

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131

## ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ НА СВОЙСТВА СИСТЕМ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ БЕСХРОМАТНОЙ ГРУНТОВКИ ВГ-44 С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭПОКСИДНЫХ, ПОЛИУРЕТАНОВЫХ, АКРИЛУРЕТАНОВЫХ И ФТОРПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭМАЛЕЙ

В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, В.В. Емельянов<sup>1</sup>, С.А. Марченко<sup>1</sup>, Н.А. Коврижкина<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Исследованы адгезия и прочность при ударе систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с эмалями ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 после искусственного старения по методике ЛИ-14 (при  $-60 \div +80$  °С) в течение 16 циклов, а также после термостарения при температурах 80 °С в течение 1000 ч и 100 °С в течение 500 ч. Определены декоративные свойства покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с эмалями ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 после искусственного старения. Показано, что искусственное старение вышеуказанных систем ЛКП не оказывает существенного влияния на прочность покрытий при ударе, но приводит к снижению прочности при растяжении и блеска покрытий.

**Ключевые слова:** бесхроматная грунтовка, системы лакокрасочных покрытий, адгезия, прочность при растяжении, прочность при ударе, водопоглощение, блеск, искусственное старение

**Для цитирования:** Кузнецова В.А., Емельянов В.В., Марченко С.А., Коврижкина Н.А. Влияние искусственного старения на свойства систем покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с применением эпоксидных, полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131.

Scientific article

## THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL AGING ON THE PROPERTIES OF COATING SYSTEMS BASED ON CHROMATE-FREE PRIMER VG-44 USING EPOXY, POLYURETHANE, ACRYLIC URETHANE AND FLUOROPOLYURETHANE ENAMELS

V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, V.V. Yemelyanov<sup>1</sup>, S.A. Marchenko<sup>1</sup>, N.A. Kovrizhkina<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The adhesion and impact strength of paint coating systems based on the chromate-free primer VG-44 with enamels VE-69, AK-1206, UR-1161 and EP-140 after artificial aging using the LI-14 method ( $-60 \div +80$ ) °C during 16 cycles, as well as after thermal aging at temperatures of 80 °C – 1000 hours and 100 °C – 500 hours. The decorative properties of coatings based on the chromate-free primer VG-44 with enamels VE-69, AK-1206, UR-1161 and EP-140 after artificial aging were determined. It has been shown that artificial aging of the above paintwork systems does not have a significant effect on the strength of coatings upon impact, but leads to a decrease in tensile strength, as well as a decrease in the gloss of the coatings.

**Keywords:** chromate-free primer, paint coating systems, adhesion, tensile strength, impact strength, water absorption, gloss, artificial aging

**For citation:** Kuznetsova V.A., Yemelyanov V.V., Marchenko S.A., Kovrizhkina N.A. The influence of artificial aging on the properties of coating systems based on chromate-free primer VG-44 using epoxy, polyurethane, acrylic urethane and fluoropolyurethane enamels. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131.

### Введение

Современный летательный аппарат представляет собой сложную конструкцию, выполненную из разнородных металлов и неметаллических материалов.

Самолеты и вертолеты эксплуатируются в различных климатических условиях, вследствие чего они подвергаются воздействию атмосферных факторов, резкому перепаду температур при взлете и посадке, а также испытывают механические нагрузки [1–3].

Эти условия способствуют возникновению коррозии металлических деталей, ухудшающей их механические свойства, а также разрушению или изменению первоначальных свойств деталей из неметаллических материалов. Сложные условия эксплуатации авиационной техники обуславливают необходимость постоянного повышения надежности лакокрасочных покрытий (ЛКП), грунтовок и эмалей, обладающих улучшенными адгезионными и защитными свойствами, экологически безопасных и быстросохнущих. Лакокрасочные покрытия должны сохранять свои свойства в условиях полета на больших скоростях при переменных нагрузках и вибрации, повышенной солнечной радиации, а также при воздействии пыли и песка при взлете и посадке. Жесткие условия эксплуатации потребовали разработки ряда лакокрасочных материалов специально для самолетостроения [4–8].

Для защиты и декоративной отделки самолетов и вертолетов применяются различные системы ЛКП, основной задачей которых является защита деталей и узлов конструкции летательных аппаратов от разрушающего воздействия окружающей среды. Применение той или иной системы ЛКП зависит от назначения конструкции, условий эксплуатации, режима работы, а также требований, предъявляемых к декоративности покрытия [9–13].

Системой покрытий принято считать сочетание последовательно наносимых слоев лакокрасочных материалов различного назначения. В основе комплексной системы ЛКП заложен принцип функциональности каждого наносимого слоя. Грунтовочный слой выполняет функцию антикоррозионной защиты и обеспечивает адгезию к окрашиваемой поверхности, а также к последующему слою покрытия. Изолирующие слои эмали обеспечивают защиту от внешних воздействующих факторов и атмосферостойкость, устойчивость к воздействию перепада температур, эрозионную и химическую стойкость, а также декоративные и другие свойства, необходимые для конкретных условий эксплуатации [14–16].

Грунтовочное покрытие на металлической поверхности является преградой от воздействия внешних факторов. Действие грунтовки на поверхность металла включает сложный процесс изменения состояния поверхности алюминиевого сплава при контакте с электролитом в устойчивое пассивное состояние. Необходимо отметить особое значение грунтовочного покрытия для обеспечения адгезии системы покрытий, которая испытывает также динамические нагрузки в процессе эксплуатации изделий авиационной техники [17–24].

В связи с этим разработка перспективных лакокрасочных материалов, обеспечивающих высокий уровень защиты и отвечающих современным требованиям (в том числе экологическим), является в настоящее время актуальной задачей. Так, для защиты внешней поверхности изделий авиационной техники в основном используются атмосферостойкие системы покрытий на основе полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей. Для защиты внутренних поверхностей используются системы покрытий на основе эпоксидных грунтовок и эмалей. Следует отметить, что в ведущих странах мира среди разработчиков антикоррозионных грунтовок наблюдается тенденция снижения их токсичности путем замены хроматных пигментов на нетоксичные ингибиторы коррозии [25–34].

Данная работа посвящена изучению влияния искусственного старения на свойства систем покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с применением эпоксидных, полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [35].

### Материалы и методы

Для изучения свойств систем покрытий на основе бесхроматной быстросохнущей защитной грунтовки ВГ-44 выбраны следующие лакокрасочные материалы:

- эпоксидно-полиамидная эмаль ЭП-140 (ТУ 1-595-15-1855–2020);
- полиуретановая эмаль УР-1161 (ТУ 6-10-1758–80);
- акрилуретановая эмаль АК-1206 (ТУ 6-10-ВИАМ-100–88);
- фторполиуретановая эмаль ВЭ-69 (ТУ 1-595-15-1057–2008).

Определение свойств систем лакокрасочных материалов с применением бесхроматной грунтовки ВГ-44 проводили в сравнении с аналогичными системами ЛКП с серийной хроматной грунтовкой ЭП-0215.

В процессе исследований основное внимание уделено изменению свойств изучаемых систем покрытий после воздействия факторов, вызывающих старение ЛКП: перепад температур по циклу ЛИ-14 ( $-60 \div +80$  °С) и термическое старение (непрерывный нагрев) при температуре 80 °С в течение 1000 ч, а также при температуре 100 °С в течение 500 ч.

Искусственное старение систем ЛКП проводили по циклу ЛИ-14 в диапазоне температур  $-60 \div +80$  °С в течение 16 циклов. Один цикл испытаний соответствует воздействию: камеры влажности при  $\phi = 98 \pm 2$  % и температуре  $23 \pm 2$  °С в течение 16–16,5 ч; охлаждению при температуре  $-60$  °С в течение 1 ч; нагреву при температуре 100 °С в течение 2,5 ч; охлаждению при температуре  $-60$  °С в течение 1 ч, затем нагреву при температуре 80 °С в течение 2,5 ч и охлаждению образцов в течение 15 мин.

В качестве основных критериев оценки свойств систем ЛКП с применением бесхроматной грунтовки ВГ-44 и хроматной грунтовки ЭП-0215 выбраны: адгезия покрытий – по ГОСТ 15140–78; прочность при растяжении (эластичность) – по ГОСТ 29309–92; прочность покрытия при ударе – по ГОСТ 4765–73; водопоглощение – по ГОСТ 21513–76. Водопоглощение определяли на алюминиевой фольге толщиной 150 мкм после испытаний в дистиллированной воде в течение 30 сут.

После проведения ускоренных испытаний оценивали изменение цветовых характеристик (блеск –  $\Delta E$ ).

### Результаты и обсуждение

Для проведения исследований на лабораторном оборудовании изготовлены грунтовки ВГ-44 и ЭП-0215, определены технологические свойства грунтовок (табл. 1).

Как видно из полученных результатов, по содержанию нелетучих веществ грунтовка ВГ-44 практически не отличается от грунтовки ЭП-0215, при этом грунтовка ВГ-44 не содержит токсичных хроматных ингибирующих пигментов, имеет более высокую вязкость (39 с) по сравнению с грунтовкой ЭП-0215 (21 с). Время высыхания

грунтовок ВГ-44 до степени 3 составляет 3 ч, а грунтовок ЭП-0215 – 6 ч, что позволяет сократить технологический цикл окраски изделий авиационной техники.

*Таблица 1*

**Технологические свойства полуфабрикатов грунтовок ВГ-44 и ЭП-0215**

Показатель	Значения показателя для грунтовок	
	ВГ-44	ЭП-0215
Массовая доля нелетучих веществ, %	56,5	57,1
Условная вязкость, с	39	21
Степень перетира, мкм	30	40
Время высыхания грунтовки до степени 3, ч	3	6

Для определения свойств покрытий изготовлены образцы из алюминиевого сплава Д16-АТ (Ан.Окс.нхр) с покрытиями ВГ-44 и ЭП-0215.

В табл. 2 приведены результаты определения свойств покрытий на основе грунтовок ВГ-44 и ЭП-0215.

*Таблица 2*

**Свойства покрытий на основе грунтовок ВГ-44 и ЭП-0215**

Показатель	Значения показателя для грунтовок	
	ВГ-44	ЭП-0215
Адгезия к алюминиевому сплаву Д16-АТ (Ан.Окс.нхр), балл:		
– в исходном состоянии	1	1
– после 10 сут увлажнения	1	1
Прочность при ударе, Дж	5	5
Эластичность пленки при изгибе, мм	2	2
Прочность при растяжении, мм	5,6	5,7
Твердость пленки по маятниковому прибору ТМЛ, отн. ед.	0,43	0,4
Водопоглощение за 30 сут, %	1,4	1,56

Из полученных результатов следует, что покрытие на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 по адгезии, прочности при ударе и растяжении (эластичность) при изгибе не уступает покрытию на основе хроматной грунтовки ЭП-0215. Следует отметить, что водопоглощение покрытия ВГ-44 на ~10 % меньше, чем у покрытия ЭП-0215.

Системы покрытий на основе грунтовок ВГ-44 и ЭП-0215 с применением эмалей ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 наносили на образцы из сплава Д16-АТ (Ан.Окс.нхр) методом пневматического распыления в соответствии с нормативной документацией.

Исследованы адгезия и физико-механические свойства систем ЛКП на основе бесхроматной быстросохнущей грунтовки ВГ-44 с эмалями ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 в сравнении с аналогичными системами ЛКП на основе серийной хроматной грунтовки ЭП-0215.

В табл. 3 представлены результаты определения адгезии и физико-механических свойств вышеуказанных систем ЛКП в исходном состоянии.

Видно, что системы покрытий на основе бесхроматной быстросохнущей защитной грунтовки ВГ-44 по адгезии и физико-механическим свойствам практически не отличаются от систем покрытий на основе хроматной грунтовки ЭП-0215. Адгезия всех исследуемых систем ЛКП как в исходном состоянии, так и после 10 сут увлажнения составляет 1 балл, прочность при ударе 5 Дж, прочность при растяжении (эластичность) систем покрытий на основе грунтовки ВГ-44 соответствует прочности при растяжении систем покрытий на основе грунтовки ЭП-0215.

Таблица 3

Адгезия и физико-механические свойства систем покрытий  
в исходном состоянии

Система покрытий	Адгезия к сплаву Д16-АТ (Ан.Окс.нхр), балл		Физико-механические свойства	
	в исходном состоянии	после 10 сут увлажнения	Прочность при ударе, Дж	Прочность при растяжении, мм
ВГ-44 + ВЭ-69	1	1	5	5,9
ВГ-44 + АК-1206	1	1	5	5,6
ВГ-44 + УР-1161	1	1	5	5,3
ВГ-44 + ЭП-140	1	1	5	4,5
ЭП-0215 + ВЭ-69	1	1	5	5,9
ЭП-0215 + АК-1206	1	1	5	5,7
ЭП-0215 + УР-1161	1	1	5	5,2
ЭП-0215 + ЭП-140	1	1	5	4,6

Определено водопоглощение систем ЛКП на основе грунтовки ВГ-44 с применением эмалей ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 в сравнении с грунтовкой ВГ-44 (без покрытия) после 30 сут испытаний в дистиллированной воде (рис. 1).

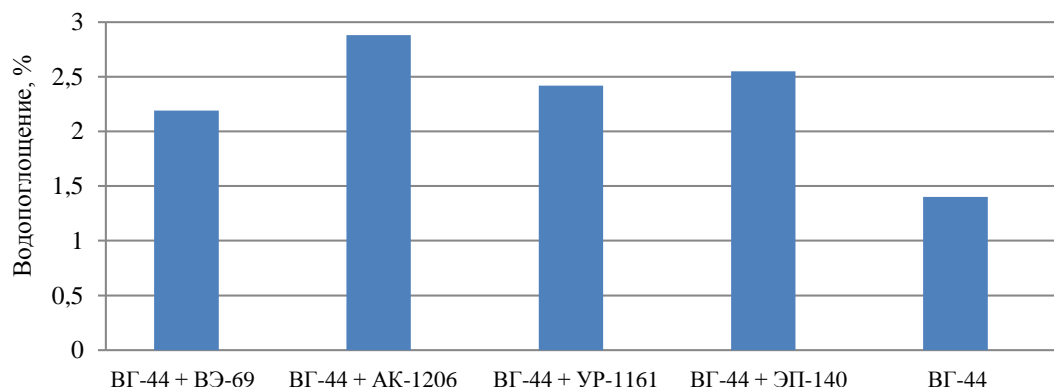


Рис. 1. Водопоглощение грунтовки ВГ-44 и систем покрытий после экспозиции в дистиллированной воде в течение 30 сут при температуре 20 °С

Из полученных результатов следует, что наиболее высокие значения водостойкости исследуемых систем ЛКП получены с применением фторполиуретановой эмали ВЭ-69 (2,19 %), что свидетельствует о ее достаточно высокой водостойкости. Наименьшие значения водостойкости получены с применением эмали АК-1206.

Исследованы адгезия и прочность при ударе систем ЛКП на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с эмалями ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 после искусственного старения по методике ЛИ-14 (при  $-60 \div +80$  °С) в течение 16 циклов, а также после термостарения при температуре 80 °С в течение 1000 ч, а также при температуре 100 °С в течение 500 ч (табл. 4).

Из результатов, представленных в табл. 4, следует, что адгезия всех исследуемых систем покрытий после термоциклирования, а также после термостарения сохранилась на исходном уровне и составляет 1 балл. Прочность при ударе системы покрытий ВГ-44 + УР-1161 снизилась до 4 Дж, что составляет 25 % от исходного значения. Прочность при ударе остальных систем покрытий после термоциклирования и термостарения сохранилась на исходном уровне.

**Адгезия и прочность при ударе систем покрытий после термоциклирования и термостарения**

Показатель	Значения показателя после испытаний для системы покрытий			
	ВГ-44 + ВЭ-69	ВГ-44 + УР-1161	ВГ-44 + АК-1206	ВГ-44 + ЭП-140
После термоциклирования по циклу ЛИ-14 (при $-60 \div +80$ °С) в течение 16 циклов				
Адгезия к сплаву Д16-АТ (Ан.Окс.нхр), балл:				
– в исходном состоянии	1	1	1	1
– после 10 сут увлажнения	1	1	1	1
Прочность при ударе, Дж	5	4	5	5
После термостарения при температуре 80 °С в течение 1000 ч				
Адгезия к сплаву Д16-АТ (Ан.Окс.нхр), балл:				
– в исходном состоянии	1	1	1	1
– после 10 сут увлажнения	1	1	1	1
Прочность при ударе, Дж	5	4	5	5
После термостарения при температуре 100 °С в течение 500 ч				
Адгезия к сплаву Д16-АТ (Ан.Окс.нхр), балл:				
– в исходном состоянии	1	1	1	1
– после 10 сут увлажнения	1	1	1	1
Прочность при ударе, Дж	5	4	5	5

На рис. 2 приведены результаты определения прочности при растяжении систем ЛКП в исходном состоянии и после искусственного старения.

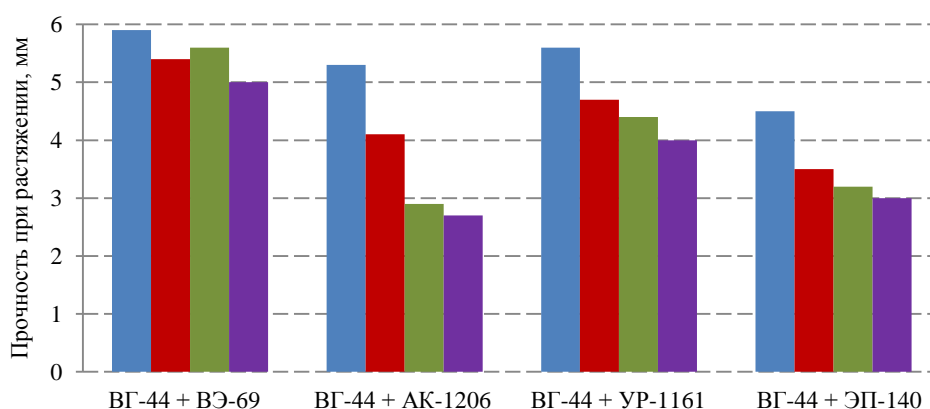


Рис. 2. Прочность при растяжении систем лакокрасочных покрытий в исходном состоянии (■), после термоциклирования по циклу ЛИ-14 (при  $-60 \div +80$  °С) в течение 16 циклов (■) и термостарения после нагрева при 80 °С в течение 1000 ч (■) и при 100 °С в течение 500 ч (■)

Видно, что в зависимости от условий, температуры и длительности испытаний изменяется и прочность при растяжении. В табл. 5 приведены результаты, полученные при определении снижения прочности при растяжении систем покрытий после искусственного старения.

Следует отметить, что наиболее интенсивное снижение прочности при растяжении (~49 %) наблюдается на образцах, окрашенных системой ЛКП: ВГ-44 + УР-1161.

Снижение прочности систем ЛКП при старении обусловлено изменением структуры полимерного пленкообразующего, которое связано с длительным воздействием температуры на полимерную пленку в присутствии кислорода воздуха.

При непрерывном воздействии температуры могут протекать необратимые процессы термоокислительной деструкции, которые приводят к необратимым изменениям структуры и, соответственно, к изменению свойств полимерного покрытия. Из полученных результатов также видно, что наиболее устойчивой является система покрытий ВГ-44 + ВЭ-69. Снижение прочности при растяжении для этой системы покрытий не превышает 24 %.

Таблица 5

**Снижение прочности при растяжении систем покрытий после искусственного старения**

Система покрытий	Снижение прочности при растяжении, %, после воздействия		
	ЛИ-14 (-60÷+80 °С)	80 °С в течение 1000 ч	100 °С в течение 500 ч
ВГ-44 + ВЭ-69	16,9	13,5	24,0
ВГ-44 + УР-1161	22,6	42,8	49,0
ВГ-44 + АК-1206	16,1	19,6	28,5
ВГ-44 + ЭП-140	22,1	23,2	33,0

Исследованы декоративные свойства покрытий после искусственного старения по методике ЛИ-14 при -60÷+80 °С в течение 16 циклов, а также после термостарения при температурах 80 °С в течение 1000 ч и 100 °С в течение 500 ч.

На рис. 3 представлены результаты определения блеска систем ЛКП после искусственного старения, а также изменение блеска этих систем ЛКП относительно исходных значений.

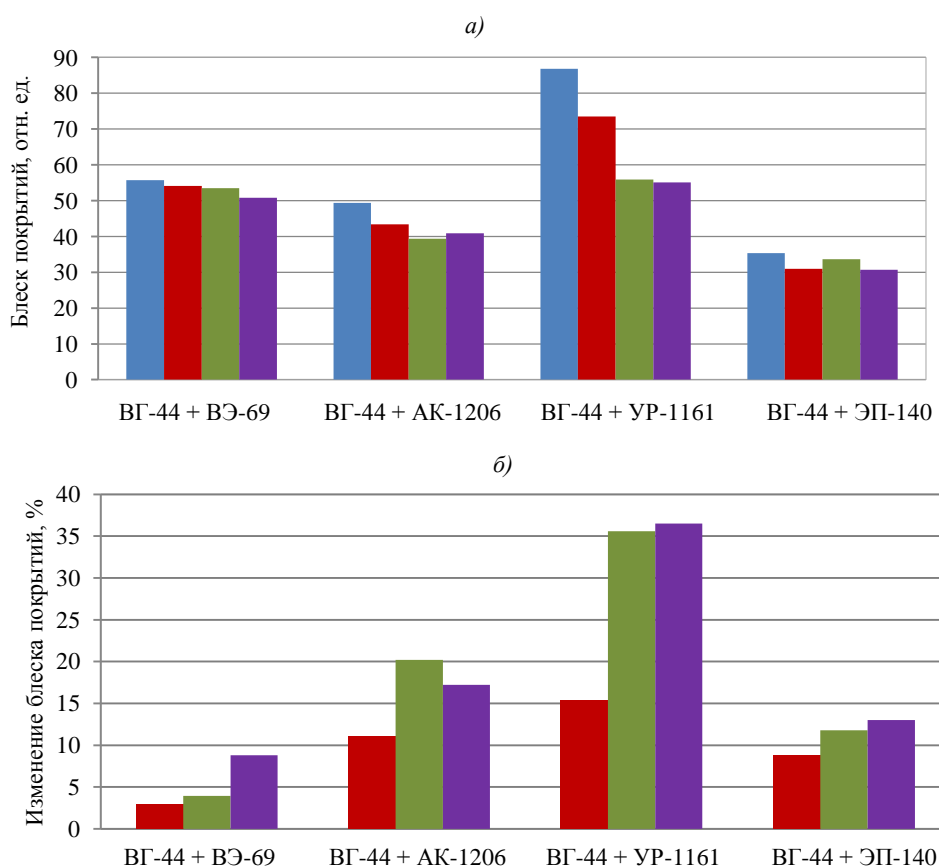


Рис. 3. Результаты определения блеска (а) и его изменения (б) систем лакокрасочных покрытий в исходном состоянии (■) и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при -60÷+80 °С в течение 16 циклов (■), термостарения после нагрева при 80 °С в течение 1000 ч (■) и при 100 °С в течение 500 ч (■)

Видно, что искусственное старение исследуемых систем покрытий по методике ЛИ-14 при  $-60\div+80$  °С в течение 16 циклов, а также после термостарения при температурах 80 °С в течение 1000 ч и 100 °С в течение 500 ч приводит к изменению блеска всех систем покрытий. Наиболее интенсивно происходит снижение блеска (до 36,5 %) на образцах, окрашенных лакокрасочной системой ВГ-44 + УР-1161, при температуре 100 °С в течение 500 ч. Следует отметить, что наименьшее значение (8,79 %) потери блеска при искусственном старении получено для системы покрытий ВГ-44 + ВЭ-69 после термического старения при температуре 100 °С в течение 500 ч.

В табл. 6 приведены результаты определения цветовых характеристик исследуемых систем ЛКП после искусственного старения.

*Таблица 6*

**Изменение цветовых характеристик ( $\Delta E$ ) систем покрытий после искусственного старения**

Система покрытий	Изменение $\Delta E$ , %, после воздействия		
	ЛИ-14 ( $60\div+80$ °С)	80 °С в течение 1000 ч	100 °С в течение 500 ч
ВГ-44 + ВЭ-69	0,13	0,44	0,63
ВГ-44 + УР-1161	0,23	0,32	0,35
ВГ-44 + АК-1206	0,31	0,75	0,94
ВГ-44 + ЭП-140	0,38	0,45	0,81

Полученные результаты свидетельствуют о том, что искусственное старение систем покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с применением эпоксидных, полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей по методике ЛИ-14 при  $-60\div+80$  °С в течение 16 циклов, а также после термостарения при температурах 80 °С в течение 1000 ч и 100 °С в течение 500 ч не приводит к изменению цвета покрытий. Для всех исследуемых систем ЛКП цветовое различие  $<1$ , что свидетельствует об отсутствии видимых изменений цветовых характеристик ЛКП в соответствии с ГОСТ 9.407–2015.

### **Заключения**

Исследованы адгезия и физико-механические свойства систем ЛКП на основе бесхроматной быстросохнущей грунтовки ВГ-44 с эмалями ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 в сравнении с аналогичными системами ЛКП на основе серийной хроматной грунтовки ЭП-0215. Показано, что системы покрытий на основе бесхроматной быстросохнущей защитной грунтовки ВГ-44 по адгезии и физико-механическим свойствам практически не отличаются от систем покрытий на основе хроматной грунтовки ЭП-0215.

Определено водопоглощение систем ЛКП на основе грунтовки ВГ-44 с применением эмалей ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 в сравнении с грунтовкой ВГ-44 (без покрытия) после 30 сут испытаний в дистиллированной воде. Установлено, что наиболее высокие значения водостойкости исследуемых систем ЛКП (водопоглощение 2,19 %) получены с применением фторполиуретановой эмали ВЭ-69.

Исследованы адгезия и прочность при ударе систем ЛКП на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с эмалями ВЭ-69, АК-1206, УР-1161 и ЭП-140 после искусственного старения по методике ЛИ-14 при  $-60\div+80$  °С в течение 16 циклов, а также после термостарения при температурах 80 °С в течение 1000 ч и 100 °С в течение 500 ч. Показано, что адгезия всех исследуемых систем покрытий после термоциклирования, а также после термостарения сохранилась на исходном уровне:

1 балл. Прочность при ударе систем покрытий, за исключением системы ВГ-44 + УР-1161, также сохранилась на исходном уровне: 5 Дж.

Искусственное старение приводит к снижению прочности систем покрытий при растяжении. Для всех исследуемых систем ЛКП наиболее существенное снижение прочности при растяжении происходит после термического старения при температуре 100 °С в течение 500 ч, что обусловлено изменением структуры полимерного пленкообразующего.

Исследованы декоративные свойства покрытий после искусственного старения в аналогичных условиях. Установлено, что искусственное старение систем покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с применением эпоксидных, полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей после искусственного старения приводит к изменению блеска всех исследуемых систем покрытий. Наиболее интенсивно происходит снижение блеска на образцах, окрашенных системой ВГ-44 + УР-1161, при температуре 100 °С в течение 500 ч, наименьшие значения (8,79 %) потери блеска при искусственном старении получены на образцах, окрашенных системой покрытий ВГ-44 + ВЭ-69.

Определены цветовые характеристики исследуемых систем ЛКП после искусственного старения. Показано, что искусственное старение систем покрытий на основе бесхроматной грунтовки ВГ-44 с применением эпоксидных, полиуретановых, акрилуретановых и фторполиуретановых эмалей не приводит к изменению цвета покрытий – для всех исследуемых систем ЛКП цветовое различие <1, что свидетельствует об отсутствии видимых изменений цветовых характеристик ЛКП.

#### **Список источников**

1. Житомирский Г.И. Конструкция самолетов. М.: Машиностроение, 1991. 400 с.
2. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС – ВИАМ, 2002. С. 23–47.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
5. 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: 17.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
6. 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.
7. Фомина М.А., Каримова С.А. Анализ коррозионного состояния материалов планера самолетов типа «Су» после длительных сроков эксплуатации // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 9. С. 20–24.
8. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
9. Козлова А.А., Кондрашов Э.К. Системы лакокрасочных покрытий для противокоррозионной защиты магниевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2. С. 44–47. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-44-47.
10. Птицын А.С. Толщина лакокрасочного покрытия как один из факторов его качества и долговечности // Аллея науки. 2018. Т. 5. № 10. С. 896–901.
11. Попов А.А., Рапопорт Н.Я., Заиков Г.Е. Окисление ориентированных и напряженных полимеров. М.: Химия, 1987. 232 с.

12. 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.
13. 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). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
14. Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Загора А.Г., Куршев Е.В. Исследование параметров отверждения и защитной способности системы покрытия типа «база/лак» для окраски внешней поверхности авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-93-104.
15. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
16. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
17. 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). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.09.2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-71-79.
18. Протасов В.Н. Прогнозирование длительности сохранения прочности полимерных покрытий в эксплуатационных средах // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1989. № 2. С. 77–80.
19. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 446 с.
20. Ламбурн Р., Машляковский Л.Н., Фрост А.М. Лакокрасочные материалы и покрытия. Теория и практика. СПб.: Химия, 1991. 512 с.
21. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Кодаченко Е.Н., Железняк В.Г. Исследование влияния химической природы грунтовочного слоя на свойства системы покрытий на основе фторполиуретановой эмали // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
22. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Новикова Т.А. Исследование свойств системы лакокрасочного покрытия на основе фторполиуретановой эмали и грунтовки с пониженным содержанием токсичных пигментов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 5 (77). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-68-75.
23. Скороходова О.Н., Казакова Е.Е. Новые разработки в области защитных ЛКМ // *Лакокрасочная промышленность*. 2017. № 5. С. 14.
24. Дринберг А.С., Ицко Э.Ф., Калинин Т.В. Антикоррозионные грунтовки. СПб.: НИПРОИНС ЛКМ и ПСОП, 2006. 168 с.
25. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И. Антикоррозионные грунтовки и ингибированные лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1980. 200 с.
26. Антикоррозионный пигмент: пат. 2330054 Рос. Федерация; заявл. 04.05.07; опубл. 27.07.08.
27. Ашуйко В.А., Иванова Н.П., Сальчиц О.И. Свойства антикоррозионных фосфатсодержащих пигментов для лакокрасочных покрытий металлов // *Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. X Междунар. конф. Гродно*, 2013. С. 117–118.

28. Эмирова И.В., Алексеев А.А. Новые антикоррозионные пигменты // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. С. 113–114.
29. Чеботарева Е.Г., Огрель Л.Ю. Современные тенденции модификации эпоксидных олигомеров // Фундаментальные исследования. 2008. № 4. С. 102–104.
30. Кириллов А.Н., Софьина С.Ю., Гарипов Р.М., Дебердеев Р.Я. Модификация эпоксиаминных композиций эпоксиуретановыми олигомерами // Лакокрасочные материалы и их применение. 2003. № 4. С. 25–28.
31. Кириллов А.Н., Гарипов Р.М., Дебердеев Р.Я. Влияние эпоксиуретановых модификаторов на свойства эпоксидных лаковых покрытий // Сб. тр. IX Всерос. конф. «Структура и динамика молекулярных систем». Яльчик, 2002. С. 236–239.
32. Паршина М.С., Солдатов М.А., Макарова В.А., Серенко О.А., Музафаров А.М. Влияние химической структуры фторорганических сополимерных модификаторов на влагостойкость эпоксидной смолы аминного отверждения // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 3. С. 15–19.
33. Проблемы защитных ЛКМ: Обзор материалов европейской конференции «Защитные покрытия» («Protective coating»). Дюссельдорф (Германия) // Лакокрасочные материалы и их применение. 2013. № 9. С. 33–35.
34. 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). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-59-67.
35. 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. Zhitomirsky G.I. *Aircraft design*. Moscow: Mashinostroyenie, 1991, 400 p.
2. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace technology of the 21st century. *Perspektivnyye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
3. Kablov E.N. Aviation materials science in the 21st century. Prospects and objectives. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
4. Kablov E.N. New generation materials are the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
5. Zheleznyak V.G. Modern paint and varnish materials for use in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. (accessed: August 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
6. Kondrashov E.K., Kuznetsova V.A., Semenova L.V., Lebedeva T.A. Main directions for improving the operational, technological and environmental characteristics of paint and varnish coatings for aircraft. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 96–102.
7. Fomina M.A., Karimova S.A. Analysis of the corrosion state of airframe materials of Su type aircraft after long periods of operation. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2014, no. 9, pp. 20–24.
8. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
9. Kozlova A.A., Kondrashov E.K. Systems of paint coatings for anticorrosive protection of magnesium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 44–47. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-44-47.
10. Ptitsyn A.S. The thickness of the paint coating as one of the factors of its quality and durability. *Alleya nauki*, 2018, vol. 5, no. 10, pp. 896–901.
11. Popov A.A., Rapoport N.Ya., Zaikov G.E. *Oxidation of oriented and strained polymers*. Moscow: Khimiya, 1987, 232 p.

12. 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.
13. 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), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 24, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
14. Serdtselyubova A.S., Merkulova Yu.I., Zagora A.G., Kurshev E.V. Research of film-forming parameters and protective properties of basecoat/clearcoat system. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-93-104.
15. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
16. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
17. 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), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
18. Protasov V.N. Prediction of the duration of preservation of the strength of polymer coatings in operating environments. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 1989, no. 2, pp. 77–80.
19. Grassi N., Scott J. *Destruction and stabilization of polymers*: trans. from Engl. Moscow: Mir, 1988, 446 p.
20. Lambourn R., Mashlyakovskiy L.N., Frost A.M. *Paints and varnishes and coatings. Theory and practice*. St. Petersburg: Khimiya, 1991, 512 p.
21. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Kodachenko E.N., Zheleznyak V.G. Study of the influence of the primer layer's chemical nature on the properties of the coating system based on fluoropolyurethane enamel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 17, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
22. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Novikova T.A. Investigation of properties of coating system based on fluorine polyurethane enamel and primer with low toxic pigment content. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. (accessed: August 06, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-68-75.
23. Skorokhodova O.N., Kazakova E.E. New developments in the field of protective coatings. *Lakokrasochnaya promyshlennost*, 2017, no. 5, p. 14.
24. Drinberg A.S., Itsko E.F., Kalinskaya T.V. *Anti-corrosion primers*. St. Petersburg: NIPROINS LKM i PSOP, 2006, 168 p.
25. Rosenfeld I.L., Rubinshtein F.I. *Anti-corrosion primers and inhibited paint and varnish coatings*. Moscow: Khimiya, 1980, 200 p.
26. *Anti-corrosion pigment*: pat. 2330054 Rus. Federation; appl. 04.05.07; publ. 27.07.08.
27. Ashuiko V.A., Ivanova N.P., Salychits O.I. Properties of anti-corrosion phosphate-containing pigments for paint and varnish coatings of metals. *Energy- and material-saving environmentally friendly technologies*: abstracts of the Xth Int. Conf. Grodno, 2013, pp. 117–118.
28. Emirova I.V., Alekseev A.A. New anti-corrosion pigments. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, pp. 113–114.

29. Chebotareva E.G., Ogrel L.Yu. Current trends in the modification of epoxy oligomers. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2008, no. 4, pp. 102–104.
30. Kirillov A.N., Sofina S.Yu., Garipov R.M., Deberdeev R.Ya. Modification of epoxyamine compositions with epoxyurethane oligomers. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 2003, no. 4, pp. 25–28.
31. Kirillov A.N., Garipov R.M., Deberdeev R.Ya. The influence of epoxyurethane modifiers on the properties of epoxy varnish coatings. *Articles IX All-Rus. conf. "Structure and dynamics of molecular systems"*. Yalchik, 2002, pp. 236–239.
32. Parshina M.S., Soldatov M.A., Makarova V.A., Serenko O.A., Muzafarov A.M. The influence of the chemical structure of organofluorine copolymer modifiers on the moisture resistance of amine-curing epoxy resin. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 2018, no. 3, pp. 15–19.
33. Problems of protective coatings: Review of materials of the European conference "Protective coating". Dusseldorf (Germany). *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 2013, no. 9, pp. 33–35.
34. 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), paper no. 07. (accessed: August 13, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-59-67.
35. 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». *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

**Информация об авторах**

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

**Емельянов Виктор Владимирович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Марченко Сергей Андреевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Коврижкина Наталья Анатольевна**, инженер, 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

**Viktor V. Yemelyanov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Sergey A. Marchenko**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Natalia A. Kovrizhkina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.09.2023.  
The article was submitted 25.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 25.09.2023.