

Научная статья

УДК 629.7.023:620.193.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-167-176

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА КОРРОЗИОННУЮ УСТАЛОСТЬ

В.А. Кузнецова¹, В.В. Емельянов¹, Г.Г. Шаповалов¹, В.Г. Железняк¹

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

Аннотация. Для деталей авиационной техники характерны случаи одновременного воздействия коррозионной среды и механических напряжений, возникающих при постоянных и переменных нагрузках. Изучены защитные свойства систем лакокрасочных покрытий при испытании на коррозионную усталость. Определена адгезионная прочность лакокрасочных покрытий при нормальном отрыве в исходном состоянии и после циклических испытаний на коррозионную усталость. Для испытаний выбраны системы покрытий на основе дисперсно-армированной эрозионностойкой эмали ЭП-5236 с различными грунтовками в сравнении с серийной системой покрытий на основе эмали ЭП-140.

Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, долговечность при циклическом изгибе, прочность при разрыве, эластичность покрытия, адгезионная прочность, коррозионная усталость

Для цитирования: Кузнецова В.А., Емельянов В.В., Шаповалов Г.Г., Железняк В.Г. Исследование защитных свойств лакокрасочных покрытий при испытании на коррозионную усталость // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 167–176. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-167-176.

Scientific article

RESEARCH OF PROTECTIVE PROPERTIES OF PAINT COATINGS DURING CORROSION FATIGUE TESTING

V.A. Kuznetsova¹, V.V. Emelyanov¹, G.G. Shapovalov¹, V.G. Zheleznyak¹

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 details of aviation engineering are characterized by cases of simultaneous influence of the corrosion environment and mechanical stresses which can arise at influence of permanent and alternating loads. The protective properties of systems of paint and varnish coatings, when testing for corrosion fatigue, and also to determination of adhesive durability of paint and varnish coatings at normal separation in initial condition and after cyclic tests for corrosion fatigue were studied. For tests, systems of coverings on the basis of disperse reinforced erosion-resistant enamels EP-5236 with different primers were selected in comparison with serial system of coverings on the basis of EP-140 enamel.

Keywords: paint coatings, durability at cyclic bend, durability at gap, elasticity of covering, adhesive durability, corrosion fatigue

For citation: Kuznetsova V.A., Emelyanov V.V., Shapovalov G.G., Zheleznyak V.G. Research of protective properties of paint coatings during corrosion fatigue testing. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 167–176. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-167-176.

Введение

Повышение ресурса работы изделий авиационной техники является приоритетным направлением, связанным с разработкой защитных лакокрасочных покрытий (ЛКП), эксплуатируемых в различных климатических зонах. Материалы, используемые в конструкции планера современных самолетов, отличаются высокой надежностью при работе в условиях воздействия знакопеременных механических нагрузок [1–4].

Особенностями конструкций летательных аппаратов являются небольшая толщина металлических панелей и деталей, а также наличие значительных механических напряжений в процессе эксплуатации.

Для деталей авиационной техники характерны случаи одновременного воздействия коррозионной среды и механических напряжений, которые могут возникать при воздействии постоянных и переменных нагрузок. В результате такого комплексного воздействия в ряде случаев может развиваться коррозия под напряжением, которая приводит к снижению прочности конструкций. Различают коррозию при постоянной растягивающей (приводит к коррозионному растрескиванию) и знакопеременной циклической (вызывает коррозионную усталость металла) нагрузке.

Особую опасность коррозия под напряжением представляет для высоконагруженных деталей самолетов (лопатки компрессора, лопасти воздушных винтов и др.). В процессе эксплуатации в условиях значительных знакопеременных нагрузок частотой до 50 Гц эти детали подвергаются коррозии, эрозионному воздействию песка и пыли при взлете и посадке, атмосферных осадков в виде дождя и снега, солнечной радиации и других факторов.

При защите конструкций от коррозии, в том числе коррозии под напряжением, необходимо исключить контакт поверхности металла с коррозионной средой. Наиболее эффективными по технологичности и надежности являются ЛКП в сочетании с неорганическими неметаллическими покрытиями [5–9]. В процессе эксплуатации ЛКП, используемые для защиты высоконагруженных элементов, подвергаются таким же механическим нагрузкам, как и окрашенное изделие. Механические нагрузки, которые испытывают высоконагруженные элементы, могут снижать защитные свойства ЛКП за счет ослабления адгезии, уменьшения механической прочности и эластичности, что связано с процессами старения [10–24].

Надежность, долговечность и декоративный вид покрытия определяются целым рядом факторов: свойствами лакокрасочного материала, схемой построения системы защитного покрытия, условиями и режимом формирования каждого слоя. Все эти факторы совместно и каждый в отдельности оказывают влияние на качество получаемого покрытия [25–32].

Данная работа посвящена изучению защитных свойств при испытании на коррозионную усталость, а также адгезионной прочности систем ЛКП при нормальном отрыве в исходном состоянии и после циклических испытаний на коррозионную усталость.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия», 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») [32].

Материалы и методы

Испытания систем ЛКП на основе дисперсно-армированной эрозионностойкой эмали ЭП-5236 с антикоррозионными грунтовками (ЭП-076, ЭП-0215, ЭП-0214 и ВГ-28) проводили в сравнении с системой покрытий АК-070 + ЭП-140, которая широко применяется для защиты от коррозии алюминиевых сплавов [20–26].

Защитные свойства покрытий в условиях коррозионно-усталостного воздействия изучали на образцах из сплавов Д1-Т Ан.Окс.нхр и 1163 Ан.Окс.нхр прямоугольного (3×22 мм) и круглого (Ø10 мм) сечения соответственно. Сравнительные испытания на коррозионную усталость проводили в условиях чистого изгиба образца при симметричном цикле нагружения. В качестве коррозионной среды использовали 3%-ный раствор NaCl в воде, который каплями подавали на образец. Плоские образцы прямоугольного сечения испытывали при частоте нагружения 25 Гц и амплитуде напряжений цикла 117,6 и 137,2 МПа, образцы круглого сечения – при 50 Гц и 196 МПа соответственно. При этом определяли долговечность образцов с покрытием до разрушения.

Лакокрасочные материалы наносили на образцы методом пневматического распыления, отверждение покрытий осуществляли по режимам, приведенным в нормативной документации.

Качество покрытий оценивали с помощью стандартных методик: прочность при ударе – по ГОСТ 4765–2024 на приборе У-1А, эластичность при изгибе – по ГОСТ 31974–2012, относительную твердость – по ГОСТ 5233–2021. Адгезионную прочность систем покрытий при нормальном отрыве определяли в соответствии с ГОСТ 32299–2025 в исходном состоянии и после длительных циклических испытаний на изгиб при амплитуде изгибающих напряжений $\sigma_{\max} = 78,4$ МПа с наработкой 10^6 циклов. Свободные пленки ЛКП изготовлены в соответствии с ГОСТ 14243–78.

Результаты и обсуждение

Изучено влияние ЛКП на сопротивление усталости алюминиевого сплава Д1-Т Ан.Окс.нхр при циклическом изгибе. В табл. 1 приведены механические свойства грунтовок при испытании на растяжение.

Таблица 1

Свойства грунтовочных покрытий в исходном состоянии

Грунтовочное покрытие	Толщина, мкм	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость, отн. ед.	Прочность при ударе, Дж	Эластичность при изгибе, мм
ЭП-0215	50	37,5	1,6	0,40	5,0	3
ЭП-0214	45	28,7	12,8	0,20		1
ЭП-076	50	36,4	1,3	0,35		3
ВГ-28	50	35,6	5,6	0,30		1

Согласно данным табл. 1, грунтовочные покрытия отличаются как по механической прочности σ_p , так и по эластичности, которая характеризуется относительным удлинением при разрыве ϵ_p . Наиболее эластичной из всех исследованных покрытий является грунтовка ЭП-0214 ($\sigma_p = 28,7$ МПа, $\epsilon_p = 12,8$ %, эластичность при изгибе 1 мм), а наиболее прочным – грунтовка ЭП-0215 ($\sigma_p = 37,5$ МПа, $\epsilon_p = 1,6$ %, эластичность при изгибе 3 мм). Покрытие ЭП-076 по механическим характеристикам (σ_p и ϵ_p) сопоставимо с покрытием ЭП-0215 и обладает высокой прочностью и твердостью.

Грунтовочное покрытие ВГ-28 характеризуется высоким уровнем прочности при разрыве и эластичности.

На рис. 1 и 2 приведены результаты испытаний на коррозионную усталость плоских образцов из сплава Д1-Т Ан.Окс.нхр, окрашенных грунтовками ЭП-0214, ВГ-28, ЭП-0215, ЭП-076, и эластичность данных грунтовок (относительное удлинение при разрыве свободных пленок).

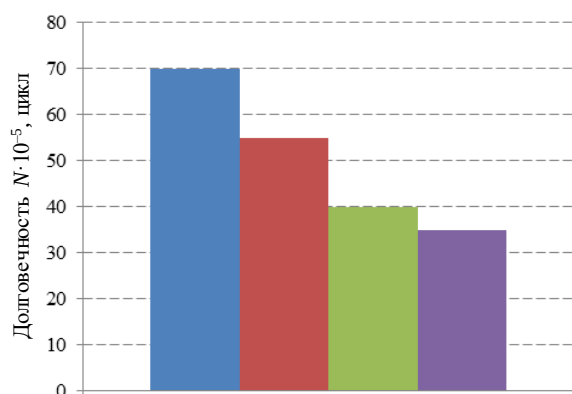


Рис. 1. Долговечность образцов с антикоррозионными грунтовочными покрытиями ЭП-0214 (■), ВГ-28 (■), ЭП-0215 (■) и ЭП-76 (■) при испытании на коррозионную усталость

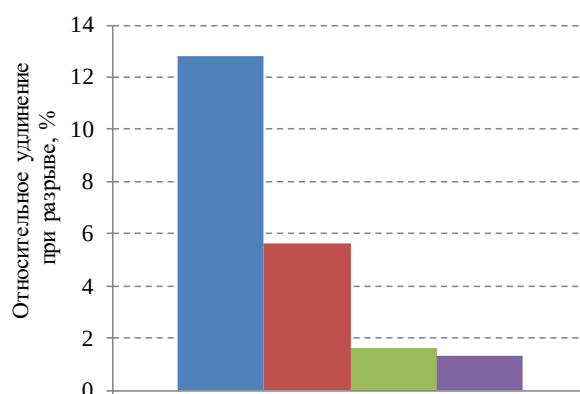


Рис. 2. Относительное удлинение при разрыве свободных пленок грунтовочных покрытий ЭП-0214 (■), ВГ-28 (■), ЭП-0215 (■) и ЭП-76 (■)

Долговечность образцов, окрашенных грунтовками, при испытании на коррозионную усталость существенно зависит от эластичности. Эластичная грунтовка способствует релаксации напряжений, возникающих в грунтовочном покрытии и на границе раздела «подложка–покрытие» в условиях чистого изгиба при симметричном цикле нагружения. Релаксация напряжений в покрытии при механическом нагружении образца происходит за счет проявления вязкоупругих свойств грунтовок, модифицированных эластомером (ЭП-0214 и ВГ-28).

Испытания образцов, окрашенных грунтовками ЭП-0215 и ЭП-076 с небольшой эластичностью ($\epsilon_p = 1,3\text{--}1,6\%$) и высокой прочностью ($\sigma_p = 36,4\text{--}37,5$ МПа), показали, что жесткие покрытия обеспечивают существенно меньшую долговечность. Это связано с тем, что в таких покрытиях при циклических испытаниях на изгиб возникают микротрещины, переходящие в макротрещины. В зоне образования трещин происходят разрушение и отслаивание покрытия с проникновением коррозионной среды (NaCl). В результате образуются очаги коррозии, способствующие разрушению образца.

Исследована долговечность образцов, окрашенных системами покрытий на основе эластичных грунтовок и эрозионностойкой эмали ЭП-5236, в сравнении с серийной системой ЛКП. Свойства исследованных систем ЛКП представлены в табл. 2.

Таблица 2

Адгезия и физико-механические свойства систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) на образцах из сплава Д1-Т Ан.Окс.нхр

Система ЛКП	Толщина, мкм	Адгезия, балл		Прочность при ударе, Дж	Эластичность при изгибе, мм	Прочность при растяжении, мм
		в исходном состоянии	после 7 сут увлажнения			
ЭП-0214 + ЭП-5236	105–110	1	1	5,0	1	6,9
АК-070 + ЭП-140	105–110		2		2	5,0
ВГ-28 + ЭП-5236	115–120		1		1	6,5

На рис. 3 и 4 приведены результаты испытаний систем ЛКП на коррозионную усталость образцов прямоугольного и круглого сечения.

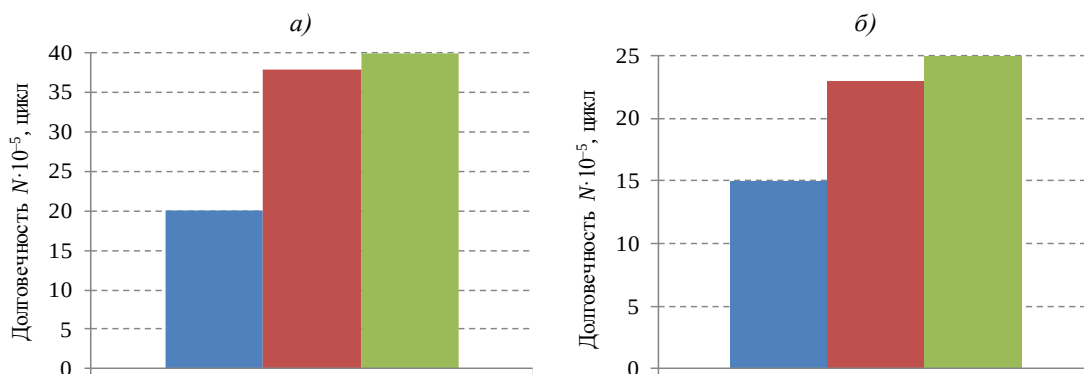


Рис. 3. Долговечность систем лакокрасочных покрытий АК-070 + ЭП-140 (■), ЭП-0214 + ЭП-5236 (■), ВГ-28 + ЭП-5236 (■) при испытании на коррозионную усталость образцов прямоугольного сечения из сплава Д1-Т Ан.Окс.нхр при частоте циклов 25 Гц и амплитуде напряжений 117,6 (а) и 137,2 МПа (б)

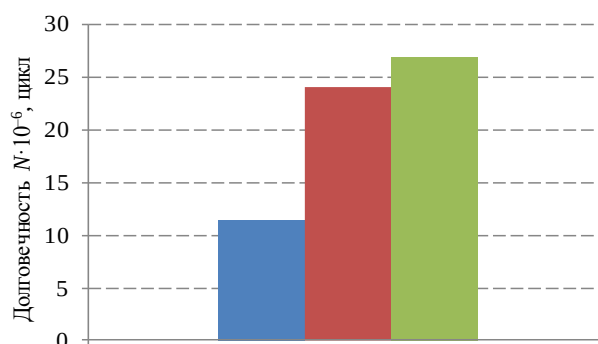


Рис. 4. Долговечность систем лакокрасочных покрытий АК-070 + ЭП-140 (■), ЭП-0214 + ЭП-5236 (■), ВГ-28 + ЭП-5236 (■) при испытании на коррозионную усталость образцов круглого сечения из сплава 1163 Ан.Окс.нхр при частоте циклов 50 Гц и амплитуде напряжений 196 МПа

Долговечность образцов алюминиевых сплавов при циклических испытаниях на изгиб существенно зависит от применяемой системы ЛКП. Результаты, полученные при испытаниях на изгиб как плоских, так и цилиндрических образцов, показали, что покрытие на основе эмали ЭП-5236 в системе с эластичными грунтовками ЭП-0214 и ВГ-28 в $\sim(1,9-2,0)$ раза более стойкие к коррозионному воздействию, чем система покрытий АК-070 + ЭП-140. Невысокая стойкость при испытании на коррозионную усталость образцов с покрытием АК-070 + ЭП-140 обусловлена значительным снижением адгезии грунтовочного покрытия АК-070 в области развития усталостной трещины. Это связано с тем, что механические напряжения, возникающие в покрытии и на границе раздела «подложка–покрытие», приводят к образованию микротрещин в самом покрытии, а также к снижению адгезии, вызывающему отслаивание покрытия в зоне разрушения образца.

Следует отметить, что очагами разрушения на всех исследованных плоских образцах являлись трещины в анодной пленке, расположенные параллельно друг другу с разной плотностью. Отслаивание покрытия наблюдали на образцах как прямоугольного, так и круглого сечения. На плоских образцах, окрашенных системами покрытий на основе эмали ЭП-5236, в зоне излома также обнаружено незначительное отслаивание, однако площадь разрушения значительно меньше, чем на образцах с ЛКП на основе эмали ЭП-140.

На следующем этапе определены изменения адгезионной прочности плоских образцов после длительных циклических испытаний на изгиб. Амплитуда изгибающих напряжений составила $\sigma_{\max} = 78,4$ МПа при длительности испытаний 10^6 циклов. Адгезионную прочность определяли на плоских образцах в зоне максимальных напряжений.

На рис. 5 приведены результаты определения адгезионной прочности при нормальном отрыве систем ЛКП в исходном состоянии и после циклических испытаний на изгиб.

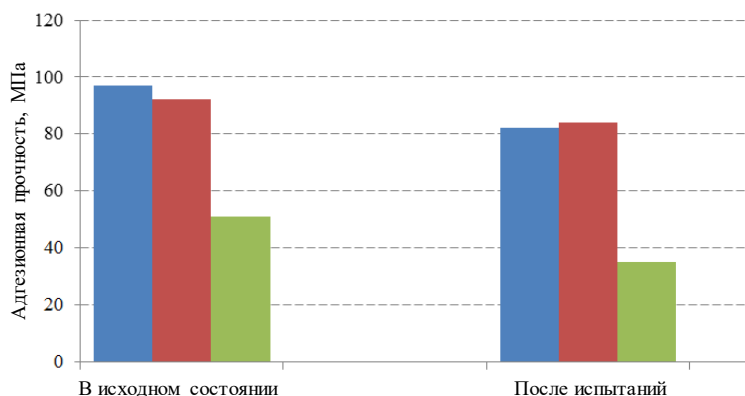


Рис. 5. Адгезионная прочность систем лакокрасочных покрытий ВГ-28 + ЭП-5236 (■), ЭП-0214 + ЭП-5236 (■), АК-070 + ЭП-140 (■) в исходном состоянии и после испытаний на циклический изгиб

Циклический изгиб приводит к снижению адгезионной прочности систем покрытий ВГ-28 + ЭП-5236, ЭП-0214 + ЭП-5236 и АК-070 + ЭП-140 на ~15,5; ~8,7 и ~31,4 %.

Анализируя полученные результаты можно предположить, что на стабильность адгезионной прочности при испытании на циклический изгиб оказывают существенное влияние механические характеристики грунтовочных покрытий. Применение эластичных грунтовок с эрозионнотойкой эмалью ЭП-5236 способствует повышению устойчивости ЛКП к динамическим нагрузкам, что достигается за счет релаксации напряжений, возникающих при механическом воздействии [33].

Заключения

Исследовано влияние ЛКП на сопротивление усталости алюминиевых сплавов при циклическом изгибе. Показано, что при одинаковых условиях испытаний на коррозионную усталость долговечность образцов из алюминиевых сплавов, окрашенных грунтовками ЭП-0214, ВГ-28, ЭП-0215 и ЭП-076, зависит от механических характеристик покрытий.

За счет вязкоупругих свойств эластичные грунтовки (ЭП-0214 и ВГ-28) способствуют релаксации напряжений, возникающих в покрытии и на границе раздела «подложка–покрытие».

Образцы, окрашенные грунтовками ЭП-0215 и ЭП-076 с невысокой эластичностью, имели меньшую долговечность. Это связано с тем, что в таких жестких покрытиях при циклических испытаниях на изгиб возникают микротрещины, переходящие в макротрещины. В зоне образования трещин происходят разрушение и отслаивание покрытия, проникает коррозионная среда (NaCl), возникают очаги коррозии, способствующие разрушению образца.

При испытании на коррозионную усталость исследованы защитные свойства систем ЛКП на основе эрозионнотойкой эмали ЭП-5236 с эластичными грунтовками ЭП-0214 и ВГ-28 в сравнении с серийной системой АК-070 + ЭП-140. Установлено, что долговечность образцов алюминиевых сплавов при циклических испытаниях на изгиб существенно зависит от применяемой системы ЛКП. Показано, что системы покрытий на основе эмали ЭП-5236 с эластичными грунтовками ЭП-0214 и ВГ-28 в ~(1,9–2,0) раза более коррозионнотойкие, чем система АК-070 + ЭП-140.

Определена адгезионная прочность при нормальном отрыве систем ЛКП в исходном состоянии и после циклических испытаний на изгиб. Установлено, что циклический изгиб приводит к снижению адгезионной прочности ЛКП. Механические характеристики грунтовок влияют на стабильность адгезионной прочности при испытании на циклический изгиб. Повысить устойчивость ЛКП на основе эрозионностойкой эмали ЭП-5236 к динамическим нагрузкам можно за счет применения эластичных грунтовок.

Список источников

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
2. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). С. 62–67. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
3. Проблемы защитных ЛКМ: Обзор материалов европейской конференции «Защитные покрытия» (Protective coating), Дюссельдорф (Германия) // Лакокрасочные материалы и их применение. 2013. № 9. С. 33–35.
4. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
5. Соснина С.А., Кулешова И.Д. Регулирование взаимодействия компонентов в наполненных лакокрасочных композициях // Лакокрасочные материалы и их применение. 2011. № 1. С. 60–62.
6. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
7. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И., Жигалова К.А. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями. М.: Химия, 1987. 224 с.
8. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Вдовин А.И. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 3–13. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
9. Кондрашов Э.К., Козлова А.А. Эффективность противокоррозионной защиты кремнийорганическими эмалями сварных соединений из сталей ВНС-2 и ВНС-5 // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). С. 117–124. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-117-124.
10. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
11. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Механические испытания и свойства конструкционных авиационных металлических материалов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 344 с.
12. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
13. Каблов Е.Н., Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на характеристики алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 78–91. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
14. Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Двирная Е.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 2. Состояние защитных лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). С. 113–124. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.

15. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
16. Кузнецова В.А. Влияние эластомерного модификатора на механические и вязкоупругие свойства эпоксидно-каучуковых композиций для эрозионностойких покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.
17. Юловская В.Д. Олигомеры. Каучук – олигомерные композиции, структура и свойства: учеб. пособие. М., 2008. 46 с.
18. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И. Антикоррозионные грунтовки и ингибированные лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1980. 196 с.
19. Кузнецова В.А., Деев И.А., Кузнецов Г.В., Кондрашов Э.К. Влияние наполнителя на усталостную прочность и микроструктуру свободных полимерных пленок при циклическом растяжении // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. № 5. С. 35–39.
20. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
21. Смехов Ф.М. Повышение адгезионной прочности покрытий путем регулирования полярности и сегментальной подвижности молекул пленкообразователей // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1986. № 1. С. 23–25.
22. Сорокин М.Ф., Кочнова З.А., Захарова А.А., Голова Н.А. Отверждение эпоксидных олигомеров аминоксиланами // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1986. № 5. С. 24–28.
23. Чалых А.Е., Кочнова З.А., Жаворонок Е.С. Совместимость и диффузия в системах эпоксидные олигомеры – жидкие карбоксилатные каучуки // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2001. Т. 43. № 12. С. 1–9.
24. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. УрО РАН, 2016. С. 25–26.
25. Шишелова Т.И., Степанова Н.Е., Плынская Д.А., Беляева М.А. Нитевидные кристаллы // *Успехи современного естествознания*. 2009. № 8. С. 12–13.
26. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М: Химия, 1969. 319 с.
27. Семенова Л.В., Нефедов Н.И. Применение эпоксидных модифицированных грунтовок в системах ЛКП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 3. С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-03-38-44.
28. Козлова Л.С., Сибилева С.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Ингибиторы коррозии (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 67–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-67-75.
29. Кочнова З.А., Жаворонок Е.С., Котова А.В. Особенности получения эпоксидно-каучуковых композиций на основе жидких бутадиеннитрильных каучуков и эпоксидных олигомеров // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1998. № 11. С. 27–28.
30. Фабуляк Ф.Г. Молекулярная подвижность в поверхностных слоях. Киев: Наукова думка, 1983. 144 с.
31. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова думка, 1980. 260 с.
32. 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.
33. Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Силаева А.А. Влияние механических характеристик грунтовочных покрытий на устойчивость систем эрозионностойких дисперсно-армированных покрытий к циклическим механическим нагрузкам // *Труды ВИАМ*. 2018. № 6 (66). С. 59–67. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-59-67.

References

1. *History of Aviation Materials Science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.
2. Zheleznyak V.G. Modern paint and varnish materials for use in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), pp. 62–67. Available at: <http://www.viam-works.ru>. (accessed: January 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
3. Problems of protective paints and varnishes: Review of the materials of the European conference «Protective coating», Dusseldorf (Germany). *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2013, no. 9, pp. 33–35.
4. Pavlyuk B.Ph. The main directions in the field of development of polymeric functional materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
5. Sosnina S.A., Kuleshova I.D. Regulation of the interaction of components in filled paint and varnish compositions. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2011, no. 1, pp. 60–62.
6. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex paint and varnish coating systems for the protection of metal polymer composite materials, as well as their contact joints from the effects of aggressive factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2016, no. 6, pp. 32–35.
7. Rosenfeld I.L., Rubinstein F.I., Zhigalova K.A. *Protection of metals from corrosion with paint and varnish coatings*. Moscow: Khimiya, 1987, 224 p.
8. Kablov E.N., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 3–13. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 10, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
9. Kondrashov E.K., Kozlova A.A. Efficiency of anticorrosive protection by organic silicon enamels of welded connections of VNS-2 and VNS-5 steels. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), pp. 117–124. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-117-124.
10. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
11. Erasov V.S., Oreshko E.I. *Mechanical testing and properties of structural aircraft metal materials*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 344 p.
12. Lutsenko A.N., Slavin A.V., Erasov V.S., Khvackij K.K. Strength tests and researches of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
13. Kablov E.N., Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskii S.L. The effect of heat treatment on the characteristics of aluminium-zinc coatings obtained by the cold spray method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 78–91. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
14. Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Dvirnaya E.V., Veligodsky I.M. Investigation of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in moderately warm climate. Part 2. Condition of protective paint and varnish coatings. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), pp. 113–124. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 12, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.
15. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
16. Kuznetsova V.A. Influence of the elastomeric modifier on mechanical and viscoelastic properties of epoxy and rubber compositions for erosion resistant coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.
17. Yulovskaya V.D. *Oligomers. Rubber – oligomeric compositions, structure and properties*: textbook. Moscow, 2008, 46 p.
18. Rosenfeld I.L., Rubinstein F.I. *Anticorrosive primers and inhibited paint and varnish coatings*. Moscow: Khimiya, 1980, 196 p.

19. Kuznetsova V.A., Deev I.A., Kuznetsov G.V., Kondrashov E.K. Effect of filler on the fatigue strength and microstructure of free-flowing polymer films under cyclic tension. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2014, vol. 80, no. 5, pp. 35–39.
20. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
21. Smekhov F.M. Increasing the adhesive strength of coatings by regulating the polarity and segmental mobility of film-forming molecules. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 1, pp. 23–25.
22. Sorokin M.F., Kochnova Z.A., Zakharova A.A., Golova N.A. Curing of epoxy oligomers with aminoalkoxysilanes. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 5, pp. 24–28.
23. Chalykh A.E., Kochnova Z.A., Zhavoronok E.S. Compatibility and diffusion in epoxy oligomer – liquid carboxylate rubber systems. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A*, 2001, vol. 43, no. 12, pp. 1–9.
24. Kablov E.N. The Role of Chemistry in the Creation of Next-Generation Materials for Complex Technical Systems. *Abstracts of the Reports of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. UB of RAS, 2016, pp. 25–26.
25. Shishelova T.I., Stepanova N.E., Plynskaya D.A., Belyaeva M.A. Whiskers. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2009, no. 8, pp. 12–13.
26. Berlin A.A., Basin V.E. *Basics of Polymer Adhesion*. Moscow: Khimiya, 1969, 319 p.
27. Semenova L.V., Nefedov N.I. Application of modified epoxy primers in the painting systems. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-03-38-44.
28. Kozlova L.S., Sibileva S.V., Chesnokov D.V., Kutyrev A.E. Corrosion inhibitors (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 67–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-67-75.
29. Kochnova Z.A., Zhavoronok E.S., Kotova A.V. Features of the Production of Epoxy-Rubber Composites Based on Liquid Nitrile-Butadiene Rubbers and Epoxy Oligomers. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1998, no. 11, pp. 27–28.
30. Fabulyak F.G. *Molecular Mobility in Surface Layers*. Kyiv: Naukova Dumka, 1983, 144 p.
31. Lipatov Yu.S. *Interfacial Phenomena in Polymers*. Kyiv: Naukova Dumka, 1980, 260 p.
32. 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.
33. Kuznetsova V.A., Zheleznyak V.G., Silaeva A.A. Influence of mechanical characteristics of priming coverings on stability to cyclic mechanical loads of systems of the erosion resistant disperse reinforced coatings. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6 (66), pp. 59–67. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-59-67.

Информация об авторах

Кузнецова Вера Аркадьевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Емельянов Виктор Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шаповалов Георгий Геннадьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Железняк Вячеслав Геннадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vera A. Kuznetsova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victor V. Emelyanov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Georgiy G. Shapovalov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav G. Zheleznyak, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.03.2026.

The article was submitted 05.03.2026; approved and accepted for publication after reviewing 16.03.2026.