

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-208-218

АТМОСФЕРОСТОЙКОЕ АКРИЛ-УРЕТАНОВОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИЛСОДЕРЖАЩЕГО АКРИЛОВОГО СОПОЛИМЕРА

Д.А. Измалков¹, Ю.К. Зверевич¹, М.С. Кожухаров¹, К.Р. Ахмадиева¹, А.И. Ткачук¹

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

Аннотация. Приведена общая информация о полиуретановых лакокрасочных материалах, областях их применения и свойствах. Представлены акрил-уретановые материалы, их преимущества и свойства некоторых промышленных марок. Синтезирован гидроксилсодержащий акриловый сополимер методом растворной радикальной сополимеризации, исследованы характеристики продукта синтеза. На основе раствора сополимера получены экспериментальные композиции. Изучены эксплуатационные характеристики полученных акрил-уретановых покрытий. Исследовано влияние добавки полиметилсилоксанового масла на свойства материала.

Ключевые слова: гидроксилсодержащий акриловый сополимер, акрил-уретановый лакокрасочный материал, атмосферостойкость, физико-механические характеристики, эксплуатационные свойства, радикальная сополимеризация

Для цитирования: Измалков Д.А., Зверевич Ю.К., Кожухаров М.С., Ахмадиева К.Р., Ткачук А.И. Атмосферостойкое акрил-уретановое покрытие на основе гидроксилсодержащего акрилового сополимера // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 208–218. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-208-218.

Scientific article

WEATHER-RESISTANT ACRYLIC-URETHANE COATING BASED ON HYDROXYL-CONTAINING ACRYLIC COPOLYMER

D.A. Izmailkov¹, Yu.K. Zverevich¹, M.S. Kozhukharov¹, K.R. Akhmadieva¹, A.I. Tkachuk¹

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

Abstract. The article provides general information about polyurethane paint-and-varnish materials, their areas of application and properties. Acrylic-urethane materials as well as their advantages and properties of certain industrial brands are presented. A hydroxyl-containing acrylic copolymer was synthesized by solution radical copolymerization, and the characteristics of the synthesis product were studied. Experimental compositions were obtained based on a copolymer solution. Acrylic-urethane coatings were obtained and their performance characteristics were studied. The effect of the addition of polymethylsiloxane oil on the properties of the material was investigated.

Keywords: hydroxyl-containing acrylic copolymer, acrylic-urethane paint-and-varnish material, weather-resistance, physical and mechanical characteristics, performance properties, radical copolymerization

For citation: Izmailkov D.A., Zverevich Yu.K., Kozhukharov M.S., Akhmadieva K.R., Tkachuk A.I. Weather-resistant acrylic-urethane coating based on hydroxyl-containing acrylic copolymer. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 208–218. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-208-218.

Введение

Полиуретановые лакокрасочные материалы (ЛКМ) широко распространены в промышленности. Они содержат гетероцепные полимеры, в структуре которых присутствуют уретановые группы. Помимо этого, в их полимерной основе могут содержаться простые эфирные, сложноэфирные и другие группировки, в том числе полифункциональные [1]. Благодаря такому разнообразию состава можно получать большой ассортимент ЛКМ, обеспечивающих соответствие покрытий на их основе широкому комплексу эксплуатационных требований [2].

На физико-механические свойства полиуретановых покрытий влияют природа и длина участков цепи между уретановыми звеньями, наличие сшивок между макромолекулами и их плотность, присутствие наполнителей и функциональных/технологических добавок [3]. Сшитые и разветвленные полиуретаны образуют гибкую и подвижную пространственную сетку, которая под действием внешних факторов может выдерживать существенные нагрузки. В зависимости от количества поперечных мостиков между макромолекулами можно получать материалы с различными свойствами – от жестких термопластов до мягких эластомеров. В работе [4] подробно описаны особенности синтеза полиуретанов, а также влияние компонентов на характеристики полимеров.

Благодаря физико-механическим свойствам и стойкости к внешним воздействиям полиуретановые ЛКМ применяют в различных областях деятельности человека [5], например для защиты полов на заводах в производственных помещениях, цехах, складах и др. [6]. Такими ЛКМ окрашивают промышленное оборудование, колеса погрузчиков и валы конвейеров [7]. В автомобилестроении в качестве финишных покрытий кузовов и корпусов используют полиуретановые эмали и лаки для повышения срока эксплуатации в условиях атмосферных воздействий [8, 9].

Реакция получения полиуретанов основана на химическом взаимодействии между гидроксильными и изоцианатными группами. Данные материалы существуют в виде одно- и двухупаковочных систем.

К одноупаковочным полиуретановым ЛКМ относят композиции, содержащие в качестве пленкообразователя смолы или их растворы, в составе которых присутствуют олигомерные полиолы и ди- или полиизоцианаты с блокированными изоцианатными группами. При формировании лакокрасочного покрытия (ЛКП) между макромолекулами образуются сшивки с участием влаги из воздуха либо материал способен к физическому высыханию при комнатной температуре.

Двухупаковочные системы полиуретановых ЛКМ состоят из растворов гидроксилсодержащих полимеров (полиэфиры, полиолы, полиакрилаты) и изоцианатных отвердителей. Основная реакция отверждения может протекать за счет действия катализаторов, высоких температур или сочетания данных факторов [10].

Особый интерес представляют акрил-уретановые материалы на основе гидроксилсодержащих акриловых сополимеров, так как покрытия на их основе совмещают характеристики как акриловых, так и полиуретановых полимеров. На свойства конечного продукта также влияет строение изоцианата [11]. Увеличение количества сшивок приводит к повышению твердости и прочности ЛКП до определенного предела, а также стойкости к внешним механическим воздействиям. К преимуществам гибридного акрил-уретанового покрытия также можно отнести равномерное распределение гидроксильных фрагментов по длине макромолекулы сополимера по сравнению с ЛКМ на основе гидроксилсодержащих полиэфиров [12].

В настоящее время существует потребность в синтезе нового гидроксилсодержащего акрилового сополимера для получения на его основе ЛКМ и ЛКП с требуемым набором эксплуатационных характеристик.

В промышленности двухкомпонентные акрил-уретановые эмали на основе гидроксилсодержащих акриловых сополимеров являются широко распространенным классом ЛКМ. Среди серийно выпускаемых материалов можно выделить эмали марок АК-1206 (Россия), Masscorur 14 (Россия), Политон-Ур (Россия), Interthane 990 (Великобритания), Nempathane Topcoat 55210 (Дания). Свойства эмалей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства акрил-уретановых лакокрасочных материалов

Показатель	Значения показателей для материалов марок				
	АК-1206	Masscorur 14	Политон-Ур	Interthane 990	Nempathane Topcoat 55210
Условная вязкость*, с	От 30 до 70	–	40	–	–
Время высыхания до степени 3 при 20 °С, ч	6	–	6	–	–
Жизнеспособность, ч	6	6	4	2	4
Толщина одного слоя, мкм	От 30 до 35	–	От 80 до 100	От 50 до 75	От 40 до 80
Массовая доля нелетучих веществ, %	От 30 до 75	59±2	60	57±3	51±2
Температурный диапазон эксплуатации, °С	От –60 до +130	От –60 до +120	От –50 до +60	–	До 120

* Определена на вискозиметре ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при 20 °С.

Самым распространенным способом получения данных сополимеров является свободно-радикальная сополимеризация в растворителях или эмульсии [13]. Основными мономерами с функциональными группами для получения гидроксилсодержащих акриловых сополимеров являются 2-гидроксиэтилакрилат [13] и 2-гидроксиметилметакрилат [12]. В качестве других компонентов применяют акриловые и метакриловые эфиры и кислоты, а также другие виниловые сомомеры. Варьируя соотношение мономеров, можно регулировать физико-механические характеристики конечного покрытия [14]. Источниками радикалов являются перекиси, гидроперекиси и азосоединения, например третбутилпероксибензоат [15] или азобисизобутиронитрил [16].

Существует тенденция снижения содержания легколетучих органических соединений и перехода на водорастворимые и водно-дисперсионные ЛКМ. В области исследования и разработки акрил-уретановых ЛКМ проведен ряд работ по уменьшению вредного воздействия на окружающую среду [17].

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ ведется работа по получению гидроксилсодержащих акриловых сополимеров и созданию на их основе экспериментальных композиций, которые позволят изготовить акрил-уретановые покрытия авиационного назначения с новыми, ранее недостижимыми характеристиками, а также решить проблемы импортозамещения, в том числе компонентной базы [18].

Материалы и методы

Для получения гидроксилсодержащего сополимера выбран метод растворной радикальной сополимеризации. В качестве мономеров применяли 2-гидроксиэтилакрилат, бутилметакрилат, бутилакрилат и стирол. Источником свободных радикалов являлся пероксид бензоила. Для снижения молекулярной массы использовали бутантиол-1. Сополимеризацию проводили в четырехгорлой колбе с обратным холодильником и верхнеприводным перемешивающим устройством. Перед синтезом готовили смесь мономеров с инициатором и регулятором молекулярной массы до полного растворения

перекиси. В начале реактор заполняли смесью ортоксиллола и бутилацетата, после чего осуществляли перемешивание и нагрев до температуры 80 °С, одновременно продувая реакционное пространство гелием. По достижении необходимой температуры в четырехгорлой колбе отключали подачу инертного газа и загружали мономерную смесь через капельную воронку в течение 30 мин. Синтез проводили в течение 6–8 ч до конверсии 98–99 %, определяемой гравиметрическим методом. После завершения сополимеризации определяли содержание гидроксильных групп в сополимере методом титрования выделенного из раствора образца, молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение с помощью метода гель-проникающей хроматографии, рассчитывали содержание нелетучих веществ.

В растворе сополимера диспергировали диоксид титана для получения полуфабриката эмали белого цвета. Далее в часть композиций добавили полиметилсилоксановое масло марки ПМС-50 для улучшения растекаемости. Для облегчения диспергирования пигмента полуфабрикат эмали разбавили смесью растворителей марки Р-189. Диспергирование диоксида титана проводили до размера частиц <30 мкм с использованием верхнеприводного перемешивающего устройства и бисера. По завершении диспергирования определили массовую долю нелетучих веществ (ГОСТ 31939–2022) и условную вязкость (ГОСТ 8420–2022) полуфабриката эмали. Затем в пигментированный раствор сополимера добавляли расчетное количество отвердителя на основе алифатического изоцианата и раствор оловоорганического катализатора. Количество отвердителя рассчитывали по формуле

$$m_{\text{отв}} = \frac{m_{\text{п/ф}} MM_{\text{NCO}} w_{\text{ОН}} w_{\text{соп}}}{MM_{\text{ОН}} w_{\text{NCO}}},$$

где $m_{\text{п/ф}}$ – масса полуфабриката эмали, г; MM_{NCO} – молекулярная масса изоцианатной группы, г/моль; $MM_{\text{ОН}}$ – молекулярная масса гидроксильной группы, г/моль; $w_{\text{ОН}}$ – содержание гидроксильных групп в сополимере, %; w_{NCO} – содержание изоцианатных групп в растворе отвердителя, %; $w_{\text{соп}}$ – содержание сополимера в полуфабрикате эмали, %.

Готовую к применению экспериментальную композицию тщательно перемешивали и разбавляли растворителем Р-189 до рабочей вязкости от 16 до 20 с, после чего наносили на заранее подготовленные стеклянные и алюминиевые пластины при помощи пневматического распыления в два слоя. Жизнеспособность композиции составила 5–6 ч, время высыхания пленок до степени 3 достигло 5–6 ч. Для сравнения использованы некоторые характеристики материала марки АК-1206.

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

Результаты

Свойства продукта синтеза и полуфабриката эмали

Продукт синтеза представлял собой прозрачный однородный раствор желтоватого цвета с высокой вязкостью. Соплимер и раствор гидроксилсодержащего акрилового сополимера характеризовался следующими свойствами:

Среднечисловая молекулярная масса, г/моль	16000
Средневесовая молекулярная масса, г/моль	109000
Индекс полидисперсности	6,8
Массовая доля нелетучих веществ, %	52,5
Конверсия, %	99
Содержание ОН-групп в сополимере, %	4,3

Основные характеристики полученной жидкой композиции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства полуфабрикатов эмали

Показатель	Значения показателей для		
	полуфабриката		эмали АК-1206
	с добавкой ПМС-50	без добавки	
Массовая доля нелетучих веществ, %	50,7	47,1	От 30,0 до 75,0
Условная вязкость*, с	76	51	От 30 до 70

* Определена на вискозиметре ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм.

Внешний вид покрытий

После полного отверждения композиции получены гладкие однородные покрытия белого цвета без морщин и посторонних включений. Внешний вид материала представлен на рис. 1.

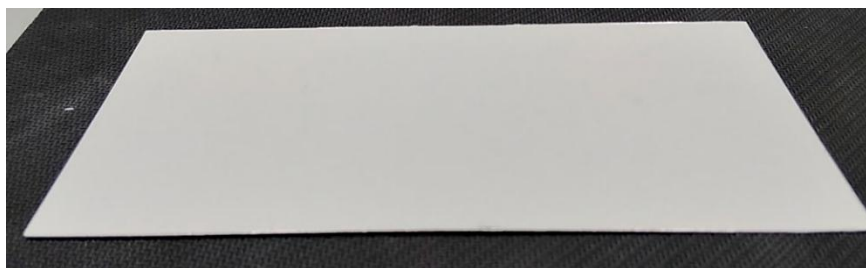


Рис. 1. Внешний вид покрытия

С помощью спектрофотометра и блескомера измерены начальные показатели внешнего вида ЛКП. Полученные покрытия обладали глянцем, блеск составил от 80 до 84 усл. ед.

Физико-механические свойства покрытий

Определены твердость (ГОСТ 5233–2021), адгезия к анодированному алюминию (ГОСТ 31149–2014), прочность при ударе (ГОСТ 4765–2024), эластичность при изгибе (ГОСТ 6806–2024) и толщина (ГОСТ 31993–2024) акрил-уретановых ЛКП после выдержки в течение 7 сут. Испытания проводили на образцах без грунтовочного слоя. Основные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства лакокрасочных покрытий

Показатель	Значения показателей для		
	полуфабриката		эмали АК-1206
	с добавкой ПМС-50	без добавки	
Прочность при ударе, см	50	50	50
Эластичность при изгибе, мм	1	1	1
Твердость по маятниковому прибору типа ТМЛ с использованием маятника Б/А, ед.	0,39/0,74	0,50/0,77	0,20/0,30
Адгезия, балл	От 0 до 1	От 0 до 1	1
Толщина двухслойного покрытия, мкм	От 35 до 45	От 35 до 45	От 30 до 50

Покрытия показали высокий уровень физико-механических свойств, причем покрытие на основе эмали с полиметилсилоксановым маслом имело более низкий показатель твердости, что, предположительно, связано с пластифицирующими свойствами добавки или ее миграцией на поверхностный слой материала. Таким образом, экспериментальное ЛКП имело характеристики, сопоставимые со свойствами эмали АК-1206.

Устойчивость покрытий к воздействию смывок

Для оценки возможности удаления покрытий с окрашиваемой поверхности при воздействии смывок получали ЛКП на основе экспериментального образца эмали. Для этого применяли смывки марок ВСС-1 и Elcon S. Испытания проводили после выдержки материала при комнатной температуре в течение 7 сут. При применении смывок происходило отслоение покрытия по всей площади за счет набухания материала, деформации под действием минеральных кислот и потери адгезии к металлу, что позволяет при эксплуатации проводить ремонтные работы.

Устойчивость покрытий к статическому воздействию органических жидкостей

Испытаниям подвергали акрил-уретановые покрытия после выдержки при комнатной температуре в течение 7 сут. Торцы образцов защищали эмалью ЭП-140. Образцы помещали в емкости, наполненные маслом марки Б-3В и гидравлической жидкостью марки LD-4, на 30 сут. По истечении времени пластины с ЛКП извлекали из жидкостей и просушивали в течение ~30 мин на воздухе. Затем проводили осмотр покрытий, определяли адгезию и прочность при ударе, измеряли изменения координат цвета и блеска. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства лакокрасочных покрытий после воздействия органических жидкостей

Показатель	Значения показателей для полуфабриката	
	с добавкой ПМС-50	без добавки
Прочность при ударе, см	50	50
Адгезия, балл	0	0
Цветовое различие (ΔE)	0,8	1,5
	1,2	0,6
Изменение блеска покрытия, %	17,6	4,3
	13,6	16,0
Примечание. В числителе и знаменателе указаны показатели покрытий после воздействия масла Б-3В и гидравлической жидкости LD-4 соответственно.		

При осмотре покрытия не выявлены растрескивания, пузыри и другие дефекты. Потемнение и пожелтение материала было едва различимым. После испытаний ЛКП сохранило показатели прочности при ударе и адгезии на высоком уровне. Изменения координат цвета и блеска были незначительными, но у покрытий с добавкой ПМС-50 после выдержки в масле Б-3В выявлено наибольшее снижение блеска, что, предположительно, может быть связано с переходом добавки из объема материала в органические жидкости.

Устойчивость покрытий к статическому воздействию воды

Проведена оценка устойчивости к статическому воздействию воды акрил-уретанового покрытия с торцами, защищенными эмалью ЭП-140. Образцы после выдержки при комнатной температуре в течение 7 сут помещали в емкости с водой на 10 сут, далее ЛКП сушили в течение 30 мин на воздухе и осуществляли осмотр материала, определяли физико-механические свойства и показатели внешнего вида. Данные испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства лакокрасочных покрытий после воздействия воды

Показатель	Значения показателей для полуфабриката	
	с добавкой ПМС-50	без добавки
Прочность при ударе, см	50	50
Адгезия, балл	0	0
Цветовое различие (ΔE)	1,4	2,7
Изменение блеска покрытия, %	8,0	4,5

После испытаний на поверхности эмали отсутствовали какие-либо дефекты, показатели прочности при ударе и адгезии к металлу остались на высоком уровне.

Устойчивость покрытий к тепловому воздействию

Алюминиевые пластины с акрил-уретановым ЛКП выдерживали в течение 200 ч в сушильном шкафу при максимальных температурах эксплуатации эмали АК-1206 (120 и 130 °С), после чего исследовали их свойства. Основные результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

Свойства лакокрасочных покрытий после теплового воздействия

Показатель	Значения показателей для		
	полуфабриката		эмали АК-1206
	с добавкой ПМС-50	без добавки	
Прочность при ударе, см	50	50	50
Адгезия, балл	0	0	1
Цветовое различие (ΔE)	$\frac{2,4}{2,9}$	$\frac{2,5}{2,9}$	—
Изменение блеска покрытия, %	$\frac{6,5}{7,2}$	$\frac{7,3}{7,4}$	
Примечание. В числителе и знаменателе указаны показатели покрытий после выдержки при температуре 120 и 130 °С соответственно.			

Материал сохранил физико-механические свойства на высоком уровне, что сопоставимо с характеристиками эмали АК-1206. Внешний вид покрытий изменился (отмечено пожелтение), при этом произошло незначительное изменение показателя блеска, что свидетельствует о высокой устойчивости к тепловому воздействию.

Свойства поверхности покрытия

Для образцов покрытий определены показатели краевого угла при смачивании водой и шероховатость поверхности (ГОСТ Р 71448–2024). Результаты исследования приведены в табл. 7.

Таблица 7

Свойства поверхности лакокрасочных покрытий

Показатель	Значения показателей для полуфабриката	
	с добавкой ПМС-50	без добавки
Краевой угол смачивания, градус	89,9	89,3
Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , нм	280,6	513,4

Добавление полиметилсилоксанового масла не повлияло на показатель краевого угла (рис. 2) между покрытием и водой, в то время как ЛКП с добавкой имели меньший уровень шероховатости и более гладкую поверхность.

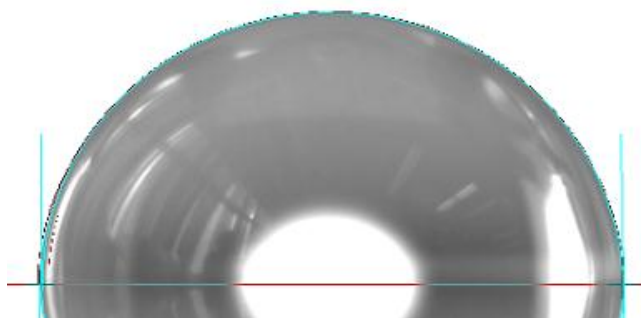


Рис. 2. Краевой угол смачивания

Устойчивость покрытий к воздействию атмосферных факторов

Проведены ускоренные испытания акрил-уретановых покрытий в аппарате искусственной погоды согласно СТО 1-595-15-379–2006 в течение 1000 ч. Образцы материала подвергали циклическому воздействию облучения ультрафиолетом при температуре 60 °С и конденсации влаги (влажность $\geq 95\%$) при температуре 50 °С. Длительность одного цикла составила 4 ч. Результаты испытаний приведены в табл. 8.

Таблица 8

**Свойства лакокрасочных покрытий после испытаний
в климатической камере в течение 1000 ч**

Показатель	Значения показателей для полуфабриката	
	с добавкой ПМС-50	без добавки
Прочность при ударе, см	50	40
Адгезия, балл	0	0
Цветовое различие (ΔE)	0,6	0,6
Изменение блеска покрытия, %	1,5	1,4

На образцах отсутствовали внешние дефекты, показатели координат цвета и блеска незначительно изменились. Акрил-уретановые покрытия после испытаний сохранили адгезию к анодированному алюминию на высоком уровне. Следует отметить, что ЛКП с добавкой ПМС-50 сохранили прочность при ударе. Таким образом, после долгой эксплуатации в условиях, близких к естественным, материал имел высокие показатели внешнего вида и физико-механические характеристики.

Обсуждение и заключения

Методом радикальной сополимеризации в смеси растворителей получен раствор акрилового сополимера на основе (мет)акриловых эфиров и гидроксилсодержащего мономера, изучены его характеристики. С его использованием получены экспериментальные акрил-уретановые композиции. Установлено, что добавление полиметилсилоксанового масла марки ПМС-50 привело к уменьшению твердости готового ЛКП и улучшению внешнего вида эмали. Таким образом, представлена возможность получения перспективного ЛКМ и ЛКП на его основе с высокими эксплуатационными характеристиками с целью обеспечения технологического суверенитета страны [19].

Список источников

1. Сазанов Ю.Н. Полиуретаны // Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия». 2023. URL: <https://bigenc.ru/c/poliuretany-5eb1c0> (дата обращения: 20.04.2026).
2. Липатов Ю.С., Керча Ю.Ю., Сергеева Л.М. Структура и свойства полиуретанов. Киев: Наукова думка, 1970. 279 с.
3. Кузнецова В.А., Марченко С.А., Емельянов В.В., Железняк В.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидных олигомеров и отвердителей на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 71–79. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
4. Зонненшайн М.Ф. Полиуретаны. Состав, свойства, производство, применение / пер. с англ. СПб.: Профессия, 2018. 576 с.
5. Железняк В.Г., Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Скивко П.В. Система лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали для защиты лобовых обогреваемых поверхностей изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 120–128. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
6. Зарубина Л.П. Устройство полов. Материалы и технологии. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 320 с.
7. Восстановление покрытий оборудования: полиуретан и резина в промышленности // Самара: Волга Ньюс. 2026. URL: <https://pfo.volga.news/784445/article/vosstanovlenie-pokrytij-oborudovaniya-poliuretan-i-rezina-v-promyshlennosti.html> (дата обращения: 20.04.2026).
8. Политон®-УР // Made in Ural: портал внешнеэкономической деятельности Свердловской области. 2026. URL: <https://made-in-ural.ru> (дата обращения: 20.04.2026).
9. Epoxy vs Acrylic vs Polyurethane Topcoats // Simid a GracoRoberts company. 2026. URL: <https://www.silmid.com/knowledge-centre/aircraft-paints-coatings-content/epoxy-vs-acrylic-vs-polyurethane-topcoats/> (дата обращения: 20.04.2026).
10. Брок Т., Гротэклаус М., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. М.: Пэйнт-Медиа, 2015. 548 с.
11. Козлова А.А., Кондрашов Э.К. Влияние молекулярной массы и элементного состава изоцианатов на свойства фторполиуретановых эмалей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). С. 92–100. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
12. Глоба А.И., Балаш А.Ю., Егорова А.Л., Крутько Э.Т. Синтез водных дисперсий функционализированных стирол-акриловых сополимеров и получение гибридных полиуретан-акриловых покрытий на их основе // Клеи. Герметики. Технологии. 2025. № 4. С. 31–42. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-4-31-42.
13. Coating composition: pat. 201660818A JP; appl. 18.09.14; publ. 25.04.16.
14. Измалков Д.А., Ахмадиева К.Р., Боков В.В., Кожухаров М.С. Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). С. 122–134. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134.
15. Xiaogen F., Yuzheng X., Si W. et al. Covalently immobilization of modified graphene oxide with waterborne hydroxyl acrylic resin for anticorrosive reinforcement of its coatings // Progress in Organic Coatings. 2022. No. 163. P. 106685. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106685.
16. Malshe V.C., Nivedita S.S. Fluorinated acrylic copolymers. Part I: Study of clear coatings // Progress in Organic Coatings. 2005. No. 53. P. 207–211. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2005.03.003.
17. Jomin T., Vrijeshkumar S., Rajeev J. Synthesis and characterization of solvent free acrylic copolymer for polyurethane coatings // Progress in Organic Coatings. 2020. No. 145. P. 105677. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105677.
18. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

19. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.

References

1. Sazanov Yu.N. *Polyurethanes*. Available at: <https://bigenc.ru/c/poliuretany-5eb1c0> (accessed: April 20, 2026).
2. Lipatov Yu.S., Kercha Yu.Yu., Sergeeva L.M. *Structure and properties of polyurethanes*. Kyiv: Naukova Dumka, 1970, 279 p.
3. Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Emelyanov V.V., Zheleznyak V.G. Study of the influence of molecular mass of epoxy oligomers and hardeners on the operational properties of paint coatings. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 71–79. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
4. Sonnenschein M.F. *Polyurethanes. Composition, properties, production, application*. Trans. from Engl. St. Petersburg: Profession, 2018, 576 p.
5. Zheleznyak V.G., Serdcelyubova A.S., Merkulova Yu.I., Skivko P.V. Paint coating system based on polyurethane enamel for protecting heated frontal surfaces of aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 120–128. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
6. Zarubina L.P. *Flooring Installation: Materials and Technologies*. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011, 320 p.
7. *Restoration of Equipment Coatings: Polyurethane and Rubber in Industry*. Available at: <https://pfo.volga.news/784445/article/vosstanovlenie-pokrytij-oborudovaniya-poliuretan-i-rezina-v-promyshlennosti.html> (accessed: April 20, 2026).
8. *Politon®-UR*. Available at: <https://made-in-ural.ru> (accessed: April 20, 2026).
9. *Epoxy vs Acrylic vs Polyurethane Topcoats*. 2026. Available at: <https://www.silmid.com/knowledge-centre/aircraft-paints-coatings-content/epoxy-vs-acrylic-vs-polyurethane-topcoats/> (accessed: April 20, 2026).
10. Brock T., Groteklaes M., Mischke P. *European Coatings Handbook*. Moscow: Paint-Media, 2015, 548 p.
11. Kozlova A.A., Kondrashov E.K. Influence of molecular weight and elemental composition of isocyanates on the properties of fluoropolyurethane enamels. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 92–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
12. Globa A.I., Balash A.Yu., Egorova A.L., Krutko E.T. Synthesis of aqueous dispersions of functionalized styrene-acrylic copolymers and preparation of hybrid polyurethane-acrylic coatings based on them. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2025, no. 4, pp. 31–42. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-4-31-42.
13. *Coating composition*: pat. 201660818A JP; appl. 18.09.14; publ. 25.04.16.
14. Izmailkov D.A., Akhmadieva K.R., Bokov V.V., Kozhukharov M.S. Modification of water-based acrylic copolymers to improve the performance properties of paint coatings. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), pp. 122–134. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 20, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134.
15. Xiaogen F., Yuzheng X., Si W. et al. Covalently immobilization of modified graphene oxide with waterborne hydroxyl acrylic resin for anticorrosive reinforcement of its coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2022, no. 163, p. 106685. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106685.
16. Malshe V.C., Nivedita S.S. Fluorinated acrylic copolymers. Part I: Study of clear coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2005, no. 53, pp. 207–211. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2005.03.003.
17. Jomin T., Vrijeshkumar S., Rajeev J. Synthesis and characterization of solvent free acrylic copolymer for polyurethane coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2020, no. 145, p. 105677. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105677.

18. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
19. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.

Информация об авторах

Измалков Дмитрий Александрович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зверевич Юлия Константиновна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кожухаров Максим Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ахмдиева Ксения Расимовна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткачук Анатолий Иванович, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry A. Izmalkov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yulia K. Zverevich, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maksim S. Kozhukharov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kseniya R. Akhmadieva, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly I. Tkachuk, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.06.2026; получена после доработки 14.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.07.2026.
The article was submitted 25.06.2026; received in revised form 14.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 16.07.2026.