

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-102-111

ВЛИЯНИЕ ХЕЛАТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Э.К. Кондрашов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований терморегулирующих лакокрасочных покрытий на основе полиметилгидридсилоксанов. Показано влияние различных модифицирующих добавок на свойства получаемых покрытий. Установлено, что введение хелатных соединений редкоземельных элементов положительно влияет на свойства получаемых покрытий, а именно: позволяет минимизировать потерю массы при температуре 200 °С, повысить степень отверждения покрытий и снизить содержание летучих конденсирующихся веществ.

Ключевые слова: полиметилгидридсилоксаны, оксид цинка, терморегулирующие покрытия, термостойкая эмаль, редкоземельные элементы, летучие конденсирующиеся вещества

Для цитирования: Кондрашов Э.К. Влияние хелатных соединений редкоземельных элементов на свойства терморегулирующих покрытий // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-102-111.

Scientific article

INFLUENCE OF RARE-EARTH ELEMENT CHELATES ON PROPERTIES OF THERMOREGULATING COATINGS

E.K. Kondrashov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. This paper presents the results of experimental studies of thermal control paint coatings based on polymethylhydridesiloxanes. The influence of various modifying additives on the properties of the obtained coatings is demonstrated. It was determined that the introduction of rare-earth element chelates has a positive effect on the properties of the obtained coatings, namely: it minimizes the mass loss at 200 °C, increases the degree of curing of coatings and reduces the content of condensable volatile substances.

Keywords: polymethylhydridesiloxanes, zinc oxide, thermal control coatings, heat-resistant enamel, rare-earth elements, condensable volatile substances

For citation: Kondrashov E.K. Influence of rare-earth element chelates on properties of thermoregulating coatings. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-102-111.

Введение

В космической технике применяются покрытия трех основных классов, которые характеризуются значениями коэффициента поглощения солнечного излучения α_S и коэффициента теплового излучения ϵ (степень черноты), а также отношением α_S/ϵ [1].

Терморегулирующие покрытия являются частью системы обеспечения теплового режима космического аппарата, предназначенной для регулирования теплообмена бортового оборудования и аппаратуры между собой и(или) с окружающей средой без затрат энергии бортовых источников, уменьшения нерегулируемого внешнего лучистого теплообмена и обеспечения работоспособности радиаторов в условиях эксплуатации [2].

В ВИАМ проведены работы по разработке терморегулирующих покрытий трех классов: истинные отражатели, истинные поглотители и солнечные отражатели, которые успешно применены практически на всех космических летательных аппаратах, выпущавшихся с 1965 г. [3].

По этой классификации к *истинным отражателям* относятся покрытия с $\alpha_S \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow 0$ при отношении $\alpha_S/\varepsilon \approx 1$. Примерами таких покрытий могут служить алюминиевая эмаль ВЭ-30 ($\alpha_S \leq 0,2$; $\varepsilon \leq 0,2$), серебристая эмаль ВЭ-50 ($\alpha_S \leq 0,16$; $\varepsilon \leq 0,16$), эмали марок ВЭ-72, ВЭ-73 и ВЭ-77 [4].

У *истинных поглотителей* отношение α_S/ε также равно ~ 1 , но при этом $\alpha_S \rightarrow 1$ и $\varepsilon \rightarrow 1$. Такими оптическими свойствами обладают эмали марок АК-512 (черная), КО-818, КО-819 ($\alpha_S \geq 0,85$; $\varepsilon \geq 0,85$) и КО-819А ($\alpha_S \geq 0,85$; $\varepsilon \geq 0,88$).

Однако наибольшее применение в промышленности нашли покрытия класса *солнечные отражатели* с $\alpha_S \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow 1$ при соотношении $\alpha_S/\varepsilon < 0,2$. К покрытиям этого класса относятся эмали белого цвета марок АК-512, АК-573 ($\alpha_S \leq 0,22$; $\varepsilon \geq 0,85$), КО-5191, КО-5191А ($\alpha_S \leq 0,2$; $\varepsilon \geq 0,88$) и КО-5258 ($\alpha_S \leq 0,3$; $\varepsilon \geq 0,88$) [4, 5]. При разработке покрытий класса *солнечные отражатели* использовали стенд, имитирующий условия космоса [6].

Покрытия всех трех классов нашли применение на МКС «Буран» [7, 8]. Покрытия класса *солнечные поглотители* в ВИАМ не разрабатывали, но были получены опытные образцы двухслойного покрытия четвертого класса – солнечные поглотители ($\alpha_S \rightarrow 1$ и $\varepsilon \rightarrow 0$).

Стабильность свойств терморегулирующих покрытий и обеспечение работоспособности космической техники в условиях космоса являются крайне важными параметрами [9, 10]. В процессе эксплуатации, а также в ряде экспериментов [11, 12] выявлено, что летучие вещества, выделяющиеся в космосе из терморегулирующих покрытий, конденсируются на поверхности линз оптических приборов, нарушая их работу. В результате определены дополнительные требования к терморегулирующим покрытиям, а именно: потеря массы покрытия при нагревании не должна составлять $>1\%$ и количество выделяемых летучих конденсирующихся веществ не должно составлять $>0,1\%$, согласно разработанному для этой оценки стандарту [13].

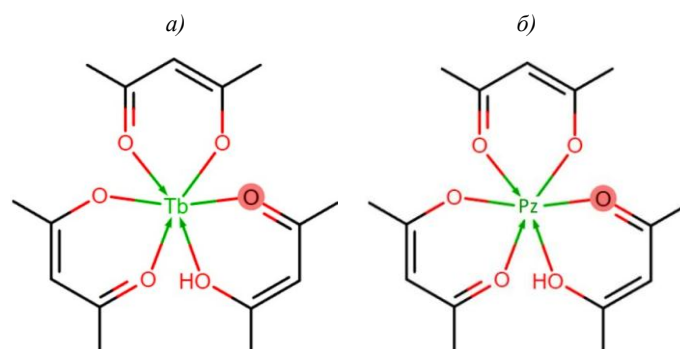
Наиболее термостойкой терморегулирующей эмалью является эмаль КО-5191 (ТУ 6-10-11-ВИАМ-94–87) естественной сушки, которая не удовлетворяет вышеуказанным требованиям по потере массы и количеству летучих конденсирующихся веществ. Цель данного исследования – определение возможности получения эмали класса *солнечный отражатель*, удовлетворяющей требованиям по потере массы при нагревании и количеству летучих конденсирующихся веществ.

При разработке авиационных материалов и поиске способов достижения высоких эксплуатационных свойств могут использоваться различные методы, в том числе применение редкоземельных элементов [14–18]. С целью снижения газовыделения, повышения термостойкости и улучшения оптических и технологических характеристик терморегулирующих покрытий на основе полиметилгидридсилоксанов исследовали влияние модифицирующих добавок – хелатных соединений редкоземельных элементов (триацетилацетонаты тербия и празеодима) и акрилового сополимера, влияние структуры оксида цинка и способов его обработки, а также замену этоксигрупп на бутокси-группы в полиметилгидридсилоксановом пленкообразователе.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны полиметилгидридсилоксаны с этоксигруппами (ПМГС-Э) промышленного изготовления и бутоксигруппами (ПМГС-Б2, ПМГС-Б3, ПМГС-Б4 и ПМГС-Б5), синтезированные в АО «ГНИИХТЭОС». Температура отверждения ПМГС-Э составляет 150 °С, полимеров с бутоксигруппами 100 °С.

Использование акриловых сополимеров для модификации полиорганосилоксанов – давно известный способ повышения их физико-механических и технологических свойств, поэтому в данной работе для получения покрытия холодного отверждения на основе полиметилгидридсилоксанов с бутоксигруппами использован сополимер бутилметакрилата и амида метакриловой кислоты (ПМГС-Б2/АС). С целью определения возможности влияния на степень полимеризации кремнийорганических лаков ПМГС в качестве модифицирующих добавок использовали триацетилацетонаты тербия и празеодима в виде 10%-ных растворов в диметилформамиде. Триацетилацетонаты тербия и празеодима являются координационными соединениями, а именно – внутренними комплексными солями, в которых центральный атом (акцептор) тербия или празеодима соединен с ацетилацетонатными кольцами (лигандами) донорно-акцепторными связями (см. рисунок). Степень отверждения полимеров определяли по содержанию гелевой фракции в ацетоне с использованием аппарата Сокслета.



Структурные формулы триацетилацетонатов трехвалентных тербия (а) и празеодима (б) [19]

Испытание на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии проводили по ГОСТ Р 50109–2023.

Определение влияния теплового воздействия на изменение массы полиметилгидридсилоксанов осуществляли в термостате в течение 20 ч при температурах 100, 150 и 200 °С.

Для определения коэффициента поглощения солнечного излучения α_s в диапазоне 300–2400 нм использовали интегральный фотометр ФМ-59«И». Измерения проводили относительным методом с использованием эталонных образцов сравнения. При выполнении измерений градуировку приборов проводили по сигналу, соответствующему отражению от эталонного образца сравнения.

Для определения влияния структуры оксида цинка, а также способов его обработки на коэффициент поглощения солнечного излучения α_s использовали оксид цинка, примененный в рецептуре эмали КО-5189; нитевидные кристаллы оксида цинка и химически чистый оксид цинка, обработанный в среде кислорода или фтора.

Стойкость к ультрафиолетовому излучению определяли согласно ИСО 17851:2016 «Системы космические. Моделирование космической среды для испытания материалов. Общие принципы и критерии».

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для оценки возможности разработки терморегулирующих покрытий, удовлетворяющих требованиям по потере массы и количеству летучих конденсирующихся веществ, проведены испытания пленкообразующих на основе полиметилгидридсилоксанов с этокси- и бутоксигруппами в виде свободных пленок покрытий (табл. 1).

Таблица 1

Потеря массы и содержание летучих конденсирующихся веществ (ЛКВ) пленок полиметилгидридсилоксанов с этокси- и бутоксигруппами

Пленка	Режим сушки		Потеря массы Δm , %	Содержание ЛКВ, %
	температура, °C	продолжительность, ч		
ПМГС-Э	150	2	2,8	1,7
ПМГС-Б2	100	1	0,2–0,7	0,05
ПМГС-Б3			0,07–0,2	0,05
ПМГС-Б4			2,2	1,5
ПМГС-Б5			4,3	1,0
АС	20	24	1,4	0,14
ПМГС-Б2/АС			0,36	0,13

Из данных табл. 1 следует, что допустимым уровнем газовыделения (по ОСТ 92-9566–82: $\Delta m \leq 1\%$; содержание ЛКВ $\leq 0,1\%$) обладают полимеры ПМГС-Б2, ПМГС-Б3 и ПМГС-Б2/АС.

При исследовании влияния акрилового сополимера, триацетилацетонатов тербия и празеодима на степень отверждения и термостабильность пленок покрытия на основе полиметилгидридсилоксанов с этокси- и бутоксигруппами установлено, что полиметилгидридсилоксан ПМГС-Э при температуре 150 °C отверждается не более чем на 60 %, акриловый сополимер практически полностью вымывается ацетоном. Смесь полиметилгидридсилоксана ПМГС-Э с акриловым сополимером (ПМГС-Э/АС) не отверждается при температуре 20 °C, содержание гель-фракции при этом составляет всего 2,2 %, однако выдержка данной смеси при 150 °C несколько увеличивает содержание гель-фракции. Введение в смесь ПМГС-Э/АС триацетилацетонатов тербия (ТaaТb) и празеодима (ТaaPr) увеличивает содержание гель-фракции до 20–36 %. Наиболее высокое значение содержания гель-фракции получено для полиметилгидридсилоксана с бутоксигруппами ПМГС-Б2 (88,5 %), а также для его смеси со смолой АС при условии его отверждения при температуре 100 °C (58,4 %). Результаты определения содержания гель-фракций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание гель-фракций в покрытиях

Пленка	Режим сушки		Содержание гель-фракции, %
	температура, °C	продолжительность, ч	
ПМГС-Э	150	2	57,5
Сополимер бутилметакрилата и амида метакриловой кислоты АС	20	24	0
ПМГС-Э/АС	150	2	13,5
	20	168	2,2
ПМГС-Э/АС + ТaaPr	20	168	36,1
ПМГС-Э/АС + ТaaТb			20,6
ПМГС-Б2	100	1	88,5
ПМГС-Б2/АС			58,4

Для выявления наиболее термостабильного пленкообразующего из ряда исследуемых полиметилгидридсилоксанов проведены дополнительные испытания по определению влияния теплового воздействия на изменение массы лаковых композиций в виде свободных пленок при температурах 100, 150 и 200 °С, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние теплового воздействия на изменение массы пленок полиметилгидридсилоксанов с этокси- и бутоксигруппами после воздействия различных температур в течение 20 ч

Пленка	Режим сушки		Потеря массы пленки, %, после воздействия температуры, °С		
	температура, °С	продолжительность, ч	100	150	200
ПМГС-Э	150	2	0,8	1	6,8
Сополимер бутилметакрилата и амида метакриловой кислоты АС	20	24	1,6	21	34
АС/ТааТб			1,6	6,4	28,8
АС/ТааPr			1,6	6,8	14
ПМГС-Э/АС			6,5	15	35
ПМГС-Э/АС + ТааТб			6,6	10	22
ПМГС-Э/АС + ТааPr			6,7	12,5	15
ПМГС-Б2 + катализатор П-1			0,5	2	2
ПМГС-Б2/АС			0,5	5	15
ПМГС-Б2	100	1	1,6	2	1,8
ПМГС-Б2/АС			4	5	13

«Холодную» сушку (при температуре 20 °С) осуществляли в течение 24 ч в связи с тем, что за этот период времени достигается максимальное удаление летучих органических соединений. Самую низкую потерю массы имеет полиметилгидридсилоксан с бутоксигруппами ПМГС-Б2 (2 % через 20 ч выдержки при 200 °С) с катализатором П-1. При этих же условиях испытаний потеря массы полиметилгидридсилоксана с этокси-группами ПМГС-Э составляет 6,8 %. Из данных табл. 3 следует, что потеря массы сополимера бутилметакрилата и амида метакриловой кислоты составляет 21 % уже при 150 °С, однако введение в нее соединений редкоземельных элементов резко снижает потерю массы при температурах 150 и 200 °С. Установлено также, что смесовая композиция ПМГС-Б2/АС холодного отверждения имеет более низкие значения потери массы, чем смесь ПМГС-Э/АС холодного отверждения.

Для оценки влияния различных модификаций полиметилгидридсилоксанов, наполненных оксидом цинка различной структуры, и способов обработки на стабильность основного показателя – коэффициента поглощения α_s изготовлены опытные композиции терморегулирующих эмалей, у которых после нанесения на подложки из алюминиевого сплава определены значения α_s до и после воздействия ультрафиолетового облучения (табл. 4).

Из данных табл. 4 следует, что значение коэффициента поглощения α_s покрытия на основе полиметилгидридсилоксана с бутоксигруппами, модифицированного акриловым сополимером, на 20 % выше по сравнению с покрытием на основе полиметилгидридсилоксана с этоксигруппами, модифицированного акриловым сополимером. Обработка оксида цинка не повлияла на коэффициент поглощения. Наилучшие результаты

по исходному значению коэффициента поглощения и его сохраняемости после воздействия ультрафиолетового излучения показывают покрытия на основе пленкообразующих, наполненных нитевидными кристаллами оксида цинка – композиции 3 и 4.

Таблица 4

Влияние ультрафиолетового облучения на изменение коэффициента поглощения солнечного излучения α_s опытных терморегулирующих покрытий естественной сушки класса «солнечный отражатель»

Условный номер композиции	Пленкообразующее	Оксид цинка (морфология)	Коэффициент поглощения α_s	
			исходный	после облучения в течение 1200 ч
1	ПМГС-Э/АС	Обработка кислородом	0,20	0,26
2		Обработка фтором	0,20	0,28
3		Нитевидные кристаллы	0,16	0,24
4	ПМГС-Б2/АС	Нитевидные кристаллы	0,16	0,22
5*		Обработка кислородом	0,16	0,25
6			0,16	0,19

* В рецептуре использованы нитевидные кристаллы оксида цинка.

Результаты определения потери массы и количества летучих конденсирующихся веществ у некоторых покрытий из табл. 4 представлены в табл. 5. Для получения сравнительных данных испытывали покрытие на основе эмали КО-5191, так как основной задачей было добиться снижения потери массы и количества летучих конденсирующихся веществ именно у этой эмали. Композиции на основе пленкообразующего ПМГС-Б2/АС выбраны для того, чтобы показать, что именно на его основе могут получиться покрытия без применения редкоземельных элементов с требуемыми показателями потери массы, количества летучих конденсирующихся веществ и коэффициента поглощения после облучения.

Таблица 5

Влияние температуры сушки и триацетилацетонатов тербия и празеодима на потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ (ЛКВ) покрытий

Композиция	Режим сушки		Потеря массы, %	Содержание ЛКВ, %
	температура, °С	продолжительность, ч		
Эмаль КО-5191	150	2	1,3	0,43
	150 (2 ч) + 48 ч вакуумно-тепловой обработки		0,24	0,15
1	20	24	2,0	0,56
1 + 5 % ТааТб			1,7–2,03	0,37–0,50
1 + 5 % ТааPr			1,95–2,19	0,44–0,65
3			2,51	0,72
4			0,76	0,05
6	100	2	0,22–0,3	0,05
	20	24	0,18–0,55	0,01–0,04
	20	24	1,12	0,04

Исследовали влияние комплексных солей тербия и празеодима с донорно-акцепторными связями на степень отверждения и потерю массы при нагревании в течение 20 ч свободных пленок полиметилгидридсилоксанов с этокси группами (табл. 6), а также потерю массы и количество летучих конденсирующихся веществ наполненных терморегулирующих покрытий (табл. 7).

Таблица 6

Содержание гель-фракций и потеря массы пленок полиметилгидридсилоксана с этоксигруппами, модифицированного акриловым сополимером АС естественной сушки

Состав	Содержание гель-фракции, %	Потеря массы после нагревания при температуре 200 °С, %
ПМГС-Э/АС	2,2	33,5
ПМГС-Э/АС с тербием	20,6	22,5
ПМГС-Э/АС с празеодимом	36,1	15

Таблица 7

Потеря массы и количество летучих конденсирующихся веществ (ЛКВ) терморегулирующих покрытий на основе полиметилгидридсилоксана с этоксигруппами, модифицированного акриловым сополимером АС естественной сушки

Состав, наполненный оксидом цинка	Потеря массы, %	Содержание ЛКВ, %
ПМГС-Э/АС	2	0,56
ПМГС-Э/АС с тербием	1,86	0,43
ПМГС-Э/АС с празеодимом	2,07	0,55

Как показывают результаты испытаний, представленные в табл. 6 и 7, введение комплексных солей тербия и празеодима повышает степень отверждения и термостабильность пленок покрытий на основе полиметилгидридсилоксана с этоксигруппами, но оказывается неэффективным в рецептурах терморегулирующих покрытий, наполненных оксидом цинка, для снижения потери массы и количества летучих конденсирующихся веществ.

Следует отметить, что значительно более высокий уровень термостабильности имеет пленка покрытия с катализатором П-1 (табл. 3), у которой потеря массы после нагревания при температуре 200 °С в течение 20 ч составила 2 %, в то время как у пленок с солями тербия и празеодима – соответственно 22 и 15 %.

Значительно большее влияние на свойства терморегулирующих покрытий, чем введение в состав покрытий комплексных солей тербия и празеодима, оказывает замена этоксигрупп в полиметилгидридсилоксане на бутоксигруппы (табл. 8).

Таблица 8

Зависимость свойств терморегулирующего покрытия естественной сушки с акриловым сополимером АС от химического состава полиметилгидридсилоксана и дисперсного наполнителя (оксида цинка, обработанного кислородом)

Состав полиметилгидридсилоксана	Коэффициент поглощения солнечного излучения α_s		Потеря массы, %	Содержание ЛКВ, %
	исходное значение	после УФ-облучения в течение 1200 ч		
С этоксигруппами				
композиция 1	0,2	0,258	2	0,56
композиция 2 (I + 5 % ТааТb)	0,19	0,213	1,86 (1,7)	0,53 (0,37)
композиция 3 (I + 5 % ТааPr)	0,21	0,238	2,07	0,55
С бутоксигруппами				
композиция 4	0,16	0,186	1,12	0,04

Примечание. В скобках – минимальные значения.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 и 8, свидетельствует о том, что продолжительность сушки терморегулирующего покрытия должна быть существенно увеличена по сравнению с продолжительностью сушки непигментированной пленки покрытия (табл. 1), так как растворитель пленкообразователя сорбирован еще и оксидом цинка. Поскольку растворитель пленкообразователя не относится к категории

летучих конденсирующихся веществ, значительное снижение количества конденсирующихся веществ (табл. 8) объясняется большим наполнением терморегулирующего покрытия оксидом цинка.

С большой степенью вероятности можно предположить, что замена акрилового сополимера АС на катализатор на основе платинохлористоводородной кислоты ($\text{H}_2[\text{PtCl}_6] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) обеспечит естественную сушку, так как зафиксировано рекордно высокое повышение термостабильности у пленок полиметилгидридсилоксанов при использовании катализатора П-1 (табл. 3):

- в 2,5 раза при температуре 150 °С;
- в 7,5 раза при температуре 200 °С.

Очевидно, что катализатор П-1 обеспечивает не только высокую степень отверждения полиметилгидридсилоксанового пленкообразователя с этокси- и бутокси группами, но и является антикатализатором (ингибитором) процесса термоокислительной деструкции.

Вследствие значительно более низких значений коэффициента поглощения α_s (табл. 8) терморегулирующих покрытий, в которых в качестве пленкообразователя используется полиметилгидридсилоксан с бутокси группами, требуются дополнительные исследования оптических свойств таких пленок с этокси- и бутокси группами в диапазоне 0,25–2,5 мкм, что соответствует основным направлениям перспективных исследований до 2030 г. [20].

Заключения

Для повышения уровня свойств терморегулирующих лакокрасочных покрытий с целью обеспечения работы космических аппаратов в жестких условиях космоса исследована возможность модификации кремнийорганического пленкообразующего соединениями различных типов.

Введение хелатных соединений тербия и празеодима в состав непигментированного покрытия на основе полиметилгидридсилоксана с этоксигруппами, используемого в качестве пленкообразователя терморегулирующего покрытия, позволило повысить степень его отверждения и термостабильность, а также снизить количество выделяемых летучих конденсирующихся веществ.

Замена этоксигрупп на бутоксигруппы в полиметилгидридсилоксановом пленкообразователе дает возможность существенно повысить уровень свойств терморегулирующих покрытий, а именно – уменьшить коэффициент поглощения солнечного излучения, потерю массы и содержание летучих конденсирующихся веществ.

Таким образом, по результатам проведенного исследования по определению возможности регулирования свойств терморегулирующих лакокрасочных покрытий класса *солнечный отражатель* до требований, предъявляемых к космической технике, установлено, что такое покрытие может быть разработано на основе полиметилгидридсилоксана с бутоксигруппами и платинохлористоводородного катализатора.

Список источников

1. Гуревич М.М., Ицко Э.Ф., Середенко М.М. Оптические свойства лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1984. 120 с.
2. ГОСТ Р 59323–2021. Системы космические. Покрытия терморегулирующие для космических аппаратов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2021. 28 с.
3. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
4. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные материалы и покрытия на их основе в машиностроении. М.: Пэйнт-Медиа, 2021. С. 199–215.
5. Кондрашов Э.К., Веренинова Н.П. Терморегулирующие лакокрасочные покрытия класса «Солнечные отражатели» // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 2. С. 24.

6. Охотин А.С. Космическое материаловедение и технология. М.: Наука, 1977. С. 120–122.
7. Кондрашов Э.К. Терморегулирующие неорганические и полимерные покрытия МКС «Буран» // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 8. С. 33–38.
8. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
9. Патраев В.Е., Максимов Ю.В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Приборостроение. 2008. № 8. С. 5–12.
10. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
11. Чиров А.А., Белякова Н.Г. Изменение прозрачности тонких пленок цезия на поверхности стекла оптических приборов космического аппарата // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 12. С. 98–103.
12. Попов Ю.А. Кинетика газовой выделенной летучих конденсирующихся веществ из органических материалов при длительном термовакуумном воздействии // Сб. тр. 8-й Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. М., 1985. 196 с.
13. ОСТ 92-9566–82. Материалы неметаллические наружных поверхностей изделий. Метод испытания на потерю массы и общее содержание в ней летучих конденсирующихся веществ при вакуумно-тепловом воздействии. М.: Стандартиформ, 1982. 10 с.
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ. 2013. № 2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.02.2025).
15. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ и $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
16. Бенариев И., Антипов В.В., Хасиков Д.В., Оглодков М.С., Савичев И.Д., Кузнецова П.Е. Исследование структуры и свойств экономнолегированного алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc–Zr, изготовленного методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
17. Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бакрадзе М.М., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Инженерия редкоземельных микромагнитов RE–TM–B (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
18. Будиновский С.А., Доронин О.Н., Косьмин А.А., Бенклян А.С. Влияние состояния мишени системы Zr–Y–PЗМ на скорость ее распыления при нанесении керамического слоя ТЗП с помощью установки УОКС-3 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
19. Хелатообразующие ионообменные смолы. Химическая энциклопедия: в 5 т. М.: Большая Российская Энциклопедия, 1998. Т. 5. Ст. 440.
20. 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.

References

1. Gurevich M.M., Itsko E.F., Seredenko M.M. *Optical Properties of Paint and Varnish Coatings*. Leningrad: Khimiya, 1984, 120 p.
2. State Standard R 59323–2021. *Space Systems. Thermal Control Coatings for Spacecraft. General Requirements*. Moscow: Standartinform, 2021, 28 p.
3. Kablov E.N. *Materials for Aerospace Technology. Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
4. Kondrashov E.K. *Paints and Varnishes and Coatings Based on Them in Mechanical Engineering*. Moscow: Paint-Media, 2021, pp. 199–215.

5. Kondrashov E.K., Vereninova N.P. Solar Reflector Thermal-Regulating Paints and Varnishes. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 2, p. 24.
6. Okhotin A.S. *Space Materials Science and Technology*. Moscow: Nauka, 1977, pp. 120–122.
7. Kondrashov E.K. Thermoregulating Inorganic and Polymer Coatings for the Buran ISS. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 8. pp. 33–38.
8. *Armor for Buran. VIAM Materials and Technologies for the Energia-Buran ISS*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka i Zhizn, 2013, 128 p.
9. Patraev V.E., Maksimov Yu.V. Methods for Ensuring the Reliability of Onboard Equipment of Long-Duration Spacecraft. *Priborostroenie*, 2008, no. 8, pp. 5–12.
10. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace technology of the 21st century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
11. Chirov A.A., Belyakova N.G. Changes in the transparency of thin cesium films on the glass surface of spacecraft optical instruments. *Poverkhnost. Rentgenovskie sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2013, no. 12, pp. 98–103.
12. Popov Yu.A. Kinetics of outgassing of volatile condensable substances from organic materials under long-term thermal vacuum exposure. *Proc. 8th All-Union Conf. on Rarefied Gas Dynamics*. Moscow, 1985, 196 p.
13. Industry standard 92-9566–82. *Non-metallic materials for external surfaces of products. Test method for mass loss and total content of volatile condensable substances therein under vacuum-thermal exposure*. Moscow: Standartinform, 1982, 10 p.
14. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2025).
15. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ and $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
16. Benarieb I., Antipov V.V., Khasikov D.V., Oglodkov M.S., Savichev I.D., Kuznetsova P.E. Study of structure and properties of sparsely alloyed aluminum alloy of Al–Mg–Sc–Zr system, produced by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
17. Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Bakradze M.M., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Rare-earth RE–TM–B micromagnets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
18. Budinovskiy S.A., Doronin O.N., Kosmin A.A., Benklyan A.S. Influence of the state of the YSZ target on its sputtering rate during deposition of a TBC ceramic layer by the UOKS-3 unit. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
19. *Chelating ion-exchange resins. Chemical encyclopedia: in 5 vols*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 1998, vol. 5, art. 440.
20. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Кондрашов Эдуард Константинович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Eduard K. Kondrashov, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.04.2025.
The article was submitted 08.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 15.04.2025.