

УДК 629.7.023.222

Ю.И. Меркулова¹, А.С. Сердцелюбова¹, В.Г. Железняк¹**СИСТЕМА ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ЭМАЛИ ХОЛОДНОЙ СУШКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ НОСОВЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-59-66

В настоящее время в авиационной промышленности растет потребность в разработке функциональных лакокрасочных материалов, в том числе для получения покрытий, предназначенных для защиты конструкций и изделий авиационной техники от абразивных воздействий и эрозионного износа. Особенно актуальны такие покрытия для изделий из полимерных композиционных материалов. Данное исследование посвящено разработке новой полиуретановой эмали для защиты антенных обтекателей самолетов. Приведены сравнительные характеристики фторопластовой и полиуретановой эмалей иностранного производства, а также эмалей на основе хлорсульфированного полиэтилена и фторированного каучука, предназначенных для защиты от ударно-абразивного износа.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, функциональные покрытия, эрозионная стойкость, полимерные материалы, система покрытий, полиуретановая эмаль.

Yu.I. Merkulova¹, A.S. Serdcelyubova¹, V.G. Zheleznyak¹**LACQUER COATING SYSTEM BASED ON COLD DRY POLYURETHANE ENAMEL FOR PROTECTING NOSE SPINNERS OF PLANES**

Recently in the aviation industry there has been an increasing demand for the development of functional paints and varnishes, in particular, for the production of coatings intended to protect aviation equipment from abrasion and erosion damaged. Coatings of this type are especially relevant for polymer products. This work is devoted to the development of a new polyurethane enamel for the protection of antenna radomes. The comparative data of fluoroplastic, polyurethane imported enamel, enamels based on chlorosulfonated polyethylene and fluorinated rubber, intended for protection of abrasive damage.

Keywords: paint materials, functional coatings, erosion resistant, polymer materials, coating system, polyurethane enamel.

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

Введение

Одним из наиболее востребованных материальных ресурсов современного промышленного производства являются композиционные материалы. Особенно широко и эффективно они используются в высокотехнологичных отраслях [1]. В настоящее время на международном и российском рынках наибольшее распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ).

Широкое использование ПКМ (стекло-, угле-, органопластиков и гибридных материалов) взамен традиционно применяемых металлических сплавов в авиационной промышленности позволяет существенно снизить массу конструкции [2, 3].

Поверхность деталей из ПКМ подвергается сложному воздействию многих факторов: широкий диапазон температурных перепадов в атмосфере, интенсивная солнечная радиация, действие УФ-излучения, эрозионный износ, контакт с горюче-смазочными веществами и другими агрессивными жидкостями [4–6]. По этой причине защита конструкций авиационной техники из ПКМ от воздействия окружающей среды является одной из основных задач при разработке лакокрасочных материалов (ЛКМ) разного назначения.

Для изготовления носовых обтекателей самолетов применяют стеклопластики на основе различных термореактивных связующих. При атмосферном и механических воздействиях, а также под воздействием солнечной радиации происходят увлажнение и старение стеклопластиков, приводящие к снижению их физико-механических и радиотехнических характеристик. Для защиты от внешних воздействующих факторов изделия из ПКМ окрашивают ЛКМ функционального назначения [7]. Кроме того, с помощью лакокрасочных покрытий достигают необходимого выравнивания поверхности, а также получают требуемые внешний вид и цвет изделий из ПКМ.

Основным требованием, предъявляемым к лакокрасочным покрытиям для защиты обтекателей, является повышенная эрозионная стойкость. Данный параметр характеризуется способностью выдерживать газоабразивное и газочастицное воздействие без существенного ухудшения физико-механических и защитных свойств [8]. Применительно к изделиям авиационной техники эрозионный износ имеет место при воздействии высокоскоростных однофазного или двухфазного потоков на внешние поверхности обтекателей антенн, лопастей винтов, лопаток компрессора и лобовые поверхности крыльев и оперения [9].

Сложный процесс эрозионного износа требует решения разноплановых проблем: обеспечения длительной работы при высоких температурных значениях, устойчивости к абразивным воздействиям и высокой атмосферостойкости покрытий. По этой причине создание системы покрытий с высокой эрозионной стойкостью является актуальной задачей. При этом в настоящее время возрастают требования к разнообразию цветовой палитры ЛКМ, используемой при окраске изделий авиационной техники. Из всех наборов наибольшее распространение в Российской Федерации получили регистр цветов RAL, Pantone и атлас цветов NCS, представляющие собой палитру с заданными координатами цвета [10].

Эрозионная стойкость ЛКМ определяется свойствами полимерного пленкообразователя, адгезией и толщиной покрытия на его основе, а также входящими в состав покрытия дисперсными наполнителями.

Известно, что для создания покрытий с высокой эрозионной устойчивостью используют материалы на основе следующих соединений:

- эпоксидные олигомеры;
- полиуретаны;
- фторкаучук;
- кремнийорганические соединения;
- фторопласты;
- хлорсульфированный полиэтилен.

Свойства эрозионностойких эпоксидных, фторкаучуковых, кремнийорганических и других ЛКМ представлены в работах [11, 12].

В данной статье более подробно рассмотрены полиуретановые покрытия. Следует отметить, что покрытия данного типа характеризуются высокой стойкостью к эрозионному износу. Кроме того, к их преимуществам относят высокие устойчивость к статическому воздействию агрессивных жидкостей (топливо, нефтепродукты, смазочные материалы) и стойкость к атмосферным воздействиям, а также сочетание превосходной твердости с эластичностью и ударной стойкостью [13]. В аспекте химического

строения отмечают следующее: структуру и свойства полиуретанов можно менять в широких пределах путем подбора исходных соединений. Применение полимеров данного типа позволяет направленно регулировать количество продольных и поперечных связей, а также гибкость макромолекул, варьируя характер межмолекулярных связей [14]. Специфические свойства полиуретанов обусловлены их полиблочным строением, а также большим количеством полярных реакционноспособных групп, участвующих в образовании высокопрочной пространственно-сшитой структуры [15, 16]. Следует отметить также, что несомненным преимуществом полиуретановых покрытий является их «естественная» сушка, что в свою очередь позволяет проводить окрасочные работы в полевых условиях без использования нагревательного оборудования. Для обеспечения необходимой адгезии полиуретанового покрытия к подложке, а также выравнивания дефектов на ПКМ применяют грунтовочные и шпатлевочные материалы, которые влияют на конечные эксплуатационные свойства лакокрасочного покрытия.

Во ФГУП «ВИАМ» проведена работа по получению эрозионностойкой полиуретановой эмали холодной сушки пяти цветов по каталогу RAL, а также системы покрытий с ее применением для защиты антенных обтекателей самолетов. Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [17].

Материалы и методы

В качестве исходных компонентов при разработке эмали использовали гидроксилсодержащий полиэфир, изоцианатный отвердитель, катализатор уретанообразования, минеральные наполнители, а также пигменты органической и неорганической природы.

В качестве подложки использовали ПКМ марки КМКС-4.175.Т10 и алюминиевый сплав марки Д16-АТ.

Эрозионную стойкость систем покрытий определяли на установке «Тайфун» центробежного типа при скорости вращения ротора до 2000 об/мин. Критерием оценки эрозионной стойкости является количество абразива, необходимого для разрушения лакокрасочного покрытия до подложки. Количество абразива измеряли в циклах (1 цикл соответствует воздействию 0,8 кг абразива Вольского месторождения с дисперсностью частиц 0,5–0,8 мм). Испытания проводили при температуре 20 ± 2 °С.

Стойкость систем покрытий к воздействию УФ-излучения определяли в аппарате искусственной погоды Atlas UV-2000 в соответствии с СТО 1-595-15-379–2006. Один цикл испытаний включает: 4 ч облучения лампами UVB-313 при температуре 65 ± 2 °С и 4 ч конденсации влаги при температуре 50 ± 2 °С.

Адгезионную прочность покрытий определяли методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 15140–78.

Определение диэлектрических свойств (тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц; диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц) проводили в соответствии с ГОСТ 22372–77.

Эластичность покрытий при изгибе определяли с помощью шкалы гибкости ШГ-1 в соответствии с ГОСТ 31974–2012.

Оценку декоративных свойств и внешнего вида проводили в соответствии с ГОСТ 9.407–2015.

Твердость покрытий определяли с помощью маятникового прибора типа ТМЛ-2124 (маятник А) в соответствии с ГОСТ 5233–89, а прочность при ударе – с помощью прибора типа У-1 по ГОСТ 4765–73.

Результаты и обсуждение

Полученная полиуретановая эрозионностойкая эмаль представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из полуфабриката эмали, изоцианатного отвердителя и катализатора уретанообразования, смешиваемых перед применением.

Технологические свойства полиуретановой эмали и физико-механические свойства лакокрасочного покрытия на ее основе:

Свойства	Значения свойств
Массовая доля нелетучих веществ в полуфабрикате эмали, % (по массе)	40–68
Степень перетира, мкм (не более)	30
Условная вязкость полуфабриката эмали, с, по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре $20,0 \pm 0,5$ °С	20–120
Время высыхания до степени 3, ч (не более), при температуре 20 ± 2 °С	16
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	1
Адгезия к ПКМ и сплаву Д16-АТ, балл	1

Технологические свойства полученной полиуретановой эмали, а также физико-механические свойства покрытия на ее основе соответствуют требованиям, предъявляемым к эмалям для внешней окраски изделий авиационной техники.

Как отмечено ранее, использование полиуретановых эмалей в качестве покрывного слоя требует применения в системе лакокрасочных покрытий грунтовок и/или шпатлевок для выравнивания дефектов ПКМ и обеспечения требуемой адгезии к подложке. Для таких целей использовали эпоксидную грунт-шпатлевку. Следует отметить, что применение грунт-шпатлевок сокращает технологический цикл окраски изделий из ПКМ благодаря отсутствию пооперационного нанесения слоев шпатлевки для выравнивания дефектов и грунтовки для улучшения адгезии покрывного слоя эмали. При этом в случае наличия на поверхности ПКМ глубоких рытвин возможно применение грунт-шпатлевки с исходной вязкостью, в этом случае материал наносится шпателем.

Технологические свойства эпоксидной грунт-шпатлевки и физико-механические свойства лакокрасочного покрытия на ее основе:

Свойства	Значения свойств
Массовая доля нелетучих веществ в полуфабрикате грунт-шпатлевки, % (по массе)	60 ± 3
Время высыхания до степени 3, ч (не более), при температуре 20 ± 2 °С	3
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	1
Твердость покрытия, отн. ед. (не менее)	0,27
Адгезия к ПКМ, балл	1

Нанесение грунт-шпатлевки и полиуретановой эмали на подложку ПКМ марки КМКС-4.175.Т10 проводили с помощью краскораспылителя при рабочей вязкости грунт-шпатлевки 18–25 с и полиуретановой эмали 14–16 с по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм.

Свойства полученной системы лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали:

Свойства	Значения свойств
Твердость покрытия, отн. ед.	0,29
Прочность при ударе, Дж	5
Эрозионная стойкость, циклы	30
Адгезия к ПКМ, балл	1

Как видно из представленных данных, система покрытий на основе полиуретановой эмали в исходном состоянии обладает высокой эрозионной стойкостью, адгезией к ПКМ не более 1 балла и прочностью при ударе не менее 5 Дж.

Для изделий из ПКМ особенно важна их надежная защита от влаги и других факторов атмосферного воздействия. В связи с этим проведены исследования влияния УФ-излучения в аппарате искусственной погоды Atlas UV-2000 и атмосферного старения в условиях промышленной зоны умеренного климата (Московский центр климатических испытаний (МЦКИ), г. Москва), а также в зоне умеренно теплого климата (Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова (ГЦКИ), г. Геленджик) на декоративные свойства и адгезию покрытий (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Декоративные свойства систем лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали различных цветов после испытаний в аппарате Atlas UV-2000 в течение 500 ч

Свойства	Значения свойств для эмали различных цветов по каталогу RAL				
	9003	9016	7040	7042	5002
Исходный блеск покрытий, %, при угле замера 60 градусов	7,7	16,6	6,5	12,1	4,9
Блеск покрытий после выдержки, %, при угле замера 60 градусов	6,5	15,2	5,5	11,8	4,9
Цветовое различие ΔE после выдержки	1,3	1,3	1,3	2,2	2,1

Таблица 2

Устойчивость систем лакокрасочных покрытий в атмосферных условиях после 6 мес экспозиции

Свойства		Значения свойств для эмали различных цветов по каталогу RAL				
		9003	9016	7040	7042	5002
Исходный блеск покрытий, %, при угле замера 60 градусов		7,7	16,6	6,5	12,1	4,9
Блеск покрытий, %, при угле замера 60 градусов	МЦКИ	7,4	16,0	6,3	11,8	5,2
	ГЦКИ	7,1	15,9	6,0	11,2	5,0
Адгезия, балл	МЦКИ	1				
	ГЦКИ					
Внешний вид	МЦКИ	Без изменений				
	ГЦКИ					

Установлено, что снижение блеска систем покрытий после 500 ч испытаний в аппарате Atlas UV-2000 не превышает 10 %, после 6 мес экспозиции в МЦКИ – не более 5 %, в ГЦКИ – не более 8 %, при этом адгезия составляет не более 1 балла. Данные, представленные в табл. 1 и 2, позволяют сделать вывод о высокой атмосферостойкости систем покрытий на основе полиуретановой эмали различных цветов.

Устойчивость покрытий к воздействию различных температур характеризуют данные, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

**Цветовое различие (ΔE) систем лакокрасочных покрытий
на основе полиуретановой эмали после термического воздействия**

Условия термического воздействия	Значение ΔE для эмали различных цветов по каталогу RAL*				
	9003	9016	7040	7042	5002
После выдержки при температуре 100 °С в течение, ч:					
100	1,90	1,15	1,24	1,32	1,85
300	3,62	2,15	1,85	1,98	3,30
500	4,65	3,73	2,84	3,12	4,85
После выдержки при температуре 120 °С в течение, ч:					
30	2,43	1,13	1,16	1,44	2,17
50	3,8	2,26	1,61	2,09	3,82
100	4,9	3,95	2,55	2,98	5,01
После выдержки при температуре 150 °С в течение, ч:					
20	13,2	9,55	5,11	5,72	15,25
50	19,6	15,6	8,64	8,9	22,2

* Адгезия для всех систем лакокрасочных покрытий после выдержки при различных температурах – 1 балл.

Из данных, представленных в табл. 3, следует, что термостарение систем покрытий на основе полиуретановой эмали при температуре 100 °С в течение 500 ч не приводит к ухудшению адгезии, данный показатель сохраняется на исходном уровне (1 балл). При этом покрытия характеризуются умеренным изменением цвета (значения цветового различия всех систем покрытий после выдержки при температуре 100 °С в течение 500 ч, а также при температуре 120 °С в течение 100 ч не превышают 5). Однако после выдержки при температуре 150 °С в течение не менее 20 ч наблюдается интенсивное изменение цвета покрытий, что в свою очередь связано с деструкцией пленкообразующего в составе ЛКМ.

Известно, что в процессе эксплуатации радиопрозрачные антенные обтекатели летательных аппаратов подвергаются воздействию различных факторов, которые приводят к изменению электрических параметров материала [18]. Наиболее сильное влияние на изменение диэлектрических характеристик оказывают температура и влажность. В связи с этим исследованы диэлектрические свойства разработанных систем покрытий (табл. 4).

Таблица 4

**Диэлектрические характеристики систем лакокрасочных покрытий
на основе полиуретановой эмали**

Свойства	Значения свойств для эмали различных цветов по каталогу RAL				
	9003	9016	7040	7042	5002
Тангенс угла диэлектрических потерь в исходном состоянии	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07
Диэлектрическая проницаемость в исходном состоянии	5,50	6,06	5,18	4,99	4,81
Тангенс угла диэлектрических потерь после увлажнения	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Диэлектрическая проницаемость после увлажнения	5,77	6,08	5,64	5,46	5,08

Установлено, что воздействие влаги не приводит к существенному ухудшению диэлектрических свойств системы покрытий на основе полиуретановой эмали.

Оценить достигнутый уровень разработанной эрозионнстойкой эмали позволяют данные, представленные в табл. 5.

Таблица 5

**Эрозионная стойкость систем лакокрасочных покрытий
и технологические свойства эмалей, используемых для защиты обтекателей**

Свойства	Значения свойств эмали				
	поли- уретановой	импортного аналога	фторо- пластовой	на основе хлор- сульфированного полиэтилена	фтор- каучуковой
Эрозионная стой- кость (испытания на установке «Тайфун»), циклы	30	30	15–20	15–20	25–27
Рекомендуемая тол- щина покрытия, мкм	90–160	240–400	250–400	200–400	100–150
Температурный режим формирования покрытия, °С	От 12 до 35 (не менее 24 ч)	От 18 до 25 (не менее 24 ч)	120 (в течение 3 ч)	От 18 до 20 (в те- чение 24 ч) или от 70 до 80 (в те- чение 2–3 ч)	18–20 (в те- чение 72 ч) или 120 (в течение 2 ч)
Жизнеспособность, ч, при температуре 20±2 °С	8	1,5	8	6–8	24

Видно, что использование разработанной полиуретановой эмали для защиты обтекателей самолета позволяет получить покрытие сравнительно меньшей толщины и, таким образом, снизить привес от лакокрасочного покрытия. Несомненным преимуществом разработанной эмали является «холодный» режим отверждения и достаточно высокая, по сравнению с импортным аналогом, жизнеспособность, что позволяет оптимизировать процесс формирования системы покрытия.

Очевидно, что разработанная эмаль для защиты от эрозионных повреждений не уступает аналогичной эмали зарубежного производства, а также превосходит разработанные ранее эмали другой химической природы аналогичного назначения.

Заключения

Применение полиуретанового пленкообразующего позволило получить покрытие для защиты от эрозионных разрушений подложки из ПКМ.

Полученная система покрытий на основе полиуретановой эмали «холодной» сушки обладает высокой атмосферостойкостью и может применяться для защиты носовых обтекателей самолетов.

Библиографический список

1. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
2. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
3. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

4. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
5. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
6. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // *Перспективные материалы*. 2000. № 3. С. 27–36.
7. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2019. № 5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
8. Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н., Бейдер Э.Я. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1989. 136 с.
9. Кузнецова В.А., Владимирский В.Н., Кондрашов Э.К. Прогнозирование эрозионной стойкости лакокрасочных покрытий с учетом динамических параметров. Лакокрасочные материалы и покрытия // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2003. С. 50–53.
10. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 96–102.
11. Кондрашов Э.К., Найденов Н.Д. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия авиационного назначения. Часть 1. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия на основе эпоксидных и полиуретановых пленкообразователей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 2 (86). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90.
12. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные материалы и покрытия на их основе в машиностроении. М.: Пэйнт-Медиа, 2021. 256 с.
13. Павлов А.В., Меркулова Ю.И., Зеленская А.Д., Железняк В.Г. Износостойкость лакокрасочных покрытий (обзор литературы) // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2018. № 1–2. С. 40–43.
14. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник для вузов. Л.: Химия, 1989. 84 с.
15. Зубарев П.А. Защитные износостойкие покрытия на основе модифицированных полиуретанов: дис. ... канд. техн. наук. Пенза: ПГУАС, 2014. 156 с.
16. Зубарев П.А., Лахно А.В. Износостойкие полиуретановые покрытия // *Молодой ученый*. 2014. № 20. С. 143–146.
17. 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.
18. Семенова Л.В., Кондрашов Э.К. Модифицированный бромэпоксидный лак ВЛ-18 для защиты полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 1. С. 29–32.