие ТРП применяют для термостабилизации рабочих

режимов блоков бортовой аппаратуры и узлов космических и летательных аппаратов, на поверхность которых воздействует электромагнитное излучение Солнца. Данные покрытия также позволяют перераспределять тепло внутри приборов, отводя и переизлучая его от наиболее теплонагруженных участков. Коэффициенты поглощения солнечного излучения и теплового излучения терморегулирующих материалов покрытий являются основными терморadiационными характеристиками для расчета теплового режима космических аппаратов [4].

Для космического приборостроения в большинстве своем используют терморегулирующие покрытия на полимерной основе из полиамида или политетрафторэтилена [5, 6]. Однако в настоящее время в основном стали применять специальные

лакокрасочные ТРП (эмали) серии ЭКОМ [7]. Но покрытия эти имеют ряд недостатков, таких как невысокая адгезия и значительное ухудшение термооптических характеристик при длительной эксплуатации в открытом космическом пространстве из-за радиационного облучения и воздействия химически активного атомарного кислорода на низких околоземных орбитах [8–10].

В последние годы появилось значительное количество научных публикаций, посвященных получению, исследованию характеристик и применению ТРП, формируемых плазменно-электролитическим методом МДО [11–17]. Так, в работе [17] были исследованы структура, состав, оптические характеристики и стойкость к воздействию потока атомарного кислорода белых и черных терморегулирующих покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве АМг3. Было установлено, что воздействие потока атомарного кислорода на исследуемые покрытия приводит к незначительной, по сравнению с другими материалами, эрозии их поверхности. Рассчитанные после измерений коэффициента отражения коэффициенты поглощения солнечного излучения α_s и теплового излучения ϵ составили: $\alpha_s = 0.28$ и $\epsilon = 0.93$ — для белых ТРП; $\alpha_s = 0.95$ и $\epsilon = 0.88$ — для черных ТРП. Также были запатентованы способы получения терморегулирующих МДО-покрытий на изделиях из алюминия и алюминиевых сплавов, предназначенных для применения в космической отрасли [18, 19].

Характеристики МДО-покрытий зависят от природы обрабатываемого субстрата — подложки, состава и температуры электролита, типа и электрических параметров (плотность тока и др.) режима, а также продолжительности процесса МДО [1–3].

В настоящей работе экспериментально изучено влияние продолжительности процесса МДО на толщину, шероховатость поверхности и оптические характеристики (коэффициенты поглощения солнечного излучения α_s и теплового излучения ϵ) терморегулирующих белых и черных покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве АМг6 и проведен сравнительный анализ с оптическими характеристиками ТРП на алюминиевом сплаве АМг3.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Объектами исследования служили прямоугольные пластинки размером 40×40 мм, толщиной 2 мм из алюминиевого сплава АМг6 (5.8–6.8% Mg; 0.5–0.8% Mn, остальное Al) с белыми и черными терморегулирующими покрытиями, сформированными методом МДО.

МДО-обработку проводили в анодно-катодном режиме (50 Гц) при равенстве анодного и ка-

тодного токов и их суммарной плотности 10 А/дм² на экспериментальном оборудовании МАИ [3]. МДО-покрытия класса “солнечный отражатель” белого цвета формировали при комнатной температуре в силикатно-щелочном электролите, содержащем 2 г/л гидроксида калия и 6 мл/л жидкого стекла натриевого. При формировании покрытий класса “истинный поглотитель” черного цвета использовали электролит, содержащий 5 г/л гидроксида натрия, 20 мл/л жидкого стекла натриевого и 5 г/л ванадата аммония. Диапазон варьирования продолжительности МДО-обработки при формировании белых ТРП составлял 60–135 мин, а при формировании черных покрытий 15–45 мин.

Морфологию поверхности МДО-покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL серии JSM-6010. Толщину МДО-покрытий измеряли вихретоковым толщиномером ВТ-201, а шероховатость — с помощью профилометра Taylor Hobson.

Коэффициенты поглощения солнечного излучения α_s и теплового излучения ϵ были рассчитаны, согласно [4], после измерений коэффициента отражения на рефлектометрах солнечном “РС-К” [20] и инфракрасном “РИ-К” [21], соответственно. Согласно рекомендациям [4], измерения проводили при температуре $25 \pm 5^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения поверхности белых покрытий, сформированных при различной продолжительности МДО-обработки. При относительно монотонном росте толщины покрытий со средней скоростью ~ 0.6 мкм/мин (рис. 2а) на зависимости их шероховатости от продолжительности процесса МДО имеется явный минимум (рис. 2б), который коррелирует с морфологией поверхности покрытия, сформированного в течение 90 мин (рис. 1б). По-видимому, сначала в процессе оксидирования растущее покрытие в какой-то степени нивелирует исходную шероховатость металлической подложки, а затем при формировании пористого наружного технологического слоя МДО-покрытия [1] шероховатость вновь возрастает (рис. 1в).

Коэффициент поглощения солнечного излучения α_s относительно монотонно уменьшается при увеличении продолжительности обработки (рис. 3а) с ростом толщины белых МДО-покрытий (рис. 2а). Это может объясняться тем, что в наружном технологическом слое покрытия, который начинает формироваться и растет в силикатно-щелочных электролитах на поздних стадиях процесса МДО-обработки, содержится значительное количество диоксида кремния SiO_2 в виде

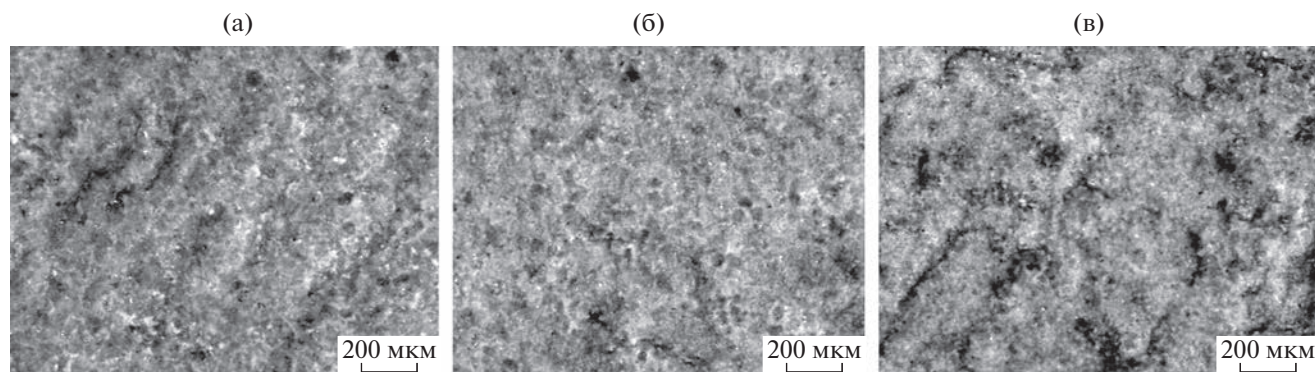


Рис. 1. Морфология поверхности белых покрытий, сформированных при продолжительности МДО-обработки 60 (а), 90 (б), и 120 мин (в).

кристаллических фаз α -кварца и α -кristобалита [2], которые эффективно отражают солнечные лучи.

На зависимости коэффициента теплового излучения ϵ от продолжительности МДО-обработки имеется явный максимум (рис. 3б), который коррелирует с минимумом шероховатости на аналогичной зависимости (рис. 2б). Видно, что они имеют фактически противоположный характер. Таким образом, можно констатировать, что для белых ТРП снижение шероховатости покрытия сопровождается ростом коэффициента теплового излучения.

На рис. 4 представлены РЭМ-изображения поверхности черных ТРП, сформированных при различной продолжительности МДО-обработки. При монотонном росте толщины покрытий со средней скоростью ~ 1.5 мкм/мин (рис. 5а) шероховатость при продолжительности процесса МДО до 25 мин растет с последующим выходом на плато при увеличении времени МДО (рис. 5б). Это в целом коррелирует с морфологией поверхности МДО-покрытий, представленных на рис. 4.

Как и для белых МДО-покрытий, для черных ТРП коэффициент поглощения солнечного излучения α_s уменьшается при увеличении продолжительности обработки (рис. 6а) с ростом толщины покрытий (рис. 5а).

В отличие от белых ТРП шероховатость черных МДО-покрытий никак не коррелирует с коэффициентом теплового излучения ϵ (рис. 5б, 6б). По-видимому, здесь главную роль играет степень черноты покрытия, которая зависит от содержания в нем оксида ванадия V_2O_5 , образующегося при термолизе в микродуговых разрядах ванадата аммония, содержащегося в электролите. Присутствие ванадия в черном ТРП было подтверждено методом рентгеноспектрального локального анализа ранее [17].

В табл. 1 представлены сравнительные оптические характеристики белых и черных ТРП, сфор-

мированных методом МДО, и лакокрасочных терморегулирующих покрытий (эмалей) серии ЭКОМ [7]. Видно, что белые МДО-покрытия,

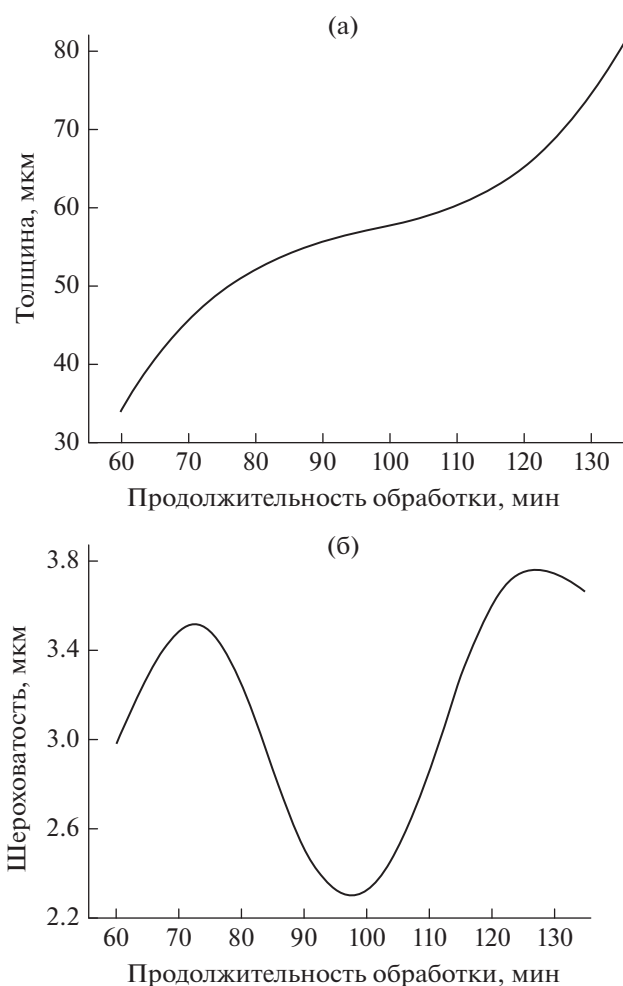


Рис. 2. Зависимости толщины (а) и шероховатости (б) белых покрытий от продолжительности МДО-обработки.

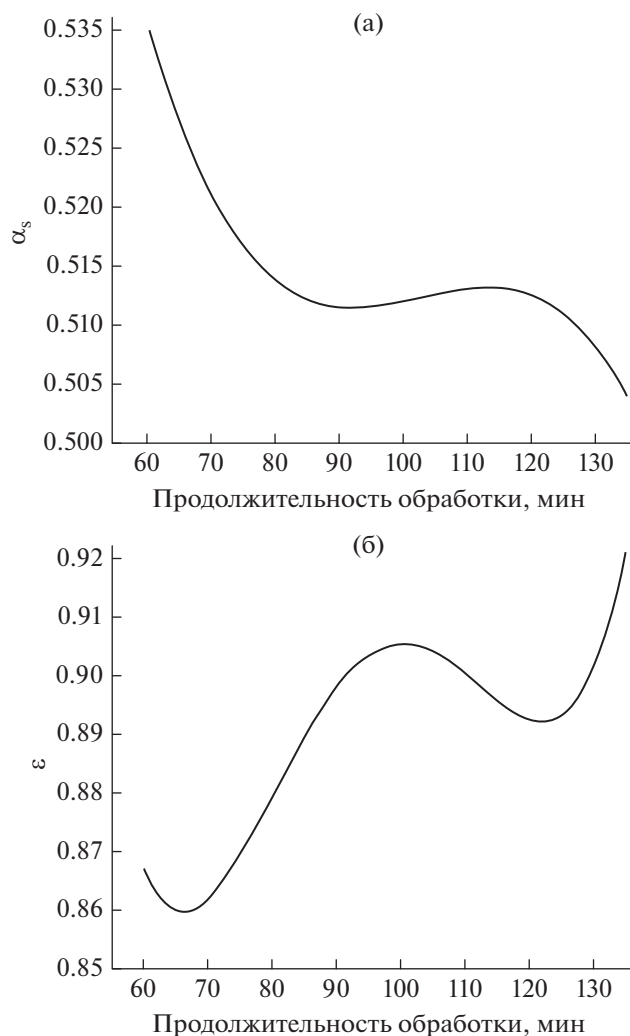


Рис. 3. Зависимости коэффициентов поглощения солнечного излучения α_s (а) и теплового излучения ϵ (б) белых покрытий от продолжительности МДО-обработки.

сформированные на алюминиевом сплаве АМг6 при продолжительности процесса МДО от 60 до 135 мин, не удовлетворяют требованиям к опти-

ческим характеристикам ТРП, применимым в космической отрасли, по значениям коэффициента поглощения солнечного излучения α_s : 0.51–0.54 (рис. 3) при требованиях $\alpha_s \leq 0.30$ [7]. В то же время белые ТРП, сформированные на алюминиевом сплаве АМг3, согласно [17], имеют $\alpha_s = 0.28$.

Различие в толщинах белых МДО-покрытий на сплавах АМг6 (35–85 мкм) и АМг3 (150 мкм при $\alpha_s = 0.28$ [17]) не позволяет объяснить данный феномен. При увеличении толщины белого МДО-покрытия на сплаве АМг6 с 35 до 85 мкм коэффициент поглощения солнечного излучения α_s уменьшается с 0.53 до 0.5 (рис. 2а, 3а). Аппроксимация показывает, что дальнейшее увеличение толщины до 150 мкм приведет к уменьшению α_s только до 0.45–0.46, что также не удовлетворяет требованиям [7].

Полученные результаты могут быть связаны с тем, что в алюминиевых сплавах системы Al–Mg, содержащих более 1–2% Mg, присутствуют эвтектические включения интерметаллидной β -фазы Al_3Mg_2 в α -твердом растворе магния в алюминии [22]. Следует отметить, что в сплаве АМг6 включений примерно в три раза больше, чем в сплаве АМг3 (~15% против ~5%). После МДО этих сплавов в силикатно-щелочном электролите интерметаллидные включения должны присутствовать в МДО-покрытиях примерно в тех же пропорциях в виде оксидных соединений типа шпинели $MgAl_2O_4$, форстерита Mg_2SiO_4 и энстатита $MgSiO_3$ [3], которые будут придавать серый оттенок белым покрытиям, увеличивая их коэффициенты поглощения солнечного излучения α_s и теплового излучения ϵ .

Черные МДО-покрытия, сформированные на алюминиевом сплаве АМг6 при продолжительности оксидирования 25 мин, удовлетворяют требованиям как по $\alpha_s = 0.95$, так и по коэффициенту теплового излучения $\epsilon = 0.93$ (рис. 6) при требованиях $\alpha_s \geq 0.95$ и $\epsilon \geq 0.92$ [7], в то время как ТРП, сформированные на алюминиевом сплаве АМг3,

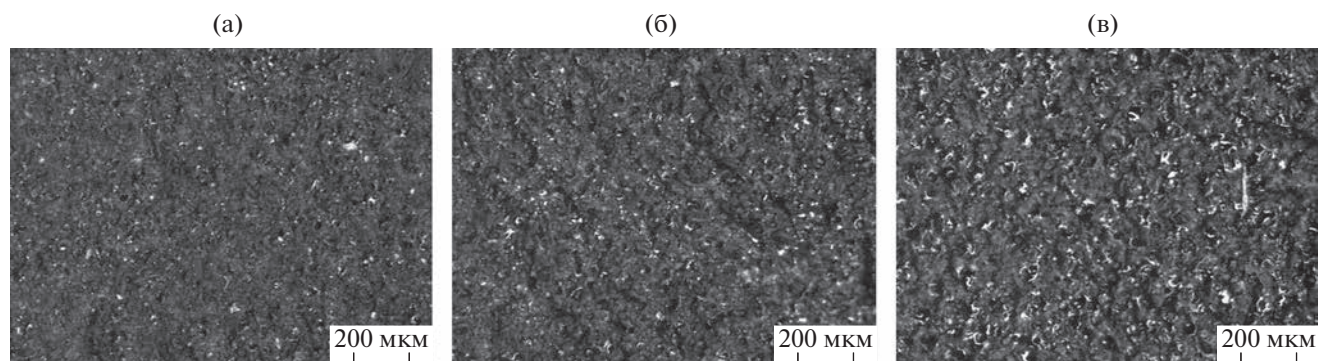
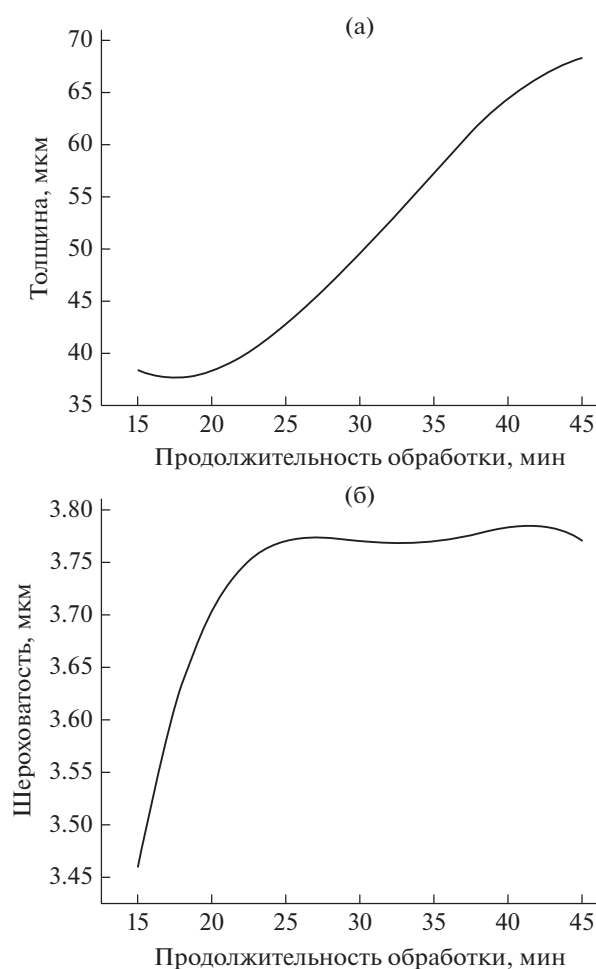
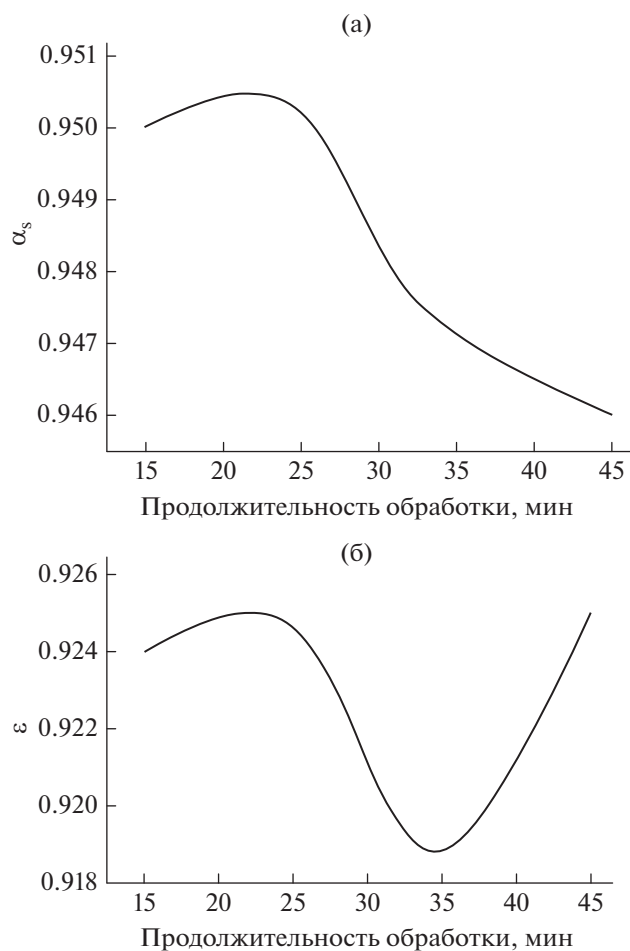


Рис. 4. Морфология поверхности черных покрытий, сформированных при продолжительности МДО-обработки 15 (а), 30 (б), и 45 мин (в).

Таблица 1. Оптические характеристики ТРП, сформированных методом МДО, и лакокрасочных ТРП (эмалей) серии ЭКОМ

Тип покрытия, подложка	Коэффициент поглощения солнечного излучения α_s	Коэффициент теплового излучения ϵ
Белое МДО-покрытие, сплав АМг6	$(0.51-0.54) \pm 0.03$	$(0.86-0.92) \pm 0.07$
Белое МДО-покрытие, сплав АМг3 [17]	0.28 ± 0.03	0.93 ± 0.07
Белая эмаль ЭКОМ-1, сплав АМг6 [7]	≤ 0.30	≥ 0.90
Черное МДО-покрытие, сплав АМг6	0.95 ± 0.03	$(0.92-0.93) \pm 0.07$
Черное МДО-покрытие, сплав АМг3 [17]	0.95 ± 0.03	0.88 ± 0.07
Черная эмаль ЭКОМ-2, сплав АМг6 [7]	≥ 0.95	≥ 0.92

**Рис. 5.** Зависимости толщины (а) и шероховатости (б) черных покрытий от продолжительности МДО-обработки.**Рис. 6.** Зависимости коэффициентов поглощения солнечного излучения α_s (а) и теплового излучения ϵ (б) черных покрытий от продолжительности МДО-обработки.

согласно [17], имеют неудовлетворительный $\varepsilon = 0.88$.

Таким образом, исходя из требований к оптическим характеристикам ТРП, предназначенных для использования в космических аппаратах, белые МДО-покрытия класса “солнечный отражатель” лучше формировать на алюминиевом сплаве АМг3 [17], а черные класса “истинный поглотитель” — на алюминиевом сплаве АМг6 при продолжительности оксидирования 25 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально изучено влияние продолжительности процесса МДО на толщину, шероховатость и оптические характеристики (коэффициенты поглощения солнечного излучения α_s и теплового излучения ε) терморегулирующих белых и черных покрытий, предназначенных для использования в космической отрасли, сформированных на алюминиевом сплаве АМг6.

Найдено, что коэффициент поглощения солнечного излучения α_s уменьшается с ростом толщины покрытий при увеличении продолжительности МДО-обработки. Это связано с тем, что в наружном технологическом слое покрытия содержится значительное количество диоксида кремния SiO_2 в виде кристаллических фаз α -кварца и α -кристобалита, которые эффективно отражают солнечные лучи.

Для белых МДО-покрытий снижение их шероховатости сопровождается ростом коэффициента теплового излучения ε . Для черных ТРП главную роль играет степень черноты покрытия, которая зависит от содержания в нем оксида ванадия V_2O_5 , образующегося при термоллизе в микродуговых разрядах ванадата аммония, содержащегося в электролите.

Сравнительный анализ МДО-покрытий на различных алюминиевых сплавах показал, что, исходя из требований к оптическим характеристикам ТРП, белые покрытия класса “солнечный отражатель” лучше формировать на алюминиевом сплаве АМг3, а черные покрытия класса “истинный поглотитель” — на сплаве АМг6 при продолжительности оксидирования 25 мин. Полученные экспериментальные данные могут служить основой для разработки базовой технологии формирования терморегулирующих покрытий космического назначения на изделиях из алюминиевых сплавов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность И.О. Кондрацкову за помощь в МДО-обработке образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. II. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
3. Эпельфельд А.В., Белкин П.Н., Борисов А.М., Васин В.А., Крит Б.Л., Людин В.Б., Сомов О.В., Сорокин В.А. Суминов И.В., Францевич В.П. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий. Т. I. Микродуговое оксидирование. М., СПб.: Реноме, 2017. 648 с.
4. ГОСТ Р 59313-2021 Системы космические. Методы измерения коэффициента поглощения солнечного излучения и коэффициента теплового излучения терморегулирующих покрытий и материалов. Дата введения 2021-06-01. Москва: Стандартинформ, 2021. 20 с.
5. Gilmore D.G. Spacecraft Thermal Control Handbook. V. I. California: The Aerospace Press, 2002. 836 p.
6. Spacecraft Thermal Control and Conductive Paints/Coatings* and Services Catalog. <http://www.aztechnology.com>. (1989) AZ Technology. Cited January 2008.
7. Лакокрасочные терморегулирующие покрытия (2022) АО Композит. <http://www.kompozit-mv.ru>.
8. Jaworske D.A., Kline S.E. Scientific and Technical Aerospace Report. <http://gltrs.grc.nasa.gov>. April 2008.
9. Jaworske D.A., Tuan G.C., Westheimer D.T., Peters W.C., Kauder L.R. // Sci. Tech. Aerospace Rep. <http://gltrs.grc.nasa.gov>. June 2008.
10. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Ред. Панасюк М.И., Новиков Л.С. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
11. Борисов А.М., Кирикова К.Е., Суминов И.В. // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 2. С. 42.
12. Tang H., Sun Q., Xin T., Yi C., Jiang Z., Wnag F. // Curr. Appl. Phys. 2012. V. 12. P. 284. <https://www.doi.org/10.1016/j.japsusc.2011.07.118>
13. Wang Y.M., Tian H., Shen X.E., Wen L., Ouyang J.H., Zhou Y., Jia D.C., Guo L.X. // Ceram. Int. 2013 V. 39. P. 2869. <https://www.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.09.060>
14. Al Bosta M.M., Ma K.-J., Chien H.-H. // Infrared Phys. & Technol. 2013. V. 60. P. 323. <https://www.doi.org/10.1016/j.infrared.2013.06.006>
15. Al Bosta M.M., Ma K.-J. // Infrared Phys. Technol. 2014. V. 67. P. 63. <https://www.doi.org/10.1016/j.infrared.2014.07.009>
16. Qixing X., Jiankang W., Guanjie L., Han W., Dongqi L., Zhongping Y., Zhaohua J. // Surf. Coat. Technol. 2016. V. 307. P. 1284. <https://www.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.073>
17. Аникин К.А., Борисов А.М., Желтухин А.В., Жуков А.А., Савушкина С.В., Федичкин И.Д., Черник В.Н., Эпельфельд А.В. // Поверхность. Рентген., син-

- хротр, и нейтрон. исслед. 2018. № 6. С. 18.
<https://www.doi.org/10.7868/S0207352818060045>
18. Патент 2691477 (РФ). Способ формирования многофункциональных терморегулирующих покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов / ФГБОУ “МАИ (НИУ)”. Аникин К.А., Борисов А.М., Желтухин А.В., Жуков А.А., Кондрацкий И.О., Крит Б.Л., Людин В.Б., Эпельфельд А.В. // Заявл. 09.04.2018. № 2018112550; опубл. 14.06.2019. Бюл. № 17.
 19. Патент 2740550 (РФ). Способ получения дифференциальных терморегулирующих покрытий космического назначения на изделиях из алюминия и алюминиевых сплавов / ФГБОУ “МАИ (НИУ)”. Жуков А.А., Эпельфельд А.В. // Заявл. 24.07.2020. № 2020124627; опубл. 15.01.2021. Бюл. № 2.
 20. № 78782-20. Рефлектометры солнечные “РС-К”. Утвержденные типы средств измерений. ФГИС “Аршин”. 2022 г.
<https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>
 21. № 79736-20. Рефлектометры инфракрасные “РИ-К”. Утвержденные типы средств измерений. ФГИС “Аршин”. 2022 г. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>
 22. Колачев Б.А. Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСиС, 2005. 428 с.

Effect of Microarc Oxidation Duration on the Characteristics of Thermal Control Coatings on Aluminum Alloy

K. A. Anikin^{1, *}, A. A. Zhukov², V. N. Strapolova³, A. V. Apelfeld²

¹“GosNIIP”, Moscow, 129226 Russia

²Moscow Aviation Institute, (National Research University), Moscow, 125993 Russia

³JSC “Kompozit”, Korolev, 141070 Russia

*e-mail: airgear12@mail.ru

The influence of microarc oxidation process duration on the thickness, roughness and optical characteristics (solar absorbance α_s and emissivity ϵ) of thermal control white and black cosmic coatings formed on an aluminum alloy AMg6 is studied experimentally. It is found that α_s decreases with an increase in the thickness of coatings with increasing microarc oxidation treatment duration. For white coatings, a decrease in their roughness is accompanied by an increase in ϵ , and vice versa. For black coatings, the main role is played by the degree of blackness of the coating, which is determined by the content of vanadium oxide in it. A comparative analysis of the optical characteristics of thermally controlled coatings obtained using microarc oxidation process on various aluminum alloys showed that it is better to form white coatings of the “solar reflector” class on an aluminum alloy AMg3, and black coatings of the “true absorber” class – on an aluminum alloy AMg6 with MAO treatment duration of 25 min. The obtained experimental data can serve as a framework for the development of basic technology for the formation of thermal control cosmic coatings on products made of aluminum alloys.

Keywords: aluminum alloy AMg6, microarc oxidation, thermal control cosmic coatings, thickness, roughness, coefficient of absorption of solar radiation, thermal emissivity, “solar reflector”, “true absorber”.