

№9
(151)
2025

ISSN 2307-6046



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



ТРУДЫ ВИАМ



ТРУДЫ ВИАМ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2013 ГОДА

№ 9 (151) сентябрь 2025

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

Каблов Е.Н. академик РАН, профессор (НИЦ «Курчатовский институт»)

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

Антипов В.В. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»)

Члены совета:

Демонис И.М.	канд. техн. наук
Кокорин В.Н.	докт. техн. наук, профессор (Ульяновский государственный технический университет)
Кондрашов С.В.	докт. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Лаптев А.Б.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Леонтьев Л.И.	академик РАН, профессор (РАН)
Ночовная Н.А.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Пенязьков О.Г.	академик НАН Беларуси, профессор (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Беларусь)
Райтер Г.	докт. наук (ALD Vacuum Technologies GmbH, Германия)
Старцев В.О.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Стороженко П.А.	академик РАН, профессор (АО «ГНИИХТЭОС»)
Тимофеев А.Н.	докт. техн. наук (ОАО «Композит»)
Аграфенина Е.А.	ответственный секретарь (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Издатель: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакция:

редакторы – Е.А. Аграфенина, Н.В. Ананьева;
корректор – И.С. Туманова; верстка – М.С. Закржевская

Адрес редакции:

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Тел.: +7 (499) 263-89-50, +7 (499) 263-87-37; факс: +7 (499) 267-86-09;
e-mail: admin@viam.ru; сайт: <http://viam-works.ru>

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-82678 от 27.01.2022

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ),
реферативно-информационную базу данных RSCI (Russian Science Index на платформе Web of Science)
Журнал входит в Международную ассоциацию издателей (PILA – Publishers International Linking Association).
Всем статьям, публикуемым в журнале, присваиваются индексы DOI (Digital Object Identifier).

В сведениях об авторах указываются данные, актуальные на момент предоставления рукописи в редакцию.

ТРУДЫ ВИАМ

TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

СОДЕРЖАНИЕ

Жаропрочные сплавы и стали

Мин П.Г., Вадеев В.Е., Санкин Р.В., Чемов Д.А. 3
Влияние переменного содержания серы на жаростойкость литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200

Легкие сплавы

Кашапов О.С., Макушина М.А., Калашников В.С., Лаврова О.Ю. 19
Сравнительный анализ свойств жаропрочного титанового сплава ВТ46 в литом и деформированном состоянии

Композиционные материалы

Начаркина А.В., Зеленина И.В., Смирнов А.В., Бойчук А.С. 35
Влияние метода формования на структуру и свойства углепластика на основе бисмалеинимидного связующего

Гусев Ю.А., Усачева М.Н., Парахин И.В., Коваленко А.В., Васюков А.Н. 50
Применение композиционных материалов и полимерного заполнителя в конструкции лопасти вертолета

Защитные и функциональные покрытия

Закирова Л.И., Сибилева С.В., Вдовин А.И., Кольцова М.А. 63
Выбор гальванического покрытия коррозионностойких сталей с целью защиты от коррозии при контакте с алюминиевыми сплавами

Будиновский С.А., Бенклян А.С., Мовенко Д.А., Татарников С.В. 77
Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с высокой стойкостью к сульфидно-оксидной коррозии

CONTENTS

Heat-resistant alloys and steels

Min P.G., Vadeev V.E., Sankin R.V., Chernov D.A. 3
The influence of variable sulfur content on the high-temperature resistance of cast heat-resistant nickel alloy VZhM200

Light-metal alloys

Kashapov O.S., Makushina M.A., Kalashnikov V.S., Lavrova O.Yu. 19
Comparative analysis of mechanical properties of heat-resistant titanium alloy VT46 in cast and forged conditions

Composite materials

Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Smirnov A.V., Boychuk A.S. 35
Influence of the molding method on the structure and properties of carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binder

Gusev Yu.A., Usacheva M.N., Parakhin I.V., Kovalenko A.V., Vasyukov A.N. 50
Application of composite materials and polymer filler in a helicopter blade design

Protective and functional coatings

Zakirova L.I., Sibileva S.V., Vdovin A.I., Koltsova M.A. 63
Selection of electrodeposited coating on corrosion-resistant steels for corrosion protection in contact with aluminium alloys

Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Movenko D.A., Tatarnikov S.V. 77
Ion-plasma heat-resistant coatings with high resistance to sulfide-oxide corrosion

-
- | | | |
|---|-----|--|
| Кузнецова В.А., Тимошина Е.А., Шаповалов Г.Г., Куршев Е.В. Влияние модификации пленкообразующего на свойства износостойкого матового покрытия, используемого для защиты элементов кабины и панелей приборов авиационной техники | 90 | Kuznetsova V.A., Timoshina E.A., Shapovalov G.G., Kurshev E.V. Influence of amodified film-forming agent on the properties of anti-wear matte coating used to protect cabin and dashboard components in aircraft |
| Козлова А.А., Шунина М.А., Козлов И.А. Эмаль на водной основе для окраски элементов интерьера воздушного судна | 102 | Kozlova A.A., Shunina M.A., Kozlov I.A. Water-based enamel for coating aircraft interior elements |
| Кречетов Д.Д., Козлова А.А., Железняк В.Г. Электропроводные лакокрасочные материалы и покрытия авиационного назначения | 111 | Krechetov D.D., Kozlova A.A., Zheleznyak V.G. Electrically conductive paints and coatings for aviation purposes |
| Измалков Д.А., Ахмадиева К.Р., Боков В.В., Кожухаров М.С. Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий | 122 | Izmalkov 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 |
| Марченко С.А., Скирко П.В., Кузнецова В.А. Исследование свойств систем покрытий на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения с применением фторопластовой, фторкаучуковой и полиуретановой эмалей после воздействия различных факторов эксплуатации | 135 | Marchenko S.A., Skivko P.V., Kuznetsova V.A. Properties of coating systems with a universal cold-curing putty with fluoroplastic, fluororubber and polyurethane enamels after exposure to various performance factors |
| Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 5. Влияние продолжительности эрозионного воздействия | 149 | Startsev V.O. Climatic aging of paint coating systems. Part 5. Influence of duration of erosion effect |
-

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-3-18

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ ЛИТЕЙНОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖМ200

П.Г. Мин¹, В.Е. Вадеев¹, Р.В. Санкин¹, Д.А. Чемов¹

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

Аннотация. Исследовано влияние примеси серы на жаростойкость при температуре 1000 °С в течение 500 ч литейного жаропрочного гафнийсодержащего никелевого сплава ВЖМ200. Установлено, что при повышенном содержании серы жаростойкость сплава снижается, а с увеличением ее содержания с 0,0038 до 0,0130 % (по массе) наблюдается замедление процесса высокотемпературного окисления. Это обусловлено тем, что сера концентрируется в составе карбидов на основе гафния, тем самым снижается ее диффузия из объема на поверхность материала, что предотвращает разрушение образующейся оксидной пленки.

Ключевые слова: сопротивление газовой коррозии, суперсплав, поверхностное окисление, рабочие лопатки, структура, сера, примесь

Для цитирования: Мин П.Г., Вадеев В.Е., Санкин Р.В., Чемов Д.А. Влияние переменного содержания серы на жаростойкость литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-3-18.

Scientific article

THE INFLUENCE OF VARIABLE SULFUR CONTENT ON THE HIGH-TEMPERATURE RESISTANCE OF CAST HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY VZhM200

P.G. Min¹, V.E. Vadeev¹, R.V. Sankin¹, D.A. Chemov¹

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 paper studies the influence of sulfur impurity on the high-temperature resistance at $T = 1000$ °C for 500 hours of cast heat-resistant hafnium-containing nickel alloy VZhM200. It has been found that with the increase of the sulfur content, the high temperature resistance of the alloy decreases, and with the increase of its content from 0,0038 to 0,0130 wt. %, a slowdown in the high-temperature oxidation process is observed. This is due to the fact that sulfur is concentrated in the composition of hafnium-containing carbides, thereby reducing its diffusion from the volume to the surface of the material, which prevents the destruction of the forming oxide layer.

Keywords: gas corrosion resistance, superalloy, surface oxidation, blades, structure, sulfur, impurity

For citation: Min P.G., Vadeev V.E., Sankin R.V., Chemov D.A. The influence of variable sulfur content on the high-temperature resistance of cast heat-resistant nickel alloy VZhM200. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-3-18.

Введение

Жаростойкость (сопротивление газовой коррозии) является одной из важнейших эксплуатационных характеристик жаропрочных никелевых сплавов, применяемых для изготовления деталей горячего тракта газотурбинных двигателей. Материал рабочих лопаток современных газотурбинных двигателей эксплуатируется при температурах 1100–1150 °С, а температура газа на входе в турбину достигает 1800–1850 К [1]. В таких условиях способность материала противостоять воздействию внешней окислительной среды в значительной мере определяет надежность и ресурс изделий, поскольку утонение стенки лопатки за счет поверхностного окисления приводит к снижению ее несущей способности и, как следствие, ее преждевременному разрушению во время эксплуатации двигателя.

Защитные покрытия, наносимые на поверхность турбинных лопаток, предназначены для исключения прямого взаимодействия материала лопатки с агрессивной внешней средой. Это позволяет защитить поверхность детали от диффузионного насыщения вредными элементами, обеспечивая высокие эксплуатационные свойства материала [2–5]. Однако при повреждении покрытия основной материал лопатки турбины вступает в контакт с горячим газом, поэтому обеспечение высокого сопротивления сплава высокотемпературному окислению является непременным условием надежности эксплуатируемых лопаток в составе изделия.

Жаростойкость в первую очередь определяется системой легирования сплава, при разработке которой также учитывают требования к его структурной стабильности, жаропрочности и иным механическим характеристикам. Поэтому возможности повышения жаростойкости сплава путем увеличения содержания положительно влияющих на данную характеристику элементов (алюминия, хрома, иттрия, лантана, церия [6–12]) ограничены.

В ряде зарубежных работ отмечается отрицательное влияние примесей, в частности серы, даже при содержании на уровне нескольких ppm (1 ppm = 0,0001 % (по массе)), на стойкость защитных покрытий к высокотемпературному окислению и сульфидной коррозии [13–23]. В некоторых отечественных публикациях [24, 25] приведены результаты исследований по влиянию серы на жаростойкость отечественных жаропрочных никелевых сплавов как без покрытия, так и с покрытием. Установлено, что при повышении содержания в сплаве серы >1 ppm ухудшается адгезия защитного покрытия к основному металлу за счет диффузии серы в покрытие [24]. При отсутствии покрытия сера диффундирует на поверхность образца и разрушает защитную оксидную пленку, образуемую из основного материала [24, 25].

Сера, являясь одной из наиболее вредных примесей в литейных жаропрочных никелевых сплавах, имеет низкую растворимость в никеле и образует на границах зерен и межфазных границах легкоплавкую эвтектику с никелем с температурой плавления ~650 °С. Неметаллические включения в виде сульфидов с компонентами сплавов являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации деталей, и ухудшают механические характеристики сплавов, такие как длительная прочность, пластичность и сопротивление усталости [26–28].

В связи с этим важное значение имеет изучение влияния серы на жаростойкость новых материалов, которые значительно отличаются химическим составом от разработанных ранее сплавов. Например, сплав ВЖМ200 [29], разработанный для импортозамещения сплава DS200 Hf [30–32] и внедренный в конструкцию газотурбинного двигателя ПД-8 [33–41], превосходит по содержанию гафния (до 2 % (по массе)) остальные отечественные литейные жаропрочные никелевые сплавы. В научно-технических литературных источниках отсутствуют сведения о влиянии серы на жаростойкость сплавов со схожей системой легирования и об образующихся соединениях с серой.

Цель данной работы – исследование влияния переменного содержания серы на стойкость литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 к высокотемпературной газовой коррозии.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран жаропрочный никелевый сплав ВЖМ200 (табл. 1) [42], применяемый для литья рабочих лопаток с направленной структурой турбины низкого давления перспективного газотурбинного двигателя ПД-8.

Таблица 1

**Содержание легирующих элементов и микродобавок
в литейном жаропрочном никелевом сплаве ВЖМ200 [18]**

Содержание элементов, % (по массе)													
Ni	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Nb	Hf	B	Zr	La	Ce	Ca
Основа	0,08–0,14	8,0–10,0	9,0–11,0	11,5–12,5	4,75–5,25	1,75–2,25	0,75–1,25	1,5–2,0	0,01–0,02	≤0,05	≤0,05	≤0,05	≤0,005

Выплавку сплава проводили по стандартной технологии в промышленной вакуумной индукционной печи с тиглем емкостью 350 кг. Разливку металла осуществляли в стальные трубы Ø90 мм. Полученные литые прутковые заготовки после механической обработки переплавляли на установке направленной кристаллизации УВНК-9 [43–47] с заливкой в керамические блоки, в которые установлены поликристаллические затравки с кристаллографической ориентацией каждого зерна в направлении, близком к $\langle 001 \rangle$ (работы по литью заготовок сплава ВЖМ200 выполнены Е.М. Висик). Для получения переменного содержания серы при литье в тигель вводили различное ее количество в виде лигатуры FeS. Содержание серы определяли инфракрасным методом с применением усовершенствованной методики, изложенной в работе [48] (газовый анализ серы выполнен Т.Н. Пахомкиной). Содержание серы в испытанных образцах и образовавшейся окалине также контролировали инфракрасным методом с использованием газоанализатора. Расчетное и фактическое содержание серы в каждой плавке приведено в табл. 2.

Таблица 2

Содержание серы в литейном жаропрочном никелевом сплаве ВЖМ200

Значение	Содержание серы, % (по массе), в плавке			
	1	2	3	4
Расчетное	–	0,005	0,01	0,02
Фактическое	0,0002	0,0038	0,0067	0,0130

Для испытаний на жаростойкость изготовили 12 образцов (диаметром 10 мм, длиной 20 мм) – по три образца от каждой из четырех плавов. Перед проведением испытаний цилиндрические образцы в литом состоянии измеряли микрометром и рассчитывали площадь поверхности образца. Далее их обезжировали в этиловом спирте и взвешивали на аналитических весах с точностью $\pm 0,0001$ г, после чего помещали в керамические тигли на основе оксида алюминия. Жаростойкость определяли по методу увеличения массы образцов в соответствии с ГОСТ 6130–71 «Методы определения жаростойкости»: после выдержки образцов в печи (в атмосфере воздуха) в течение заданного времени при постоянной температуре.

Исследования структуры, локального элементного состава микроструктуры сплава в литом и термически обработанном состояниях и поверхности образцов после испытаний проводили электронно-зондовым микроанализом, который выполнен Е.Б. Чабиной на растровом электронном микроскопе, оснащенный энергодисперсионным спектрометром (контраст изображения структуры в отраженных электронах определялся средним атомным номером фазы: чем больше атомный номер, тем светлее исследуемый участок).

Количественный фазовый состав окалина с образцов после испытаний определяли с помощью рентгеноструктурного анализа, выполненного П.Н. Медведевым на

рентгеновском дифрактометре в монохроматическом $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано, в диапазоне углов $2\theta = 15\div 80$ градусов с шагом $\Delta 2\theta = 0,016$ градуса и выдержкой 40 с. Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы. Количественный фазовый анализ выполнен полнопрофильным методом Ритвельда.

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

Результаты и обсуждение

Исследования жаростойкости проводили при температуре 1000 °С, общее время испытаний составило 500 ч. Измерение массы образцов с тиглями проводили после очередного цикла: каждые 20 ч до момента достижения общего времени испытаний 100 ч и затем каждые 100 ч до завершения испытаний. Средние значения (по каждой плавке) изменения массы образцов до и после испытаний, а также величина массы образовавшейся окалины приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Массы (M) образцов и образовавшейся окалины
после испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С**

Плавка	[S] в исходном металле, % (по массе)	$M_{\text{обр}}$ начальная, г	$M_{\text{обр}}$ конечная, г	$\Delta M_{\text{обр}}$, г	$M_{\text{окалины}}$, г
1	0,0002	13,3842	13,4022	0,0180	0,0021
2	0,0038	13,3055	11,0213	-2,2841	3,0884
3	0,0067	13,3687	12,3258	-1,0429	1,3777
4	0,0130	13,3501	13,3482	-0,0019	0,0355

Для анализа влияния переменного содержания серы на жаростойкость сплава ВЖМ200 на основании полученных результатов рассчитано среднее значение жаростойкости после каждого цикла испытаний. Критерием ее оценки является удельное изменение массы образцов в процессе испытаний по сравнению с начальной, отнесенное к исходной площади образца (г/м^2). По обработанным данным построена зависимость удельного изменения массы образцов сплава ВЖМ200 с различным содержанием серы от продолжительности испытаний. Результаты испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С представлены на рис. 1.

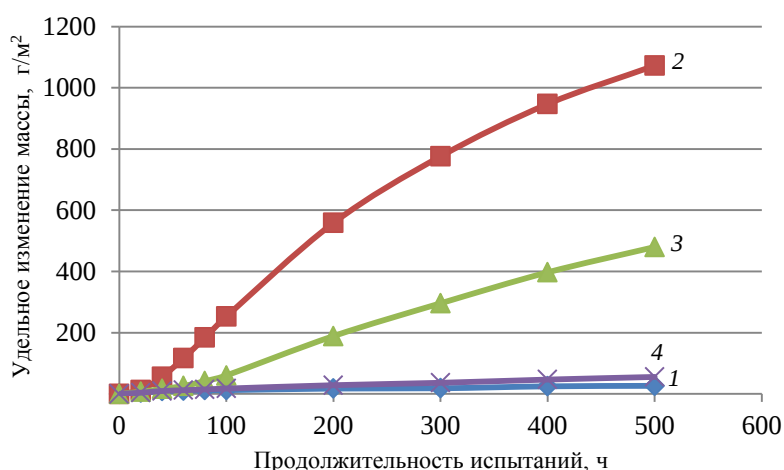


Рис. 1. Зависимости удельного изменения массы образцов из сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы от продолжительности испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1000 °С, % (по массе): 0,0002 (1); 0,0038 (2); 0,0067 (3) и 0,0130 (4)

Видно, что удельное изменение массы всех образцов увеличивается в течение всех циклов испытаний. В сплаве (плавка 1) с наименьшим содержанием серы (0,0002 % (по массе)) получены минимальные значения удельного изменения массы относительно исходного состояния, а сплавы с содержанием серы 0,0038 (плавка 2), 0,0067 (плавка 3) и 0,0130 % (по массе) (плавка 4) подтверждают отрицательное влияние данной примеси на стойкость материала к высокотемпературному окислению. Значения удельного изменения массы образцов плавки 4 с содержанием серы 0,0130 % (по массе) получены значительно меньше, чем в плавках с содержанием серы 0,0038 (2) и 0,0067 % (по массе) (3), при этом наибольшие значения получены в плавке с содержанием серы 0,0038 % (по массе). Таким образом, стойкость сплава ВЖМ200 к высокотемпературному окислению не имеет прямой зависимости от содержания серы.

На основании данных табл. 3 построена гистограмма (рис. 2), описывающая среднее изменение массы образцов каждой плавки и массу образовавшейся окалины по завершении испытаний. От каждой плавки сплава ВЖМ200 с различным содержанием серы отобран один из образцов и сделан его снимок (рис. 3) для анализа внешнего вида образцов после испытаний на жаростойкость.

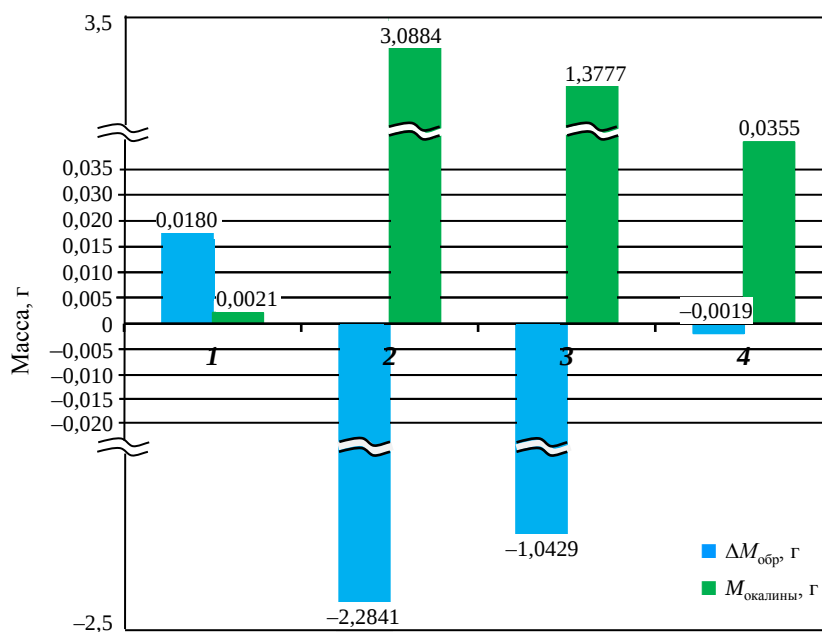


Рис. 2. Гистограмма изменения массы образцов и образования окалины после испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С, % (по массе): 0,0002 (1); 0,0038 (2); 0,0067 (3) и 0,0130 (4)

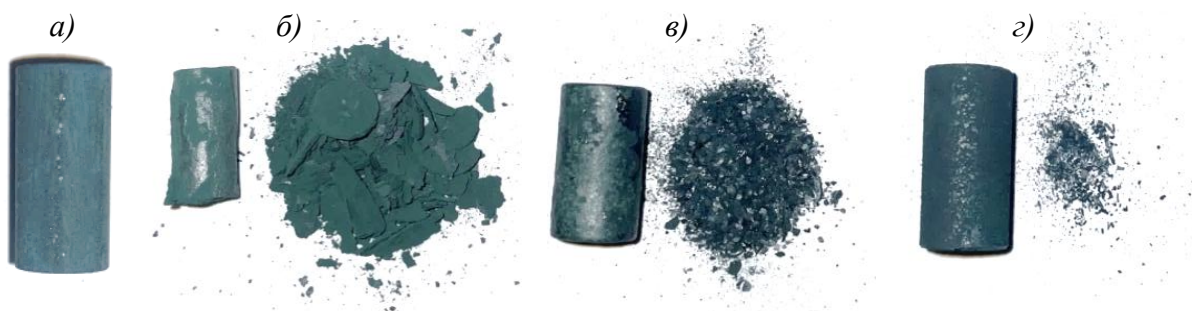


Рис. 3. Внешний вид образцов с переменным содержанием серы после испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С, % (по массе): 0,0002 (1); 0,0038 (2); 0,0067 (3) и 0,0130 (4)

Из данных, представленных на гистограмме (рис. 2), видно, что изменение массы и количество образовавшейся окалины в плавке 1 с содержанием серы 0,0002 % (по массе) не превысило десятых долей (0,0021 и 0,0180 г соответственно). При этом, в отличие от образцов других плавов, наблюдается прирост массы образцов. На снимках (рис. 3) видно, что на поверхности всех испытанных образцов наблюдаются признаки окисления в виде потемнений и образования окалины. Поверхность образца из сплава плавки 1 с содержанием серы 0,0002 % (по массе) подверглась минимальным изменениям, окалина с него практически не осыпалась, что объясняет прирост массы. Образец плавки 4 с наибольшим содержанием серы (0,0130 % (по массе)) также не испытал критических изменений массы, однако с поверхности данного образца образовалось небольшое количество окалины, состоящей из мелкодисперсных частиц (рис. 3, г). Образцы сплава с содержанием серы 0,0038 (плавка 2) и 0,0067 % (по массе) (плавка 3) в ходе испытаний подверглись значительному разрушению оксидной пленки. Это подтверждается изменением массы образцов, значительно превосходящим изменение массы образцов плавки 1 и 4. Наибольшее значение данного параметра (–2,2841 г) наблюдается у образца с содержанием серы 0,0038 % (по массе), что в 2 раза превосходит значение для образца плавки 3 (–1,0429 г), в котором исходное содержание серы (0,0067 % (по массе)) больше в 1,8 раза. По количеству образовавшейся окалины (рис. 3) видно, что на образце из сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0038 % (по массе) процесс окисления происходил активнее, чем на других образцах. Образованная окалина представляет собой в основном крупные куски чешуйчатой формы. Окалина сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0067 % (по массе) имеет более рассыпчатую форму и включает частицы различного размера.

На микрошлифах, подготовленных в плоскости поперечного сечения образцов, проведены исследования микроструктуры основного материала и образовавшегося оксидного слоя (рис. 4).

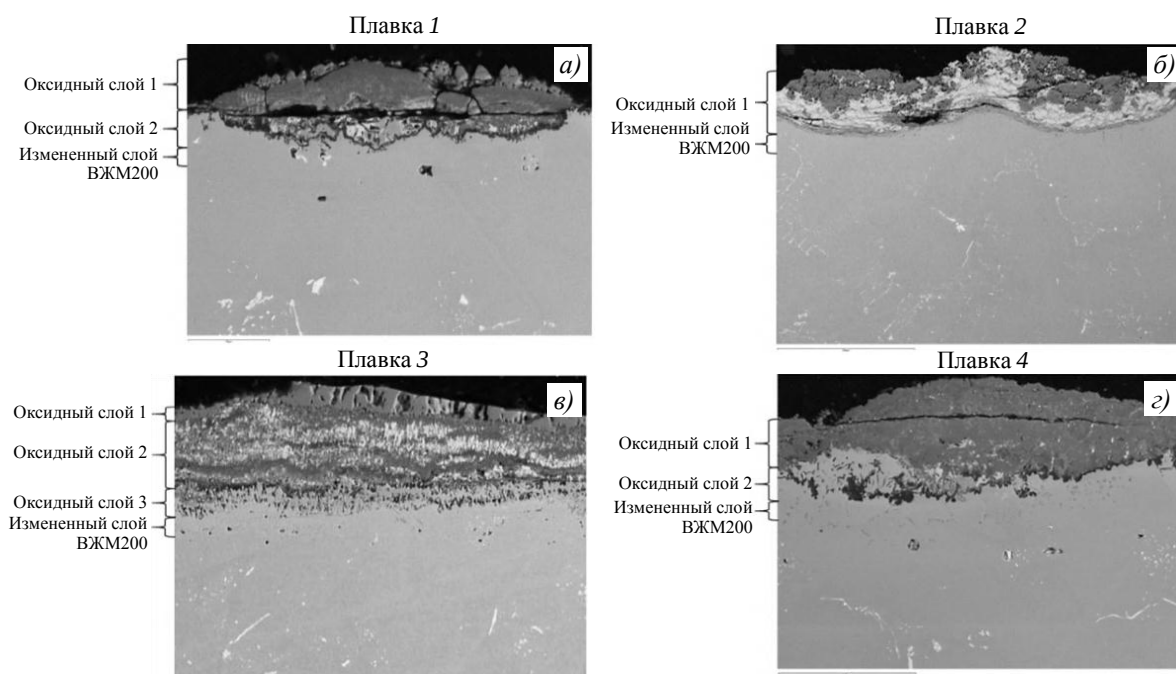


Рис. 4. Структуры ($\times 500$) образцов из сплава ВЖМ200 после испытаний на жаростойкость при температуре 1000 °С с переменным содержанием серы, % (по массе): 0,0002 (а); 0,0038 (б); 0,0067 (в) и 0,0130 (г)

При исследовании методом электронно-зондового микроанализа определен локальный элементный состав образовавшегося оксидного слоя и измененного слоя на поверхности образцов из сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы после испытаний на жаростойкость (табл. 4).

Таблица 4

**Химический состав оксидного слоя и измененного слоя
на поверхности основного материала испытанных образцов**

Место измерения		Содержание элементов, % (по массе)								
		O	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Hf	W
Образец плавки 1 (содержание серы 0,0002 % (по массе))										
Оксидный слой	Измерение 1	29,0	3,3	5,3	30,2	6,7	16,5	3,6	1,7	3,7
	Измерение 2	26,7	18,6	2,3	7,2	2,4	25,7	1,3	H/o	15,9
Измененный слой сплава ВЖМ200		H/o	1,8	1,0	8,4	11,3	64,0	H/o	H/o	13,6
Образец плавки 2 (содержание серы 0,0038 % (по массе))										
Оксидный слой	Измерение 1	19,9	3,7	1,5	6,5	6,7	35,2	H/o	H/o	26,5
Измененный слой сплава ВЖМ200		H/o	3,7	1,5	7,2	10,2	64,9	H/o	H/o	12,6
Образец плавки 3 (содержание серы 0,0067 % (по массе))										
Оксидный слой	Измерение 1	16,2	H/o	H/o	0,8	7,4	75,7	H/o	H/o	H/o
	Измерение 2	22,9	5,7	2,5	11,5	6,7	30,9	H/o	H/o	19,7
	Измерение 3	8,7	10,7	1,1	1,8	2,7	65,4	H/o	H/o	9,7
Измененный слой сплава ВЖМ200		H/o	1,4	0,5	4,4	8,4	72,8	H/o	H/o	12,5
Образец плавки 4 (содержание серы 0,0130 % (по массе))										
Оксидный слой	Измерение 1	25,8	4,3	2,9	26,2	11,2	23,6	2,7	1,2	2,2
	Измерение 2	16,1	28,0	0,5	0,6	6,0	39,1	H/o	H/o	9,8
Измененный слой сплава ВЖМ200		H/o	1,7	0,2	5,4	11,3	67,2	H/o	H/o	14,3
Примечание. H/o – не обнаружено.										

Видно, что на поверхности образцов из сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы под оксидным слоем образован измененный слой, характеризующийся меньшим по сравнению с основным металлом содержанием хрома и алюминия. Оксидный и измененный слой углеродсодержащего сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы не содержит сульфиды титана в отличие от безуглеродистого сплава ЖС36 [49], система легирования которого также включает титан. При этом также не обнаружено других фаз, содержащих серу. Поверхность испытанных образцов из сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0002 и 0,0130 % (по массе) обладает схожим химическим составом оксидного и измененного слоев от основного материала. Оксидный слой (темные участки на рис. 4, а, з) данных образцов состоит преимущественно из хрома и содержит другие легирующие элементы, включая гафний и ниобий; более светлые участки оксидного слоя состоят преимущественно из алюминия. По-видимому, этот слой предотвращает дальнейшее окисление основного материала. На поверхности образцов из сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0038 и 0,0067 % (по массе) оксидный слой такого химического состава не обнаружен. В оксидном слое, образовавшемся на металле этих плавок, наблюдается снижение содержания хрома и алюминия, отсутствуют такие элементы, как гафний и ниобий. Он также имеет визуальные отличия

(серые и светлые участки на рис. 4, б, в). Поверхность образца из сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0038 % (по массе) подверглась наиболее значительному высокотемпературному окислению в ходе испытаний и обладает наиболее тонким оксидным слоем.

Учитывая отсутствие серы по результатам электронно-зондового анализа оксидного и измененного слоя на поверхности испытанных образцов из сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы, методом газового анализа определено остаточное содержание серы в испытанных образцах и образовавшейся окалине. Испытания окалины образцов с содержанием серы 0,0002 и 0,0130 % (по массе) не проводились ввиду того, что количество образовавшейся окалины оказалось недостаточным для проведения исследований (табл. 5).

Таблица 5

Остаточное содержание серы в образцах из сплава ВЖМ200

Место измерения		Содержание серы, % (по массе), в плавке			
		1	2	3	4
Образцы	до испытаний	0,0002	0,0038	0,0067	0,0130
	после испытаний	0,0002	0,0059	0,0082	0,0123
Окалина		—	0,0021	0,0018	—

Видно, что содержание серы в образцах из сплава с минимальной концентрацией серы (0,0002 % (массе)) после проведения испытаний не изменилось, содержание серы в образцах из сплава с максимальным содержанием серы (0,0130 % (массе)) после испытаний практически не изменилось и составило 0,0123 % (массе). На исходных образцах из сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0038 и 0,0067 % (массе) после испытаний содержание серы увеличилось до 0,0059 и 0,0082 % (массе) соответственно. При этом в окалине, образовавшейся в процессе испытаний данных образцов, содержание серы составило 0,0021 и 0,0018 % (массе) соответственно и не коррелирует с исходным содержанием. Это объясняется тем, что какая-то часть серы переходит в окалину, а другая часть, по-видимому, удаляется с поверхности в газообразном состоянии – основная ее часть остается в сплаве. С учетом того, что на данных образцах образовалось значительное количество окалины, это привело к уменьшению массы образцов после испытаний и повышению концентрации серы.

Количественное содержание фаз в образовавшейся окалине сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы, определенное методом рентгеноструктурного анализа, приведено в табл. 6.

Таблица 6

**Количественный фазовый анализ окалины с образцов
после испытаний на жаростойкость**

Плавка	Содержание серы, % (по массе)	Содержание фазы в окалине, % (по массе)			
		NiO	NiWO ₄	CoCo ₂ O ₄	HfO ₂
2	0,0038	55,9	10,6	32,5	1,0
3	0,0067	57,9	11,0	30,3	0,8
4	0,013	56,7	6,0	36,1	1,2

Анализ качественного фазового состава окалины с образцов сплава ВЖМ200 с содержанием серы 0,0038; 0,0067 и 0,0130 % (по массе) идентичен: основная фаза – оксид NiO, также присутствуют оксид NiWO₄, шпинель (Al, Co, Cr)₂(Ni, Co, Cr)O₄

(структурный тип Al_2MgO_4) и моноклинный оксид HfO_2 . Содержание шпинели рассчитано по структурным данным фазы $CoCo_2O_4$. При этом соединения с серой не обнаружены.

Согласно проведенным исследованиям основная часть серы после испытаний на жаростойкость сплава ВЖМ200 при температуре 1000 °С в течение 500 ч остается в металле. Поэтому проведены исследования микроструктуры сплава с минимальным 0,0002 и максимальным 0,0130 % (по массе) содержанием серы (рис. 5). В табл. 7 приведен локальный элементный состав карбидов в сплаве ВЖМ200 с содержанием серы 0,0002 и 0,0130 % (по массе) в литом и термообработанном состояниях.

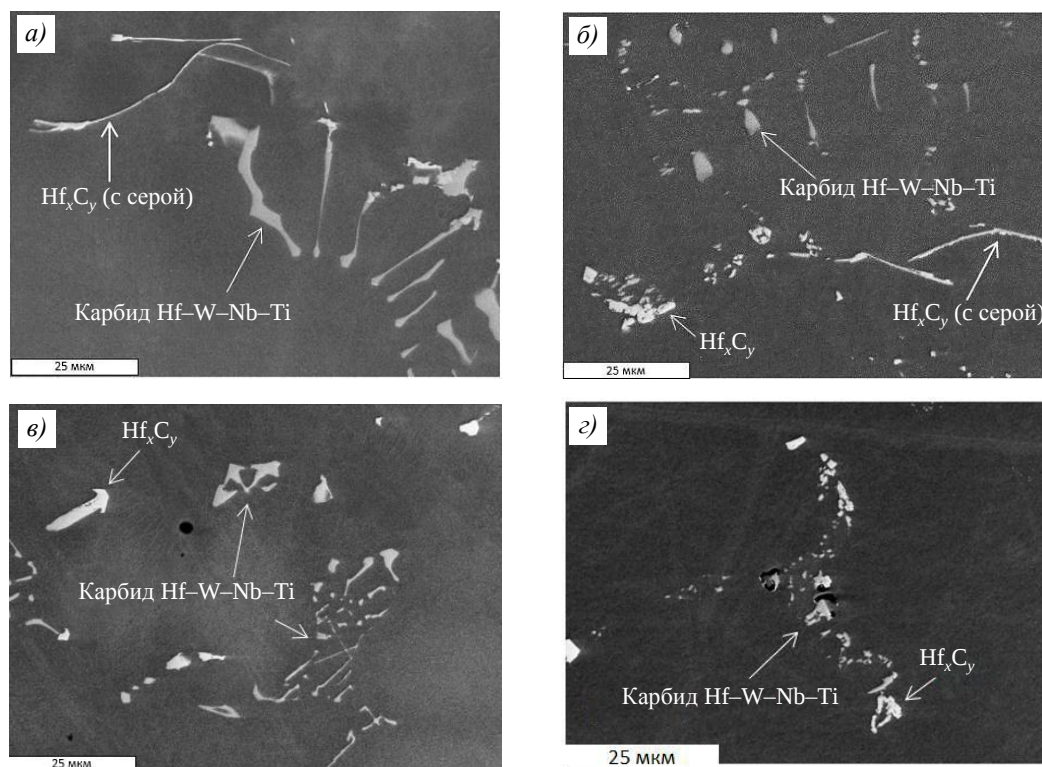


Рис. 5. Морфология карбидов гафния в сплаве ВЖМ200 с содержанием серы 0,0130 (а, б) и 0,0002 % (по массе) (в, г) в литом состоянии (а, в) и после термической обработки (б, г)

Таблица 7

Локальный элементный состав карбидов в сплаве ВЖМ200

Содержание серы, % (по массе)	Состояние образца	Состав карбида	Содержание элементов, % (по массе)							
			Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	Hf	W
0,0130	Литой	На основе гафния*	Н/о	5,3	1,5	1,9	13,6	10,3	50,9	4,7
		Hf-W-Nb-Ti	Н/о	15,9	0,6	0,7	3,7	20,3	24,0	22,3
	После ПТО	На основе гафния*	Н/о	7,6	1,8	2,3	11,8	7,9	53,1	2,9
		W-Ti-Nb-Hf	Н/о	17,8	2,0	1,7	9,9	16,1	10,5	32,0
0,0002	Литой	На основе гафния	Н/о	2,7	0,3	Н/о	3,6	9,7	63,0	10,9
		W-Nb-Ti-Hf	Н/о	19,1	0,8	0,6	3,8	20,1	15,6	27,8
	После ПТО	На основе гафния	Н/о	2,4	0,5	0,7	3,9	11,0	65,4	5,4
		W-Nb-Ti-Hf	Н/о	16,6	1,6	1,5	8,2	18,9	15,5	25,3

* Содержит углерод и до 5,4 % (по массе) серы.

Примечание. Н/о – не обнаружено, ПТО – полная термическая обработка.

В сплаве ВЖМ200 с максимальным (0,0130 % (по массе)) и минимальным (0,0002 % (по массе)) содержанием серы обнаружены карбиды двух составов: на основе гафния и на основе вольфрама, ниобия, титана и гафния (рис. 5). Карбиды второго состава имеют незначительные количественные различия. В сплаве ВЖМ200 с максимальным содержанием серы данная примесь обнаружена в составе некоторых карбидов на основе гафния как в литом, так и в термически обработанном состояниях (рис. 5, *а, б*). При этом состав и морфология карбидов сохраняются после проведения полной термической обработки. В сплаве с минимальным содержанием серы карбиды гафния различного состава не включают данную примесь (рис. 5, *в, г*). Карбиды на основе гафния в сплаве с содержанием серы 0,0130 % (по массе) характеризуются повышенным содержанием титана и ниобия по сравнению со сплавом с содержанием серы 0,0002 % (по массе). В карбидах данного состава после полной термической обработки наблюдается снижение содержания вольфрама.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что повышенная стойкость сплава ВЖМ200 к высокотемпературному окислению получена в металле с содержанием серы 0,0002 и 0,0130 % (по массе) относительно металла с содержанием серы 0,0038 и 0,0067 % (по массе), а минимальная жаростойкость – в сплаве с содержанием серы 0,0038 % (по массе). При этом в сплаве с содержанием серы 0,0002 % (по массе) соединения с данной примесью не образуются, тогда как в сплаве с содержанием серы 0,0130 % (по массе) обнаружены карбиды на основе гафния, которые содержат до 5,4 % (по массе) серы. Это свидетельствует о том, что при определенной концентрации серы в сплаве ВЖМ200 она входит в состав гафнийсодержащих карбидов, что не позволяет ей активно диффундировать на поверхность материала и разрушать образующийся оксидный слой.

Заключения

Результаты испытаний на жаростойкость гафнийсодержащего сплава ВЖМ200 с переменным содержанием серы показывают, что наибольшим сопротивлением к высокотемпературной газовой коррозии обладает сплав с минимальным содержанием серы 0,0002 % (по массе), а увеличение содержания серы приводит к снижению жаростойкости сплава. При этом наибольшее отрицательное влияние получено при концентрации данной примеси 0,0038 % (по массе), однако в интервале содержания от 0,0038 до 0,0130 % (по массе) процесс высокотемпературного окисления сплава замедляется.

На поверхности испытанных образцов из сплава ВЖМ200 и образующейся окалины не обнаружено фаз, содержащих серу. В сплаве с максимальным содержанием серы данная примесь обнаружена в составе карбидов на основе гафния и в процессе высокотемпературного окисления она в основном остается в сплаве, а не диффундирует из объема к поверхности материала. Испытанные образцы из сплава с содержанием серы 0,0038 и 0,0067 % (по массе) подверглись значительному изменению массы с образованием большого количества окалины. Оксидный слой, обнаруженный на поверхности данных образцов, обладает низкой стойкостью к газовой коррозии из-за пониженного содержания в нем хрома и алюминия.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
2. Будиновский С.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С. Нанесение защитных ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали на установках типа МАП // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.

3. Тюньков А.В., Андронов А.А., Золотухин Д.Б., Климкин Т.О., Назаров А.Ю., Нестеренко А.К., Сальников С.А., Рамазанов К.Н., Юшков Ю.Г. Методы формирования теплозащитных покрытий лопаток турбин (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-140-168.
4. Иноземцев А.А., Коряковцев А.С., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Роль материалов и защитных покрытий турбинных лопаток в обеспечении надежности и экономичности ГТД // *Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение: тр. Междунар. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2006. С. 84–87.*
5. Каблов Е.Н., Мубояджан С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 60–70.
6. Geddes B., Leon H., Huang X. *Superalloys: Alloying and performance*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. 176 p.
7. Reed R.C. *The Superalloys Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 390 p.
8. Шеин Е.А. Тенденции в области легирования и микролегирования жаропрочных монокристаллических сплавов на основе никеля (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2016. № 3 (39). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.
9. Pettit F.S., Meier G.H. Oxidation and hot corrosion of superalloys // *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1984. P. 651–687. DOI: 10.7449/1984/Superalloys_1984_651_687.
10. Росс И.В., Симс Ч.Т. Сплавы на основе никеля // *Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2 кн. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля; пер. с англ. М.: Металлургия, 1995. Кн. 1. С. 128–172.*
11. Choi K., Choe B., Han S. et al. Effects of Cr and Al Contents on the Oxide Structures of Ni-based Superalloys at High Temperatures // *Metals*. 2025. Vol. 15 (388). P. 1–15. DOI: 10.3390/met15040388.
12. Chang J., Feng W., Zhao W. et al. Investigation on Optimal Ta/Cr Ratio of a Single Crystal Ni-base Superalloy in View of the Isothermal Oxidation Behavior // *Crystals*. 2021. Vol. 11 (1421). P. 1–15. DOI: 10.3390/cryst11111421.
13. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys // *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1992. P. 807–816.
14. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R. et al. The control of sulfur content in nickel-base, single crystal superalloys and its effect on cyclic oxidation resistance // *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996. P. 71–80.
15. Simpson T.M., Price A.R. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys // *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2000. P. 387–392.
16. Ultra low sulfur superalloy casting and method of making: pat. 5922148A US; appl. 25.02.1997; publ. 13.07.1999.
17. Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lanthanum and yttrium: pat. 2415888 EU; appl. 14.10.10; publ. 27.06.12.
18. Zhan X., Wang D., Zhang Z.-P., Zhang J. Effect of trace sulfur on the hot corrosion resistance of Ni-base single crystal superalloy // *Corrosion Science*. 2023. Vol. 224. P. 111528. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111528.
19. Harris K., Wahl J.B. Developments in superalloy castability and new applications for advanced superalloys // *Material Science and Technology*. 2009. Vol. 25. No. 2. DOI: 10.1179/174328408x355442.
20. Cao S., Yang Y., Chen B. et al. Influence of yttrium on purification and carbide precipitation of superalloy K4169 // *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 86. P. 260–270. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.049.

21. Harris K., Wahl J.B. Improved single crystal superalloys, CMSX-4 (SLS) [La+Y] and CMSX-486 // Superalloys. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 45–52.
22. Yun D.W., Seo S.M., Jeong H.W., Yoo Y.S. The cyclic oxidation behaviour of Ni-based superalloy GTD-111 with sulphur impurities at 1100 °C // Corrosion Science. 2015. Vol. 90. P. 392–401. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.10.030.
23. Peruse E., Diomande D., Dufour G. et al. Type I and Type II Hot Corrosion of Ni-based alloys without an incubation period // High Temperature Corrosion of Materials. 2025. Vol. 102. P. 1–15. DOI: 10.1007/s11085-025-10341-7.
24. Мин П.Г., Сидоров В.В., Будиновский С.А., Вадеев В.Е. Влияние серы на жаростойкость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta–Mo–W–Ru–Cr // Материаловедение. 2016. № 7. С. 9–12.
25. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Будиновский С.А., Мин П.Г. Влияние примеси серы на жаростойкость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ с защитным покрытием // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 20–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-20-23.
26. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Колесников С.И., Чемов Д.А. Влияние примесей на механические и эксплуатационные свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.
27. Мин П.Г., Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Влияние примесей серы, фосфора и кремния на структуру и свойства монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Материаловедение. 2018. № 8. С. 13–18. DOI: 10.31044/1684-579X-2018-0-8-13-18.
28. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Пучков Ю.А. Особенности диффузионного поведения примесей и рафинирующих добавок в никеле и монокристаллических жаропрочных сплавах // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1 (40). С. 24–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-24-31.
29. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Разработка нового жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 и технологии его производства для литья методом направленной кристаллизации рабочих лопаток перспективных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
30. Mataveli Suave L., Cormier J., Villechaise P. et al. Anisotropy in creep properties of DS200 + Hf alloy // Materials at High Temperatures. 2016. No. 33. P. 361–371. DOI: 10.1080/09603409.2016.1159836.
31. Mataveli Suave L., Cormier J., Villechaise P. et al. High temperature creep damage mechanisms in a directionally solidified alloy: impact of crystallography and environment // Superalloys. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2016. P. 747–756. DOI: 10.7449/Superalloys/2016/Superalloys_2016_747_756.
32. Baldan A. Electron microprobe investigation of lower melting regions in the as-cast structure of DS200 + Hf single crystal // Journal of Materials Science. 1990. Vol. 25. P. 4341–4348.
33. Тихонов А.И., Краев В.М., Силуянова М.В. Перспективы развития российского авиационного двигателестроения на основе унифицированного газогенератора // СТИН. 2023. № 6. С. 71–74.
34. Константинов И.В. Обеспечение технологического суверенитета авиационной отрасли на примере самолета SUKHOI SUPERJET NEW // Научные достижения и инновационные подходы: теория, методология, практика: сб. науч. тр. по мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Анапа, 2022. С. 99–103.
35. В 2024 году планируют выпустить более 40 двигателей ПД-8 // Информационное телеграфное агентство (ИТАР-ТАСС): офиц. сайт. URL: <https://tass-ru/ekonomika/18995881> (дата обращения: 07.07.2025).
36. Толбоев М.О. Гражданская авиация России: до и после Суперджета // Стандарты и качество. 2019. № 7. С. 80–82.
37. Базикова И.В. Основные проблемы реализации проекта «Sukhoi Superjet 100» // Вестник университета. 2018. № 6. С. 48–54.

38. Тихонов А.И., Сазонов А.А. Инновационный Российский самолет Sukhoi Superjet 100 как вектор развития авиастроения будущего // Экономика и предпринимательство. 2018. № 7 (96). С. 289–292.
39. Майоров А.В., Борисоглебская Л.Н., Булатников Д.В., Дудина К.Э. Особенности импорто-замещения в авиастроительной отрасли // Инновации. 2023. № 1 (291). С. 45–50. DOI: 10.26310/2071-3010.2023.291.1.004.
40. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Мин М.Г. Разработка и освоение в производстве нового монокристаллического высокожаропрочного никелевого сплава для литья турбинных лопаток перспективного двигателя ПД-8 // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-3-17.
41. Мин П.Г., Вадеев В.Е. Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
42. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2740929 Рос. Федерация; заявл. 20.04.20; опубл. 21.01.21.
43. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
44. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
45. Герасимов В.В., Висик Е.М., Колядов Е.В. О направленной кристаллизации крупногабаритных отливок на установке УВНК-15 // Литейное производство. 2013. № 3. С. 22–24.
46. Герасимов В.В., Колядов Е.В. Технические характеристики и технологические возможности установок УВНК-9А и ВИП-НК для получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов // Литейщик России. 2012. № 11. С. 33–37.
47. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М. Управление структурой жаропрочных никелевых сплавов при изготовлении лопаток ГТД направленной кристаллизацией // Авиационная промышленность. 1999. № 2. С. 12–18.
48. Механик Е.А., Мин П.Г., Гундобин Н.В., Растегаева Г.Ю. Определение массовой доли серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% (по массе) // Труды ВИАМ. 2014. № 9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
49. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Оспенникова О.Г., Симонов В.Н., Пучков Ю.А. Влияние примесей и микролегирования на структуру и эксплуатационные свойства монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. С. 232–233.

References

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Highly efficient cooling of GTE hot section blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
2. Budinovskiy S.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S. Deposition of protective ion-plasma coatings on largescale parts on MAP type installations. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
3. Tyunkov A.V., Andronov A.A., Zolotukhin D.B. et al. Methods of forming heat-protective coatings of turbine blades (review). *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-140-168.

4. Inozemtsev A.A., Koryakovtsev A.S., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P. The role of materials and protective coatings of turbine blades in ensuring the reliability and efficiency of gas turbine engines. *Scientific ideas of S.T. Kishkin and modern materials science: Reports Int. Sci.-Tech. Conf. Moscow: VIAM, 2006*, pp. 84–87.
5. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat resisting and heat-protective coverings for turbine blades of high pressure of perspective GTE. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 60–70.
6. Geddes B., Leon H., Huang X. *Superalloys: Alloying and performance*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010, 176 p.
7. Reed R.C. *The Superalloys Fundamentals and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, 390 p.
8. Shein E.A. Tendencies in the field of alloying and microalloying of heat resisting single-crystal alloys on the basis of nickel (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 3, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.
9. Pettit F.S., Meier G.H. Oxidation and hot corrosion of superalloys. *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1984, pp. 651–687. DOI: 10.7449/1984/Superalloys_1984_651_687.
10. Ross I.V., Sims C.T. Nickel-based alloys. *Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants*: in 2 books. Ed. S.T. Sims, N.S. Stoloff, W.K. Hagel; trans. from Engl. Moscow: Metallurgiya, 1995, book 1, p. 128–172.
11. Choi K., Choe B., Han S. et al. Effects of Cr and Al Contents on the Oxide Structures of Ni-based Superalloys at High Temperatures. *Metals*, 2025, vol. 15 (388), pp. 1–15. DOI: 10.3390/met15040388.
12. Chang J., Feng W., Zhao W. et al. Investigation on Optimal Ta/Cr Ratio of a Single Crystal Ni-base Superalloy in View of the Isothermal Oxidation Behavior. *Crystals*, 2021, vol. 11 (1421), pp. 1–15. DOI: 10.3390/cryst11111421.
13. Mc Vay R.V., William P., Meier G.H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys. *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1992, pp. 807–816.
14. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R. et al. The control of sulfur content in nickel-base, single crystal superalloys and its effect on cyclic oxidation resistance. *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996, pp. 71–80.
15. Simpson T.M., Price A.R. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys. *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2000, pp. 387–392.
16. *Ultra low sulfur superalloy casting and method of making*: pat. 5922148A US; appl. 25.02.97; publ. 13.07.99.
17. *Improved low sulfur nickel-base single crystal superalloy with ppm additions of lanthanum and yttrium*: pat. 2415888 EU; appl. 14.10.10; publ. 27.06.12.
18. Zhan X., Wang D., Zhang Z.-P., Zhang J. Effect of trace sulfur on the hot corrosion resistance of Ni-base single crystal superalloy. *Corrosion Science*, 2023, vol. 224, p. 111528. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111528.
19. Harris K., Wahl J.B. Developments in superalloy castability and new applications for advanced superalloys. *Material Science and Technology*, 2009, vol. 25, no. 2. DOI: 10.1179/174328408x355442.
20. Cao S., Yang Y., Chen B. et al. Influence of yttrium on purification and carbide precipitation of superalloy K4169. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 86, pp. 260–270. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.01.049.
21. Harris K., Wahl J.B. Improved single crystal superalloys, CMSX-4 (SLS) [La+Y] and CMSX-486. *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2004, pp. 45–52.
22. Yun D.W., Seo S.M., Jeong H.W., Yoo Y.S. The cyclic oxidation behaviour of Ni-based superalloy GTD-111 with sulphur impurities at 1100 °C. *Corrosion Science*, 2015, vol. 90, pp. 392–401. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.10.030.
23. Peruse E., Diomande D., Dufour G. et al. Type I and Type II Hot Corrosion of Ni-based alloys without an incubation period. *High Temperature Corrosion of Materials*, 2025, vol. 102, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s11085-025-10341-7.

24. Min P.G., Sidorov V.V., Budinovskiy S.A., Vadeev V.E. Effect of sulfur on heat resistance of single crystals of heat-resistant nickel alloy of the Ni–Al–Co–Re–Ta–Mo–W–Ru–Cr system. *Materialovedenie*, 2016, no. 7, pp. 9–12.
25. Kablov D.E., Sidorov V.V., Budinovskij S.A., Min P.G. The influence of sulfur impurity on heat resistance of single crystals of ZhS36-VI alloy with protective coating. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 1 (40), pp. 20–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-20-23.
26. Min P.G., Vadeev V.E., Kolesnikov S.I., Chemov D.A. The effect of impurities on mechanical and operational properties of the cast nickel-base superalloy VZhM200. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.
27. Min P.G., Kablov D.E., Sidorov V.V., Vadeev V.E. Influence of sulfur, phosphorus and silicon impurities on the structure and properties of single crystals of nickel heat-resistant alloys *Materialovedenie*, 2018, no. 8, pp. 13–18. DOI: 10.31044/1684-579X-2018-0-8-13-18.
28. Kablov D.E., Sidorov V.V., Puchkov Yu.A. Diffusion behavior features of impurities and microalloying additives in nickel and single crystal superalloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 1 (40), pp. 24–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-24-31.
29. Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. The development of the new VZhM200 superalloy and the technology of its production for casting of the advanced engines' blades by the directional crystallization. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-11-18.
30. Mataveli Suave L., Cormier J., Villechaise P. et al. Anisotropy in creep properties of DS200 + Hf alloy. *Materials at High Temperatures*, 2016, no. 33, pp. 361–371. DOI: 10.1080/09603409.2016.1159836.
31. Mataveli Suave L., Cormier J., Villechaise P. et al. High temperature creep damage mechanisms in a directionally solidified alloy: impact of crystallography and environment. *Superalloys*. Warrendale, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2016, pp. 747–756. DOI: 10.7449/Superalloys/2016/Superalloys_2016_747_756.
32. Baldan A. Electron microprobe investigation of lower melting regions in the as-cast structure of DS200 + Hf single crystal. *Journal of Materials Science*, 1990, vol. 25, pp. 4341–4348.
33. Tikhonov A.I., Kraev V.M., Siluyanov M.V. Prospects for the Development of Russian Aircraft Engine Manufacturing Based on a Unified Gas Generator. *STIN*, 2023, no. 6, pp. 71–74.
34. Konstantinov I.V. Ensuring Technological Sovereignty of the Aviation Industry Using the Example of the SUKHOI SUPERJET NEW Aircraft. *Scientific Achievements and Innovative Approaches: Theory, Methodology, Practice: Scientific Reports on Materials*. VIII Int. Scientific and Practical Conf. Anapa, 2022, pp. 99–103.
35. *More than 40 PD-8 Engines to Be Produced in 2024*. Available at: <https://tass-ru/ekonomika/18995881> (accessed: July 07, 2025).
36. Tolboev M.O. Civil aviation of Russia: before and after the Superjet. *Standarty i kachestvo*, 2019, no. 7, pp. 80–82.
37. Bazikova I.V. Main problems of the implementation of the Sukhoi Superjet 100 project. *Vestnik universiteta*, 2018, no. 6, pp. 48–54.
38. Tikhonov A.I., Sazonov A.A. Innovative Russian aircraft Sukhoi Superjet 100 as a vector of development of the aircraft industry of the future. *Ekonomika i predprinimatelstvo*, 2018, no. 7 (96), pp. 289–292.
39. Mayorov A.V., Borisoglebskaya L.N., Bulatnikov D.V., Dudina K.E. Features of import substitution in the aircraft industry. *Innovatsii*, 2023, no. 1 (291), pp. 45–50. DOI: 10.26310/2071-3010.2023.291.1.004.
40. Min P.G., Vadeev V.E., Min M.G. Development and implementation in production of the new single-crystal high-temperature nickel alloy for casting of gas turbine blades for the prospective engine PD-8. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-3-17.
41. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.

42. *Heat-resistant nickel-based casting alloy and a product made from it*: pat. 2740929 Rus. Federation; appl. 20.04.20; publ. 21.01.21.
43. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
44. Kablov E.N., Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Development of technology of cast superalloys directional solidification with variable controlled temperature gradient. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
45. Gerasimov V.V., Visik E.M., Kolyadov E.V. On directional crystallization of large-sized castings on the UVNK-15 unit. *Liteynoe proizvodstvo*, 2013, no. 3, pp. 22–24.
46. Gerasimov V.V., Kolyadov E.V. Technical characteristics and technological capabilities of the UVNK-9A and VIP-NK units for producing single-crystal castings from heat-resistant alloys. *Liteshchik Rossii*, 2012, no. 11, pp. 33–37.
47. Kablov E.N., Gerasimov V.V., Visik E.M. Control of the structure of heat-resistant nickel alloys in the manufacture of gas turbine engine blades by directional crystallization. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1999, no. 2, pp. 12–18.
48. Mehanik E.A., Min P.G., Gundobin N.V., Rastegaeva G.Yu. Determination of sulfur mass fraction in heat-resistant nickel alloy and steels within the concentration range from 0,0001 to 0,0009% wt. *Trudy VIAM*, 2014, no. 9, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
49. Sidorov V.V., Kablov D.E., Chabina E.B., Ospennikova O.G., Simonov V.N., Puchkov Yu.A. *The influence of impurities and microalloying on the structure and performance properties of single crystals of heat-resistant nickel alloys*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, pp. 232–233.

Информация об авторах

Мин Павел Георгиевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вадеев Виталий Евгеньевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Санкин Роман Вадимович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Pavel G. Min, Head of Sector, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaliy E. Vadeev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman V. Sankin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.07. 2025.
The article was submitted 30.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 31.07. 2025.

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-19-34

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT46 В ЛИТОМ И ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

О.С. Кашапов¹, М.А. Макушина¹, В.С. Калашников¹, О.Ю. Лаврова¹

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

Аннотация. Приведено сравнение основных механических свойств прутков, поковок, цельнокатаных и кованых колец, отливок из жаропрочного титанового псевдо- α -сплава VT46 (VT46L), а также сплавов-аналогов по классу и применению в интервале рабочих температур. Отдельно представлены показатели длительной прочности при температурах 500 и 550 °С. Показаны результаты исследований структуры материала из указанных полуфабрикатов. Дано обобщенное описание технологии изготовления полуфабрикатов с указанием на особенности, отличающие сплав VT46 от серийных титановых сплавов. Обсуждаются возможные области применения сплава VT46 применительно к деталям двигателей и авиационной техники.

Ключевые слова: жаропрочные титановые сплавы, титановый сплав VT46, поковки, отливки, механические свойства, микроструктура

Для цитирования Кашапов О.С., Макушина М.А., Калашников В.С., Лаврова О.Ю. Сравнительный анализ свойств жаропрочного титанового сплава VT46 в литом и деформированном состоянии // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-19-34.

Scientific article

COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY VT46 IN CAST AND FORGED CONDITIONS

O.S. Kashapov¹, M.A. Makushina¹, V.S. Kalashnikov¹, O.Yu. Lavrova¹

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 paper presents comparison of main mechanical properties of rods, forgings and castings made of heat-resistant titanium pseudo- α alloy VT46 (VT46L), as well as similar alloys of the same class and application in the range of operating temperatures. Values of long-term strength at 500 and 550 °C have been presented specifically. The article shows microstructure study results of the said semi-finished products material. It provides a generalized description of the technology for manufacturing semi-finished products, indicating features that distinguish VT46 alloy from serial titanium alloys. Possible application areas of VT46 alloy in relation to engine parts and aircraft equipment are discussed.

Keywords: heat-resistant titanium alloys, titanium alloy VT46, forgings, castings, mechanical properties, microstructure

For citation: Kashapov O.S., Makushina M.A., Kalashnikov V.S., Lavrova O.Yu. Comparative analysis of mechanical properties of heat-resistant titanium alloy VT46 in cast and forged conditions. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-19-34.

Введение

Необходимость в разработке новых сплавов для авиационной отрасли, как правило, диктуется требованиями по повышению удельных прочностных характеристик конструкционных материалов в определенном интервале рабочих температур. Для деталей газотурбинных двигателей, помимо типовых характеристик статической кратковременной прочности, существенное значение имеют характеристики пластичности, вязкости разрушения и чувствительности материала к концентраторам напряжений, которые представляют количественные показатели надежности. При разработке нового материала обязателен учет технологических особенностей изготовления полуфабрикатов, заготовок и деталей. С учетом вышесказанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан новый высокопрочный жаропрочный сплав псевдо- α -класса, получивший марку ВТ46. По уровню легирования элементами, стабилизирующими β -фазу, новый сплав является аналогом серийного сплава марки ВТ20 (полный аналог в КНР – сплав ТА15) [1–5], имея при этом существенные отличия в композиции (химическом составе) и фазовом составе. В отличие от серийных псевдо- α -сплавов (ОТ4, ВТ18У, ВТ20), термическая обработка сплава ВТ46 заключается в обработке на твердый раствор с последующим старением. Эффективное упрочнение посредством термической обработки по режиму двойного отжига, а также уровень прочностных характеристик обеспечивают возможность рассматривать двухфазные жаропрочные титановые сплавы ВТ3-1, ВТ8 и ВТ9 [6–8] как серийные сплавы-аналоги для сплава ВТ46 по области применения. Сплавы ВТ3-1 и ВТ20 применяются не только для изготовления деталей авиационной техники, но и в других отраслях машиностроения, наряду со сплавом ВТ6 [9–15]. Относительная простота технологии изготовления полуфабрикатов до известной степени определяет стабильность механических свойств. Поэтому сплав ВТ46 в виде деформированных полуфабрикатов должен быть интересен машиностроителям для замены менее прочных сплавов, разработанных в 60-х гг. прошлого века. Одна из основных целей данной статьи – помочь заинтересованным специалистам сделать обоснованные выводы о целесообразности замены серийных сплавов на новый с учетом фактических характеристик материала и особенностей технологии изготовления полуфабрикатов и деталей.

При этом сплавы ВТ6 и ВТ20 (как наиболее универсальные) применяются для изготовления заготовок методом центробежного литья [16–18]. Попытки промышленного освоения отливок из двухфазных жаропрочных титановых сплавов ВТ3-1Л, ВТ9Л и ВТ18У [19, 20] в отечественной практике не увенчались успехом, поэтому сплав ВТ20Л остается наиболее жаропрочным литейным титановым сплавом. Развитие технологии изготовления полимерных композиционных материалов наряду с получением опыта эксплуатации деталей из них [21, 22] делают возможным альтернативный выбор в пользу этих материалов для снижения массы конструкций. Однако титановые сплавы и сплавы из легких цветных металлов могут работать при температурах >100 °С.

В данной статье в рамках работ по общей квалификации [23–26] использованы результаты испытаний, полученные на промышленных и опытно-промышленных полуфабрикатах и заготовках – поковках, прутках [27] и отливках из сплава ВТ46, а также результаты приемо-сдаточных испытаний серийных изделий из сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 и ВТ20.

Испытания механических свойств, отдельные металлофизические исследования, а также контроль химического состава сплава ВТ46 проводили в Испытательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [28]. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

В работе исследованы промышленные полуфабрикаты из сплава ВТ46, изготовленные в производственных условиях ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА» по полному металлургическому циклу, а также поковки из сплава ВТ46, изготовленные как из слитков собственного производства методом двойного вакуумно-дугового переплава, так и из исходного кованого прутка ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА», имеющего после механической обработки $\varnothing 150$ мм. В качестве литейной заготовки для изготовления отливок использовали слитки собственного производства после двукратного вакуумно-дугового переплава, а также материал прутка промышленной поставки $\varnothing 150$ мм. Технология изготовления кованых прутков и штамповок в условиях промышленного предприятия не отличалась от типовой технологической схемы изготовления, применяемой для аналогичных изделий из серийных жаропрочных титановых сплавов. Для изготовления промышленной штамповки из сплава ВТ46 использована серийная оснастка для изготовления штамповок из сплава ВТ3-1. Отливки изготавливали на вакуумно-индукционной плавильно-заливочной установке с водоохлаждаемым тиглем методом центробежной заливки в керамические формы.

Номинальные и фактические химические составы слитков сплава ВТ46, приведенные к структурным эквивалентам по алюминию и молибдену [9], использованные в данной работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровень легирования сплава ВТ46, а также серийных титановых сплавов в структурных эквивалентах

Сплав	Полуфабрикат	Вид термической обработки (ТО)	Уровень легирования, %	
			[Al] ^{eq}	[Mo] ^{eq}
ВТ46	Пруток (номинальный состав)	Двойной отжиг	8,6	3,21
	Пруток и поковка (фактический состав)	Двойной отжиг (для штамповки, изготовленной с помощью молота, – с охлаждением под вентилятором после первой ступени отжига)	8,29–8,63	3,06–3,21
	Цельнокатаные и кованые кольца сечением 71 и 45 мм соответственно	Двойной отжиг (для цельнокатаного промышленного кольца – с охлаждением под вентилятором после первой ступени отжига)		
ВТ46Л	Отливка (номинальный состав)	Горячее изостатическое прессование (ГИП), двойной отжиг	8,2	3,31
	Отливка (фактический состав)		8,27–8,8	3,19–3,45
ВТ3-1	Поковки и штамповки (номинальный состав)	Изотермический отжиг с охлаждением с переносом в печь	7,5	5,6
ВТ20	Прутки, поковки, штамповки, цельнокатаные кольца (номинальный состав)	Одноступенчатый отжиг	8,05	3,27
ВТ20Л	Отливка (номинальный состав)	Без ТО или неполный отжиг для снятия напряжений	8,25	3,1
ВТ9	Прутки, штамповки, поковки (номинальный состав)	Двойной отжиг	8,0	3,6
ВТ9Л	Отливка (номинальный состав)	Без ТО или неполный отжиг для снятия напряжений	7,8	3,6

Определение механических свойств проводили по стандартным методикам: ГОСТ 94545–78, ГОСТ 9651–84, ГОСТ 10145–84, ГОСТ 1497–84, ГОСТ 1497–2023.

Внешний вид отдельных промышленных и опытно-промышленных полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ВТ46Л) приведен на рис. 1.



Рис. 1. Полуфабрикаты из сплава ВТ46 (ВТ46Л): *а* – штамповка, изготовленная с помощью молота, с габаритными размерами 343×263×92 мм и массой 14 кг; *б* – штамповка, изготовленная на изотермическом прессе, с габаритными размерами Ø260×150 мм, максимальным сечением под термическую обработку 96 мм и массой 25 кг в обточенном состоянии; *в* – цельнокатаные кольца (размеры одного кольца – диаметры $D_{нар} = 945$ мм, $D_{вн} = 802$ мм, высота стенки $H = 100$ мм, масса 86,5 кг); *г* – промышленные кованные и катаные прутки диаметром 35; 43 и 150 мм; *д* – опытная отливка для определения механических свойств диаметром 23 мм с фрагментом прибыли, после литья

Результаты и обсуждение

На рис. 2–5 представлены микроструктуры всех исследованных полуфабрикатов (прутка, поковки, кольца и отливки) из сплава ВТ46 (ВТ46Л).

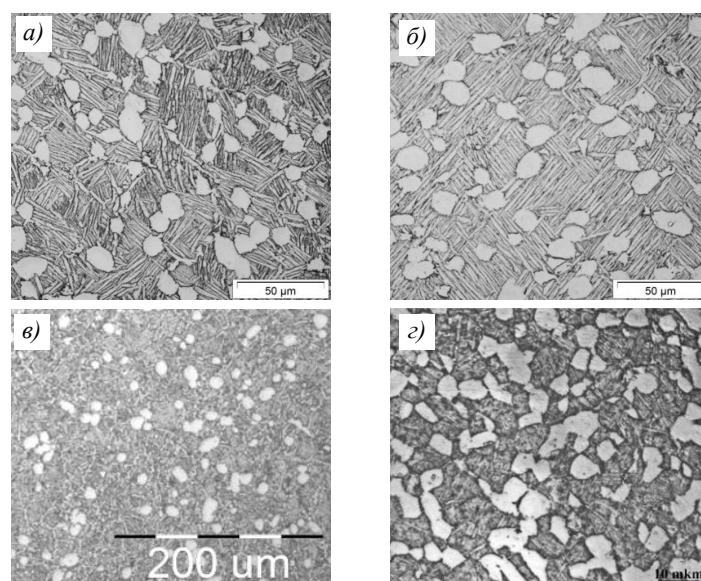


Рис. 2. Микроструктуры прутка из сплава ВТ46 в отожженном состоянии (оптическая микроскопия) диаметром 150 мм в поперечном (*а*) и продольном (*б*) направлениях, а также в поперечном направлении диаметром 35 (*в*) и 43 мм (*г*)

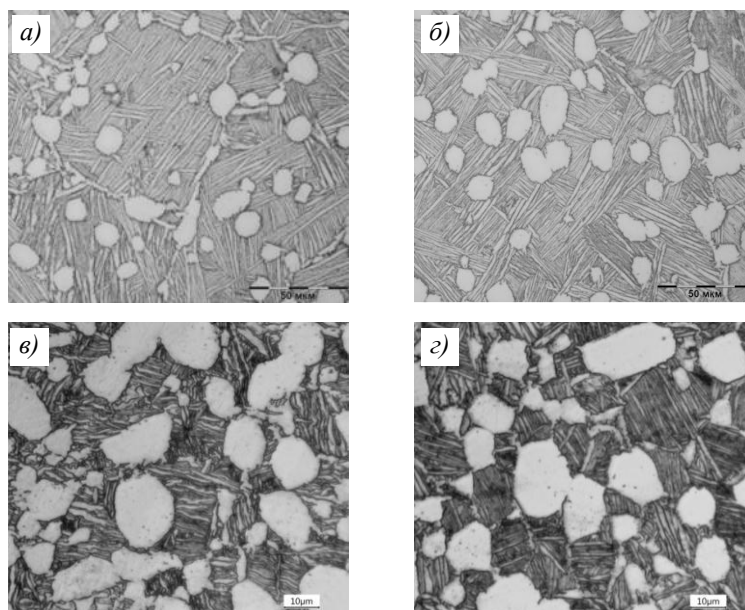


Рис. 3. Типичные микроструктуры полуфабрикатов из сплава ВТ46 (оптическая микроскопия): *а* – промышленная штамповка, изготовленная с помощью молота; *б* – промышленное цельнокатаное кольцо; *в* – изотермическая штамповка центробежного колеса; *з* – кольцевая поковка сечением 45 мм

Микроструктура всех исследованных деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ46 – глобулярно-пластинчатая, типичная для деформации и термической обработки при температурах двухфазной области. Различия в количественных характеристиках микроструктуры (размер частиц первичной α -фазы и их объемная доля, толщина пластин вторичной α -фазы, размеры колоний вторичной α -фазы, размеры условного β -зерна) определяются фактическими условиями изготовления – технологией горячей деформации, режимом термической обработки и фактическими условиями охлаждения после первой ступени отжига.

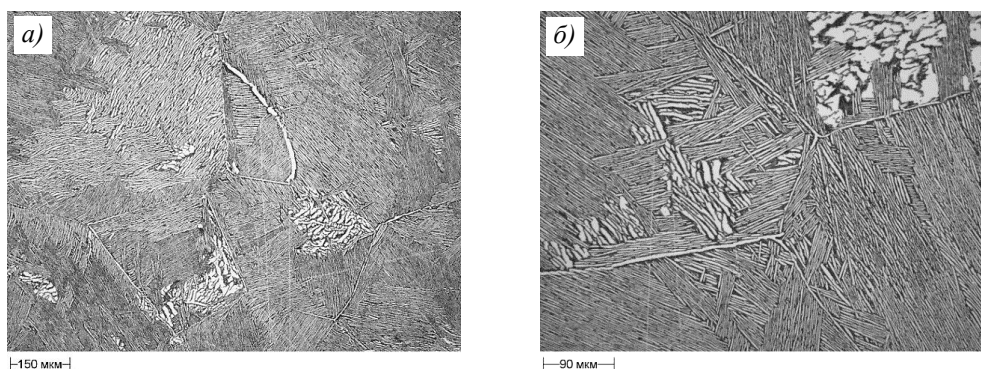


Рис. 4. Микроструктура отливки из сплава ВТ46Л после горячего изостатического прессования и двойного отжига при различных малых увеличениях (оптическая микроскопия)

Изображения микроструктур сплава ВТ46Л в различных состояниях при больших увеличениях, полученные методом растровой электронной микроскопии, приведены на рис. 5.

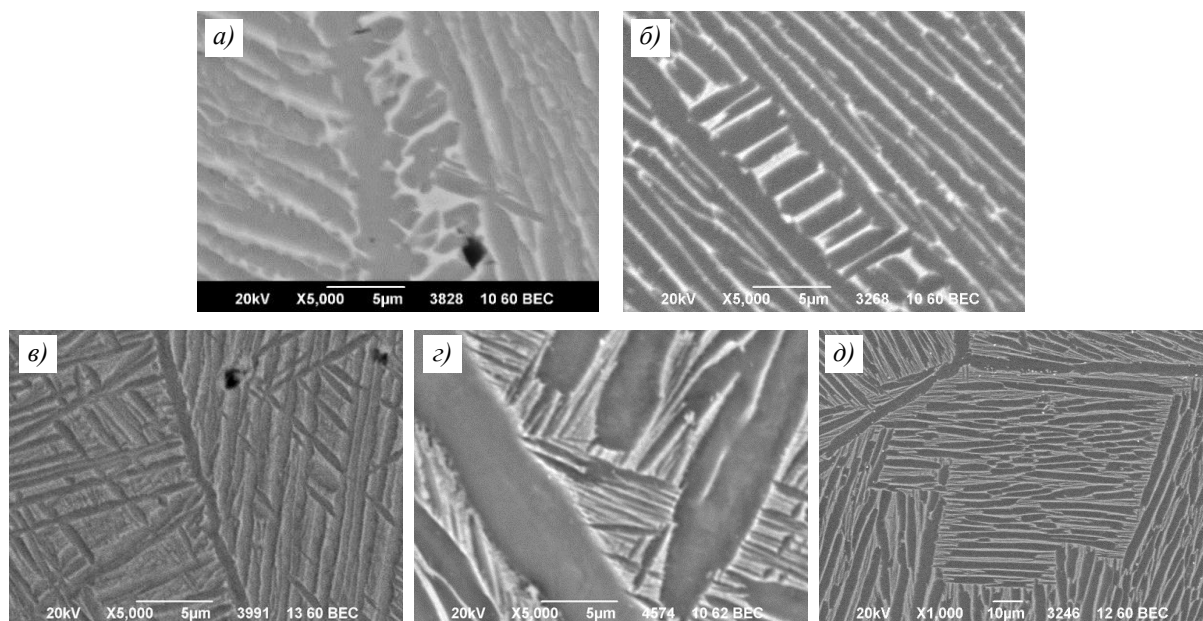


Рис. 5. Микроструктуры отливки из сплава ВТ46Л (РЭМ) при большом увеличении в литом состоянии (а), в литом состоянии + горячее изостатическое прессование (ГИП) + старение (б), в литом состоянии + высокотемпературная ступень отжига (в), в литом состоянии + ГИП + двойной отжиг (з, д)

На фотографиях микроструктуры отливок из сплава ВТ46Л при малых увеличениях видно, что структура крупнозернистая, границы зерен четко различимы, внутризеренная морфология пластинчатая. Внутри каждой колонии пластины имеют одинаковую геометрическую ориентировку, сами колонии различно ориентированы по отношению друг к другу. Толщина первичной α -фазы пластинчатой морфологии (толщина пластин) в литом состоянии составляет около 2–3 мкм (рис. 5, а). Такая структура является типичной для отливок из традиционных (неинтерметаллидных) титановых сплавов [29]. На рис. 5, а, в видна микропористость материала отливки, которая устраняется путем горячего изостатического прессования (ГИП) (рис. 5, б). Скорости охлаждения отливок после ГИП не позволяют получить в сплаве ВТ46Л бипластинчатую микроструктуру, так как газостат не оборудован системой циркуляции инертного газа. Увеличение температуры ГИП до типичных температур обработки на твердый раствор приводит к ухудшению прочностных характеристик материала из-за увеличения размеров структурных составляющих. Снижение уровня прочностных характеристик в результате превращения при нагреве до верхней части двухфазной области $\alpha + \beta \rightarrow \beta + \alpha$ и охлаждении $\beta + \alpha \rightarrow \alpha + \beta$ из-за медленных скоростей охлаждения связано также с перераспределением легирующих элементов внедрения (Si, C). Поэтому в производственных условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ лучшие результаты показывает ГИП при промежуточных температурах, соответствующих температурному интервалу содержания β -фазы 20–50 %. Следует отметить, что посредством ГИП обеспечивается протекание частичной рекристаллизации пластин α -фазы, что хорошо видно при сравнении литого и литого + отожженного состояний (рис. 5, а, в) с состоянием после ГИП и термической обработки (рис. 5, з, д).

На рис. 6 представлены зависимости изменения характеристик механических свойств при растяжении от температуры испытаний для исследованных полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ВТ46Л).

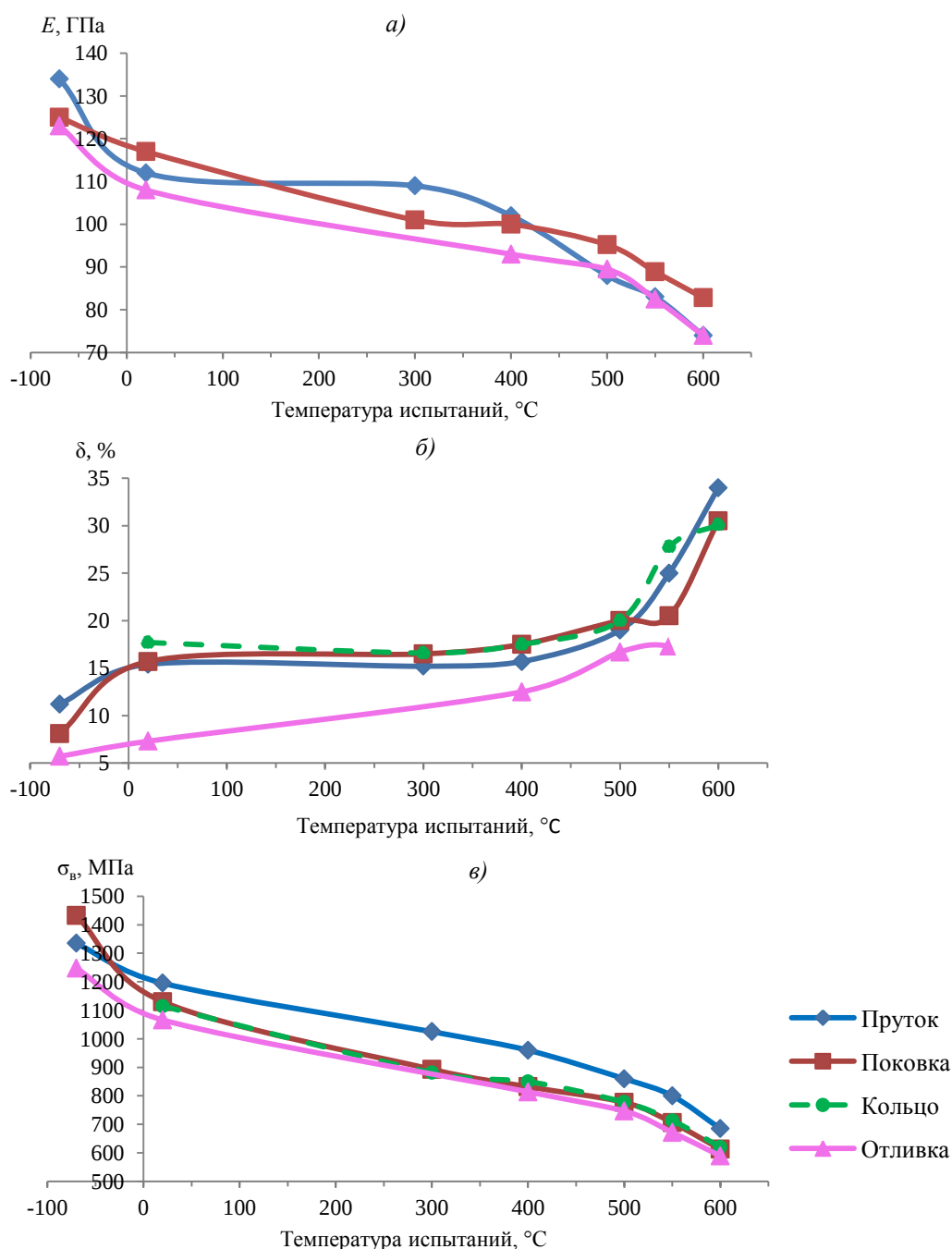


Рис. 6. Модуль упругости (а), относительное удлинение (б) и предел кратковременной прочности (в) полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ВТ46Л) в зависимости от температуры испытаний в диапазоне от -70 до $+600$ °C

Полуфабрикаты из сплава ВТ46 с наиболее мелкозернистой структурой (рис. 6, пруток) демонстрируют преимущество по кратковременной прочности и пластичности материала. При этом тенденция к снижению модуля упругости с ростом температуры для прутков выявляется при несколько меньших температурах испытаний.

Из приведенных данных видно, что отливки из сплава ВТ46Л несколько уступают деформированным полуфабрикатам по прочностным свойствам (рис. 6, а–в). Такая ситуация общеизвестна и обусловлена особенностями технологий изготовления: при многократной деформации зерно измельчается, создавая больше межзеренных

границ, препятствующих движению дислокаций и увеличивающих прочностные свойства. При литье же структура после кристаллизации остается крупнозернистой, размер зерен в основном зависит только от размера сечения самой отливки. Тем не менее исследования и разработка литейных сплавов являются важными направлениями современного материаловедения ввиду ряда преимуществ такой технологии, основным из которых является меньшая стоимость за счет увеличения коэффициента использования металла, уменьшения трудозатрат ввиду отсутствия многоступенчатых операций деформации, а также за счет возможности изготовления гораздо более сложнопрофильных полуфабрикатов, требующих минимальной механической обработки.

Сравнение длительной прочности сплавов ВТ46 (ВТ46Л) со сплавами ВТ9 (ВТ9Л) и ВТ20 (ВТ20Л) за 100 ч при температурах испытаний 500 и 550 °С иллюстрируют соответственно рис. 7, а, б.

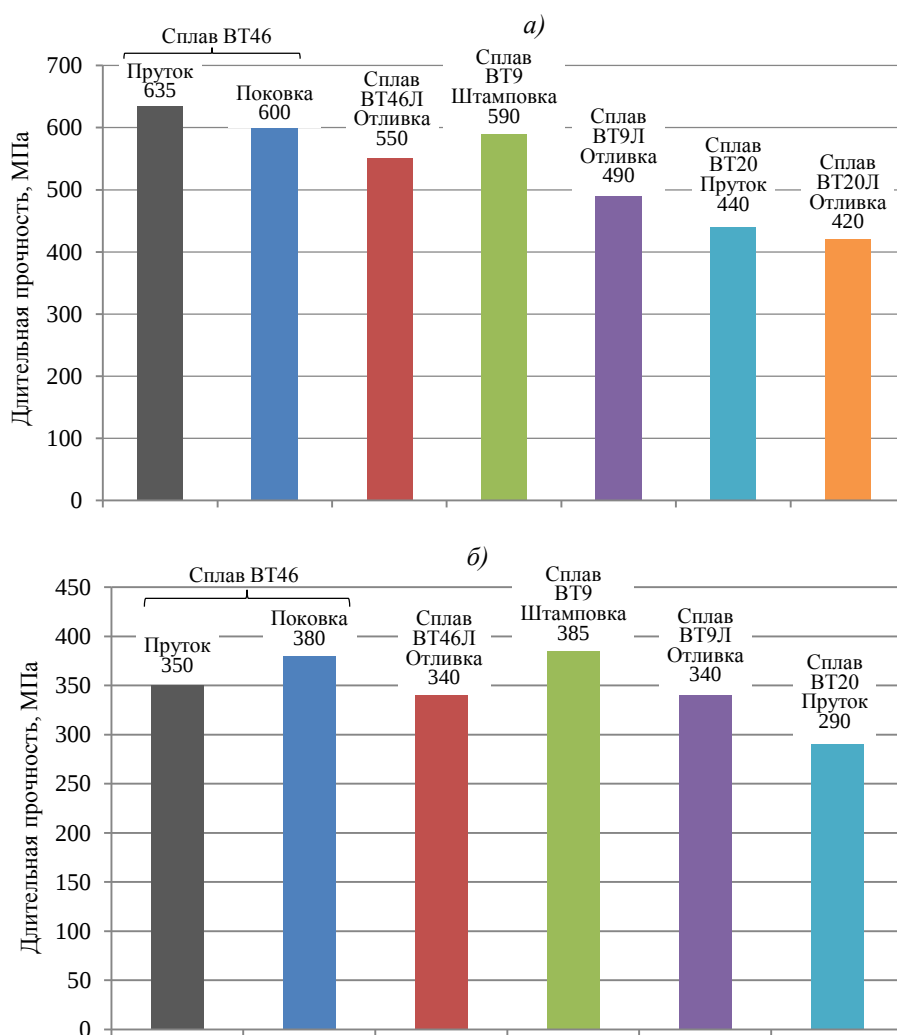


Рис. 7. Длительная прочность жаропрочных титановых сплавов при температурах 500 (а) и 550 °С (б) за 100 ч (средние значения)

Преимущество в прочностных характеристиках прутков из сплава ВТ46 перед другими полуфабрикатами объясняется сохранением преимущества в длительной прочности за 100 ч при температуре испытаний 500 °С (рис. 6, б, в). Отливки из сплава ВТ46Л по длительной прочности при 500 °С занимают промежуточное положение

между штамповками и отливками из сплава ВТ9 (ВТ9Л). При температуре испытаний 550 °С – ситуация изменяется, длительная прочность материала поковок с более крупнозернистой структурой больше, чем у других полуфабрикатов. По уровню длительной прочности при данной температуре поковки и штамповки из сплава ВТ46 сопоставимы с уровнем аналогичной характеристики для двухфазного жаропрочного титанового сплава ВТ9. Длительная прочность отливок из сплавов ВТ46Л и ВТ9Л находится на одном уровне. Отметим, что наиболее жаропрочный титановый сплав, применяемый для изготовления отливок, марки ВТ20Л – значительно уступает по прочностным и жаропрочным характеристикам сплаву ВТ46Л.

Практическое опробование сплава ВТ46 при изготовлении деформируемых полуфабрикатов (кованых и катаных прутков различного сортамента, поковок и штампов, изготовленных на молоте и прессе, цельнокатаных колец), а также отливок показало высокую технологичность материала и стабильность механических свойств в отожженном состоянии. Принципы сочетания твердорастворного и дисперсионного упрочнения, заложенные при разработке сплава, эффективно работают в случае отливок с применением ГИП и термической обработки по режиму двойного отжига. Особенностью термической обработки отливок из сплава ВТ46Л (по сравнению с прутками и штамповками из сплава ВТ46) является более низкая температура первой ступени отжига и более высокая – на второй ступени (рис. 8).

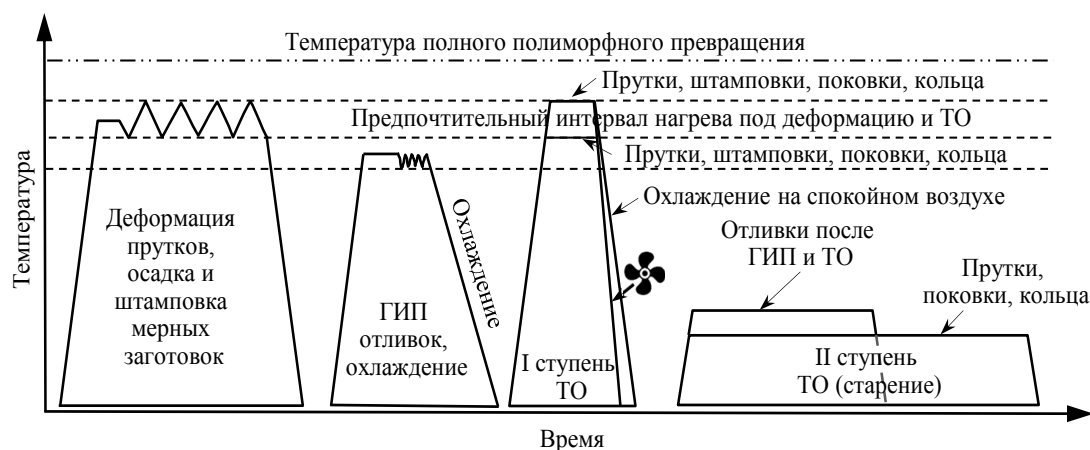


Рис. 8. Схема температурных областей изготовления и термической обработки (ТО) полуфабрикатов из сплава ВТ46 (ГИП – горячее изостатическое прессование)

При сравнении свойств отливок из сплава ВТ46Л с серийным литейным титановым сплавом ВТ20Л и сплавом ВТ9Л, являющимися наиболее жаропрочными литейными титановыми сплавами, становится очевидным преимущество первого (рис. 7, а). Следует сравнить также максимальную рабочую температуру – у сплавов ВТ20Л и ВТ9Л она составляет 500 °С, у сплава ВТ46Л: 550 °С, аналогично сплаву ВТ9Л. Технологические свойства (жидкотекучесть и усадка) для сплава ВТ46Л находятся приблизительно на одном уровне с другими литейными титановыми сплавами (ВТ20Л, ВТ40Л). Отметим, что более сложная композиция сплава ВТ46 (ВТ46Л) обеспечивает большую дисперсность структурных составляющих, снижение размера зерна в отливках (рис. 9) при кристаллизации.

Сравнение зависимости кратковременной прочности от температуры испытаний литейных титановых сплавов иллюстрирует рис. 10.

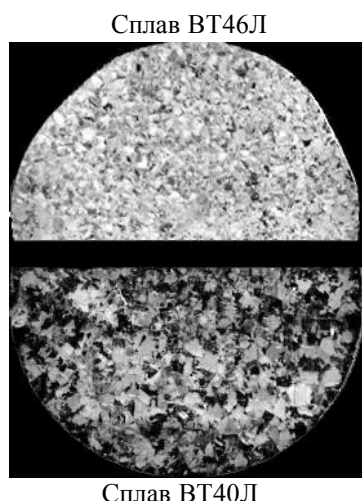
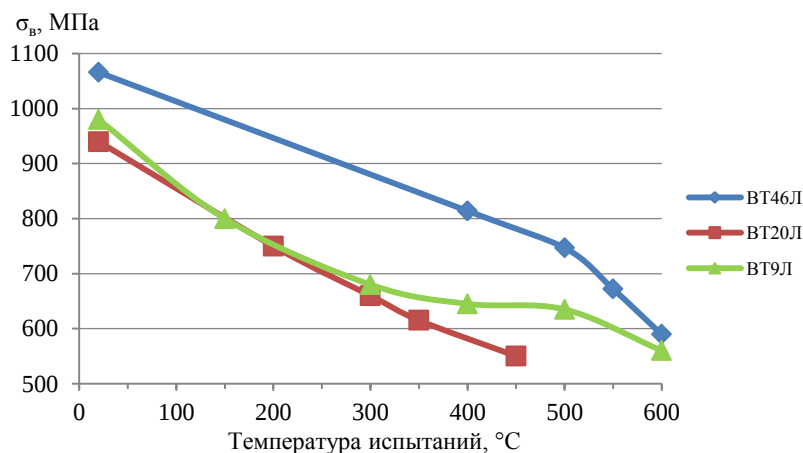
Рис. 9. Макроструктура ($\times 2$) отливок из сплавов ВТ46Л и ВТ40Л

Рис. 10. Предел кратковременной прочности отливок из сплавов ВТ46Л, ВТ20Л и ВТ9Л в зависимости от температуры

Исходя из уровня прочностных свойств, сплав ВТ46Л можно было бы сравнить со сплавом ВТ40Л ($\sigma_b \geq 1030$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 900$ МПа, $\delta \geq 5\%$) [30] – эти сплавы действительно схожи по некоторым параметрам. Например, и в том, и в другом случае в составе в качестве основных легирующих элементов присутствуют кислород и углерод в небольших количествах. Как элементы внедрения они позволяют повысить значения прочностных характеристик и уменьшить ликвацию. Однако сплав ВТ46Л имеет гораздо более высокую рабочую температуру – до 550°C , в то время как сплав ВТ40Л работоспособен при температуре до 300°C .

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан полный цикл производства отливок из сплава ВТ46Л – начиная от выплавки слитков сплава (равномерных по химическому составу) и до изготовления отливок методом вакуумно-индукционной плавки в печи с водоохлаждаемым тиглем с центробежной заливкой с последующей постобработкой. При разработке технологии изготовления учтены все технологические факторы, влияющие на качество конечной отливки, в том числе и склонность к образованию внутренних дефектов усадочного характера. Для устранения таких дефектов существуют следующие способы: тщательный подбор и разработка конструкции литниково-питающей системы, установка прибылей в местах тепловых узлов для «вытягивания» усадочных пор, а также применение ГИП. Литниково-питающая система для каждого наименования

отливок и для каждой печи будет разной, а ГИП – процесс более универсальный, поэтому в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны рекомендации к режимам газостатирования, тщательно подобранные и обеспечивающие диффузионное сращивание усадочных пор. Отметим, что при освоении изготовления отливок на машиностроительных предприятиях, оснащенных газостатами с охлаждением «холодным» инертным газом, возможно совмещение операции ГИП с высокотемпературной ступенью термической обработки. Сниженное в сплаве ВТ46 (ВТ46Л) содержание алюминия, по сравнению со сплавом ВТ20 (ВТ20Л), позволяет проводить операцию ГИП при меньших температурах. Для отливок снижение температуры первой ступени отжига необходимо с точки зрения снижения рисков их коробления. Для снижения толщины дефектного слоя продолжительность выдержки отливок в атмосферной печи должна соответствовать минимальным значениям действующих рекомендаций при термической обработке деформированных полуфабрикатов с учетом величины максимального сечения изделия.

Оценивая зарубежный опыт применения деформируемых полуфабрикатов и отливок из жаропрочных титановых сплавов, нельзя не упомянуть сплав Ti6242 [31, 32], наиболее близким серийным отечественным аналогом которого является сплав ВТ20. В статье [33] сообщается об освоении изготовления отливок сложной геометрической формы в виде объемной фермы (рис. 11).

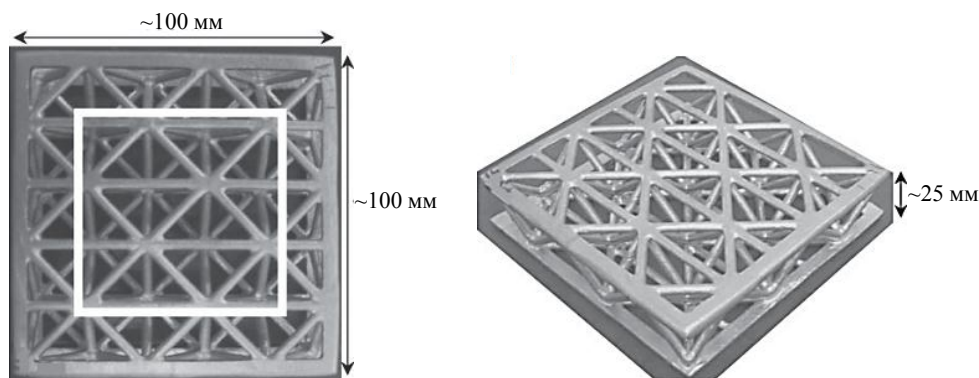


Рис. 11. Отливка из сплава Ti6242

Данные отливки проходят операцию ГИП при температуре 900 °С в течение 2 ч при давлении 103 МПа. В случае необходимости дефекты устраняются подваркой, затем заготовку подвергают отжигу при температуре 730 °С в течение 2 ч, охлаждая с печью. Сообщается, что по сравнению с изготовлением данной заготовки методами аддитивного производства отливка обладает большей прочностью внутренних стоек фермы и сниженной стоимостью. Аналогичные отливки ранее изготавливали из сплава Ti6-4. Для оценки работоспособности испытание при сжатии проводили непосредственно на изделии при комнатной температуре, а также при температурах 315 и 482 °С. Отливки из сплава Ti6242 применяются для изготовления корпуса компрессора двигателя Т406 (Rolls-Royce) [34] в состоянии после ГИП и старения. Исследована возможность полноценной термической обработки отливок после ГИП, отмечена важность обеспечения определенных скоростей охлаждения заготовок после обработки на твердый раствор. После термической обработки с регламентированными скоростями охлаждения (высокой – около 38 °С/мин и низкой – не более 4,5 °С/мин) на отливке из сплава Ti6242 после ГИП и термической обработки получены следующие значения свойств: $\sigma_B^{20^\circ} = 965\text{--}972$ МПа, $\delta = 8\text{--}17\%$, $\psi = 10\text{--}22\%$, $\sigma_B^{400^\circ} = 655\text{--}607$ МПа. В статье [34] также отмечается, что проведение отдельной операции термической обработки отливок позволяет частично нивелировать производственные факторы, связанные с литейным производством. На отливках из сплава ВТ46Л получен значительно более высокий уровень прочностных

характеристик при более низких характеристиках пластичности. Аналогично сплаву Ti6242 для отливок из сплава ВТ46Л возможен индивидуальный подход с корректировкой расчетного состава литой заготовки, а также режимов термической обработки с целью повышения уровня тех или иных механических свойств. Сплав ВТ46 – свариваемый. В условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ опробовано получение сварных соединений методом ручной аргоно-дуговой сварки с применением присадочной проволоки из сплава ВТ20-2св, а также заготовок из листа сплава ВТ46 толщиной 1,0 мм.

С учетом вышесказанного можно рекомендовать деформируемые полуфабрикаты отливок из сплава ВТ46 (ВТ46Л) для опробования в образцах перспективной авиационной техники для деталей, работающих при температуре до 550 °С. Сплав марки ВТ46 рекомендуется для изготовления отдельных роторных и статорных деталей и узлов компрессора газотурбинных двигателей, работающих при температурах до 550 °С, деталей авиационной техники и различных изделий других отраслей промышленности.

Заключения

Проведено комплексное исследование полуфабрикатов из титанового сплава ВТ46 и его литейной модификации ВТ46Л. Оценена микроструктура, прочностные и пластические свойства при различных температурах. Установлено, что прочность отливок из сплава ВТ46Л несколько уступает прочности деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ46, что обусловлено технологией изготовления.

Положительный практический опыт изготовления различных полуфабрикатов – кованных и катаных прутков, поковок кованных и штампованных из сплава ВТ46 – показывает стабильность получения высокого уровня прочностных характеристик. Максимальный уровень кратковременной прочности и усталостной долговечности в интервале рабочих температур, полученный на прутках диаметром до 45 мм, свидетельствует о потенциальной возможности дополнительного повышения этих характеристик для более крупных деформированных полуфабрикатов за счет применения более сложных схем деформации и увеличения суммарной деформации при температурах двухфазной области. Исследование материала штамповки центробежного колеса с сечением под термическую обработку ~100 мм, отожженного с охлаждением на спокойном воздухе, показало достаточную прокаливаемость сплава ВТ46 для обеспечения уровня прочности $\sigma_B^{20^\circ} \geq 1060$ МПа. Применение ускоренного охлаждения на воздухе позволяет увеличить гарантированный и фактический уровень прочности до $\sigma_B^{20^\circ} = 1080\text{--}1220$ МПа при сохранении высоких характеристик пластичности. Таким образом, сплав ВТ46 относительно просто упрочняется путем обдува воздухом при охлаждении с температуры обработки на твердый раствор, что позволяет получать прочность материала на уровне высокопрочных двухфазных титановых сплавов.

Проведен сравнительный анализ свойств отливок из сплава ВТ46Л со свойствами отливок из других литейных титановых сплавов – аналогами по применению. Установлено, что прочностные свойства сплава ВТ46Л превышают свойства литейных жаропрочных титановых сплавов ВТ9Л и ВТ20Л.

Сообщается о разработке полного цикла производства отливок из сплава ВТ46Л в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: от производства слитков сплава до выплавки отливок и их постобработки.

Таким образом, можно сделать вывод о перспективности внедрения отливок из сплава ВТ46Л наравне с деформированными полуфабрикатами из сплава ВТ46 в конструкцию современных образцов авиационной техники.

Список источников

1. Moiseyev V.N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications. New York: CRC Press, 2006. 214 p.

2. Sun Z., Wu H., Ma X. et al. Dependence of Microstructure on Solution and Aging Treatment for Near- β Forged TA15 Ti-Alloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25 (10). P. 4549–4560. DOI: 10.1007/s11665-016-2282-2.
3. Wu H., Sun Z., Cao J., Yin Z. Microstructure and Mechanical Behavior of Heat-Treated and Thermomechanically Processed TA15 Ti Alloy Composites // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28 (2). P. 788–799. DOI: 10.1007/s11665-019-3881-5.
4. Sun Z., Wang X., Zhang J., Yang H. Prediction and control of equiaxed α in near- β forging of TA15 Ti-alloy based on BP neural network: For purpose of tri-modal microstructure // *Materials Science & Engineering*. 2014. Vol. 591. P. 18–25. DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.080.
5. Zhu S., Yang H., Guo L.G., Fan X.G. Effect of cooling rate on microstructure evolution during α/β heat treatment of TA15 titanium alloy // *Materials characterization*. 2012. Vol. 70. P. 101–110. DOI: 10.1016/j.matchar.2012.05.009.
6. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Современные жаропрочные титановые сплавы и перспективы их применения в двигателях. М.: Металлургия, 1974. 448 с.
7. Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Исследование структуры и свойств сплава BT3-1 применительно к технологии получения штамповок дисков и лопаток // *Труды ВИАМ*. 2023. № 8 (126). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.
8. Яковлев М.М., Яруллин Р.Р., Шлянников В.Н. Параметры сопротивления разрушению имитационной модели диска компрессора // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Механика*. 2020. № 3. С. 98–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.10.
9. Петров А.П., Беспалов А.В., Соколов А.В., Шленский А.Г. Горячее гидростатическое выдавливание титановых заготовок в производстве компрессорных лопаток газотурбинных двигателей // *Технология легких сплавов*. 2022. № 1. С. 58–66. DOI: 10.24412/0321-4664-2022-1-58-66.
10. Братан С.М., Рошупкин С.И., Часовитина А.С., Гупта К. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2022. Т. 24. № 1. С. 33–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.
11. Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б. Статистическое сопоставление длительной и кратковременной прочности титановых сплавов при температурах эксплуатации // *Технология легких сплавов*. 2024. № 1. С. 13–22. DOI: 10.24412/0321-4664-2024-1-13-22.
12. Ломакин Е.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю. и др. Моделирование поведения титанового сплава BT20 при ударном взаимодействии // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 1. С. 129–132.
13. Гадалов В.Н., Кутепов С.Н., Филонович А.В. и др. Мониторинг численного моделирования процесса поверхностно-упрочняющей обработки титановых сплавов BT20 и OT4 // *Известия ТулГУ. Сер.: Технические науки*. 2023. № 9. С. 354–358. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-349-350.
14. Солер Я.И., Ши М. Повышение эффективности использования карбидкремниевых абразивных кругов при плоском шлифовании титанового сплава BT20 // *Машиностроение и машиноведение*. 2016. № 8 (115). С. 43–55.
15. Зеньков Е.В. Экспериментальные исследования прочности моделей шатунов автомобильных двигателей из титанового сплава BT20 // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 11 (113). Ч. 1. С. 23–28. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.006.
16. Антипин Н.А., Гецов Л.Б., Гнеденков Е.В. и др. Прочность и трещиностойкость колес центробежных компрессоров // *Газовая промышленность*. 2017. № 11 (760). С. 120–128.
17. Тисарев А.Ю., Василевич Н.М. Исследование влияния неосесимметричных элементов воздушной системы двигателя на параметры потока, температурные поля и деформации деталей ГТД // *Вестник СГАУ*. 2012. № 3 (34). С. 279–284.
18. Макушина М.А., Кочетков А.С., Ночовная Н.А. Литейные титановые сплавы для авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 7 (101). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
19. Кишалов А.Е., Липатов В.Д. Автоматизированное проектирование конструкции основных узлов ТРДДФСМ на примере двигателя семейства АЛ-31Ф // *Вестник УГАТУ*. 2020. Т. 24. № 4 (90). С. 48–56.

20. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., доп. и перераб. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 95 с.
21. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18557/2713-0193-2024-0-4-82-94.
22. Андришкин А.Ю., Комаров К.А., Гуманенко Я.Д. Влияние рабочей температуры на выбор материала оптимальной конструкции силовой стойки летательного аппарата // Аэрокосмическая техника и технологии. 2024. Т. 2. № 4. С. 68–79. DOI: 10.52467/2949-401X-2024-2-4-68-79.
23. Калашников В.С., Решетило Л.П., Чучман О.В., Наприенко С.А. Характеристики прочности и выносливости прутков и штамповок лопаток из серийных жаропрочных титановых сплавов и нового титанового сплава псевдо- α -класса // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
24. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
25. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.
26. Кашапов О.С., Решетило Л.П., Калашников В.С., Павлова Т.В. О влиянии скоростей охлаждения на микроструктуру и свойства жаропрочного титанового псевдо-альфа-сплава при термической обработке на твердый раствор с охлаждением на воздухе // Металлы. 2021. № 6. С. 46–61.
27. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- α -сплава BT46 // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
28. Карачевцев Ф.Н., Алексеев А.В., Летов А.Ф., Дворецков Р.М. Плазменные методы анализа элементного химического состава никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.
29. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
30. Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Влияние различных режимов горячего изостатического прессования и термической обработки на структуру и свойства отливок из сплава BT40L // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.
31. Rajan S., Wanjara P., Gholipour J., Kabir A. Joining of Dissimilar Alloys Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si Using Linear Friction Welding // Materials. 2020. No. 13. P. 3664–3689. DOI: 10.3390/ma13173664/.
32. Kim Y., Jeong H., Park J. et al. Optimizing process parameters for hot forging of Ti-6242 alloy: A machine learning and FEM simulation approach // Journal of Materials Research and Technology. 2023. No. 27. P. 8228–8243. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.193.
33. Li Q., Chen E., Bice D., Dunand D. Mechanical Properties of Cast Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Lattice Block Structures // Advanced engineering materials. 2008. No. 10. P. 939–942.
34. Bashir S., Thomas M.C. Creep and high temperature low cycle fatigue of cast Ti-6Al-2Mo-4Zr-2Sn. Titanium '92 // Science and Technology. The Minerals, Metals and Materials Society, 1993. P. 319–326.

References

1. Moiseyev V.N. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*. New York: CRC Press, 2006, 214 p.
2. Sun Z., Wu H., Ma X. et al. Dependence of Microstructure on Solution and Aging Treatment for Near-b Forged TA15 Ti-Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25 (10), pp. 4549–4560. DOI: 10.1007/s11665-016-2282-2.

3. Wu H., Sun Z., Cao J., Yin Z. Microstructure and Mechanical Behavior of Heat-Treated and Thermomechanically Processed TA15 Ti Alloy Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, vol. 28 (2), pp. 788–799. DOI: 10.1007/s11665-019-3881-5.
4. Sun Z., Wang X., Zhang J., Yang H. Prediction and control of equiaxed α in near- β forging of TA15 Ti-alloy based on BP neural network: For purpose of tri-modal microstructure. *Materials Science & Engineering*, 2014, vol. 591, pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.080.
5. Zhu S., Yang H., Guo L.G., Fan X.G. Effect of cooling rate on microstructure evolution during α/β heat treatment of TA15 titanium alloy. *Materials characterization*, 2012, vol. 70, pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.matchar.2012.05.009.
6. Solonin O.P., Glazunov S.G. *Modern heat-resistant titanium alloys and prospects for their application in engines*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 448 p.
7. Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Investigation of the structure and properties of the VT3-1 alloy in relation to the technology for obtaining stampings of disks and turbine blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-52-63.
8. Yakovlev M.M., Yarullin R.R., Shlyannikov V.N. Parameters of fracture resistance of a simulation model of a compressor disk. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Ser.: Mekhanika*, 2020, no. 3, pp. 98–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.10.
9. Petrov A.P., Bespalov A.V., Sokolov A.V., Shlensky A.G. Hot hydrostatic extrusion of titanium blanks in the production of compressor blades for gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2022, no. 1, pp. 58–66. DOI: 10.24412/0321-4664-2022-1-58-66.
10. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A.S., Gupta K. Influence of relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece during finish grinding on the probability of material removal. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 33–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.
11. Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Belova S.B. Statistical comparison of long-term and short-term strength of titanium alloys at operating temperatures. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2024, no. 1, pp. 13–22. DOI: 10.24412/0321-4664-2024-1-13-22.
12. Lomakin E.V., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu. et al. Modeling the behavior of titanium alloy VT20 under impact interaction. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 1, pp. 129–132.
13. Gadlov V.N., Kutepov S.N., Filonovich A.V. et al. Monitoring of numerical modeling of the process of surface-hardening treatment of titanium alloys VT20 and OT4. *Izvestiya TulGU. Ser.: Tekhnicheskkiye nauki*, 2023, no. 9, pp. 354–358. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-349-350.
14. Soler Ya.I., Shi M. Improving the efficiency of using silicon carbide abrasive wheels in surface grinding of titanium alloy VT20. *Mashinostroyeniye i mashinovedeniye*, 2016, no. 8 (115), pp. 43–55.
15. Zenkov E.V. Experimental studies of the strength of models of connecting rods of automobile engines made of titanium alloy VT20. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2021, no. 11 (113), part 1, pp. 23–28. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.006.
16. Antipin N.A., Getsov L.B., Gnedenkov E.V. et al. Strength and crack resistance of centrifugal compressor wheels. *Gazovaya promyshlennost*, 2017, no. 11 (760), pp. 120–128.
17. Tisarev A.Yu., Vasilevich N.M. Study of the influence of non-axisymmetric elements of the engine air system on flow parameters, temperature fields, and deformations of gas turbine engine parts. *Vestnik SGAU*, 2012, no. 3 (34), pp. 279–284.
18. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Nochovnaya N.A. Cast titanium alloys for aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
19. Kishalov A.E., Lipatov V.D. Automated design of the main units of a turbopan engine using the AL-31F engine family as an example. *Vestnik UGATU*, 2020, vol. 24, no. 4 (90), pp. 48–56.
20. *Aviation materials: reference book in 13 vols.* Ed. E.N. Kablov. 7th ed., add. and rev. Moscow: VIAM, 2010, vol. 6: Titanium alloys, 95 p.
21. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 28.07.2025). DOI: 10.18557/2713-0193-2024-0-4-82-94.

22. Andryushkin A.Yu., Komarov K.A., Gumanenko Ya.D. Influence of operating temperature on the choice of material for the optimal design of the aircraft power strut. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2024, vol. 2, no. 4, pp. 68–79. DOI: 10.52467/2949-401X-2024-2-4-68-79.
23. Kalashnikov V.S., Reshetilo L.P., Chuchman O.V., Naprienko S.A. Strength and reliability of rods and rotor blade stamps made of heat-resistant industrial titanium alloys and modern pseudo- α -titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-13-31.
24. Kablov E.N. Materials and technologies of VIAM for «Aviadvigatel». *Permskie aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
25. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
26. Kashapov O.S., Reshetilo L.P., Kalashnikov V.S., Pavlova T.V. On the influence of cooling rates on the microstructure and properties of heat-resistant titanium pseudo-alpha alloy during solid solution heat treatment with air cooling. *Metally*, 2021, no. 6, pp. 46–61.
27. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Kondrateva A.R. Research of influence of alloying elements content on properties of high strength near alpha heat resistance titanium alloy VT46. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6.
28. Karachevtsev F.N., Alekseev A.V., Letov A.F., Dvoretsov R.M. Plasma methods of nickel alloys elemental chemical composition analysis. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.
29. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of titanium-based alloys and its intermetallic compounds: a tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
30. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. The influence of various modes of hot isostatic pressed and heat treatment on structure and properties of castings from the VT40L alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.
31. Rajan S., Wanjara P., Gholipour J., Kabir A. Joining of Dissimilar Alloys Ti-6Al-4V and Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si Using Linear Friction Welding. *Materials*, 2020, no. 13, pp. 3664–3689. DOI: 10.3390/ma13173664/.
32. Kim Y., Jeong H., Park J. et al. Optimizing process parameters for hot forging of Ti-6242 alloy: A machine learning and FEM simulation approach. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, no. 27, pp. 8228–8243. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.193.
33. Li Q., Chen E., Bice D., Dunand D. Mechanical Properties of Cast Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo Lattice Block Structures. *Advanced engineering materials*, 2008, no. 10, pp. 939–942.
34. Bashir S., Thomas M.C. Creep and high temperature low cycle fatigue of cast Ti-6Al-2Mo-4Zr-2Sn. Titanium '92. *Science and Technology*. The Minerals, Metals and Materials Society, 1993, pp. 319–326.

Информация об авторах

Кашапов Олег Салаватович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Макушина Марина Александровна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Калашников Владимир Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Лаврова Ольга Юрьевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg S. Kashapov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Makushina, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir S. Kalashnikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga Yu. Lavrova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.08.2025.

The article was submitted 21.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.08.2025.

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ФОРМОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ БИСМАЛЕИНИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

А.В. Начаркина¹, И.В. Зеленина¹, А.В. Смирнов¹, А.С. Бойчук¹

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

Аннотация. Проведено исследование структуры и физико-механических характеристик высокотемпературного углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, полученного различными методами формования: автоклавным, прессовым и вакуумным. Приведены результаты исследований полученных образцов методами неразрушающего контроля, такими как ультразвуковой эхо-импульсный метод и метод рентгеновской компьютерной томографии, которые позволили количественно оценить пористость. Проведено также сравнение прочностных характеристик и уровня их сохранения при повышенных температурах испытаний.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы (ПКМ), бисмалеинимидные углепластики, методы формования, структура, пористость, неразрушающие методы контроля

Для цитирования Начаркина А.В., Зеленина И.В., Смирнов А.В., Бойчук А.С. Влияние метода формования на структуру и свойства углепластика на основе бисмалеинимидного связующего // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49.

Scientific article

INFLUENCE OF THE MOLDING METHOD ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS BASED ON BISMALIMIDE BINDER

A.V. Nacharkina¹, I.V. Zelenina¹, A.V. Smirnov¹, A.S. Boychuk¹

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 presents the study of the structure, physical and mechanical properties of high-temperature carbon fiber based on bismaleinimide binder, obtained by various methods of molding: autoclave, press and vacuum. The study results of samples obtained by non-destructive testing methods, such as ultrasonic echo-pulse method and X-ray computed tomography method, which allowed to estimate quantitative values of porosity. Also, the comparison of strength characteristics and the level of their preservation at elevated test temperatures have been conducted.

Keywords: polymer composite materials (PCMs), bismaleinimide carbon fiber reinforced plastics, molding methods, structure, porosity, non-destructive testing methods

For citation: Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Smirnov A.V., Boychuk A.S. Influence of the molding method on the structure and properties of carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binder. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49.

Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) составляют >50 % в конструкциях гражданских самолетов последнего поколения. Их широкое распространение в такой сложной области, как авиационная, объясняется множеством преимуществ, которыми они обладают [1, 2], – первую очередь, низкой плотностью, что позволяет облегчить конструкции, при этом повысить производительность и снизить расход топлива. Кроме того, ПКМ устойчивы к усталостным нагрузкам и коррозии. Детали из ПКМ могут изготавливаться из заготовок, форма которых очень близка к их окончательной форме. Это снижает потребность в механической обработке и уменьшает потери материала, позволяя таким образом получать достаточно большие элементы, что уменьшает количество соединений (клепки или болты) в конструкции.

Одно из направлений развития применения ПКМ в авиационных конструкциях касается введения деталей из них в горячие зоны, где они должны выдерживать высокие температуры в течение всего срока эксплуатации. Среди высокотемпературных материалов, удовлетворяющих этому критерию, ПКМ на основе полиимидных, бисмалеинимидных, фталонитрильных и других термостойких связующих нашли применение в авиационных конструкциях, в том числе в элементах мотогондол двигателей, эксплуатируемых при повышенных температурах от 200 до 350 °С [3–6].

Несмотря на то что активное использование композиционных материалов привело к динамичному развитию их массового производства, снижению стоимости сырья и расходных материалов, ПКМ с высокими эксплуатационными характеристиками остаются довольно дорогостоящими в производстве.

Самым распространенным методом изготовления изделий из ПКМ изначально являлся прямой прессовый, который реализуется на специальных прессах (главным образом гидравлических или реже – пневматических) в обогреваемых пресс-формах. С развитием технологий на смену прессовому методу формования пришло автоклавное. В настоящее время в большинстве коммерческих самолетостроительных компаний для производства композиционных конструкций используются автоклавы, которые могут обеспечить высокие давление, вакуум и конечные температуры при изготовлении изделий из ПКМ [7, 8]. Полученные таким методом изделия, как правило, обладают низкой пористостью и высоким уровнем физико-механических свойств, но для этого необходимы повышенные капиталовложения в оборудование, а также высокие эксплуатационные расходы. Альтернативой являются безавтоклавные технологии, которые позволяют снизить затраты на производство изделий из ПКМ и изготавливать изделия с использованием только давления вакуума для обеспечения низкопористой структуры таких материалов, тем самым устраняя необходимость покупки и эксплуатации дорогостоящих прессов или автоклавов [9–11]. Следует учитывать, что для данного метода связующее должно обладать необходимыми реологическими характеристиками и способностью формировать структуру матрицы без избыточного давления.

Углепластики на основе бисмалеинимидных связующих – перспективный класс высокотемпературных ПКМ, демонстрирующих стабильную работоспособность в температурном диапазоне 200–250 °С. Матрица бисмалеинимидного углепластика характеризуется высокой степенью сшивки, что определяет термическую стабильность и высокие показатели механических характеристик материала.

Широкое применение бисмалеинимидных связующих объясняется несколькими факторами. Во-первых, компоненты для их производства легкодоступны и разнообразны. Во-вторых, их можно модифицировать различными компонентами, улучшая свойства или добавляя новые характеристики. Благодаря этим преимуществам бисмалеинимидные связующие и материалы на их основе нашли применение во многих промышленных областях.

Технологические особенности этих материалов делают их удобными в производстве. Они обладают хорошей текучестью даже при относительно низких температурах обработки и не образуют побочных продуктов при отверждении. Это позволяет использовать различные методы формования: от традиционного автоклавного процесса с применением препрега до альтернативных технологий. Для производства ПКМ без использования автоклава (например, с помощью вакуумной инфузии) создаются специализированные бисмалеинимидные композиции, адаптированные для конкретных технологических процессов [12–19].

Данная статья посвящена исследованию свойств высокотемпературного углепластика на основе бисмалеинимидного связующего и равнопрочной углеродной ткани, а также сравнению характеристик углепластика, изготовленного различными методами формования: автоклавным, прессовым и вакуумным.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Объекты исследования – образцы углепластика из препрега на основе термореактивного бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 расплавного типа и равнопрочной углеродной ткани марки ВТкУ-5 с поверхностной плотностью 200 ± 10 г/м², изготовленные различными методами формования.

Для термического анализа препрега использовали методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по ГОСТ Р 56755–2015 и термомеханического анализа (ТМА) по ММ 1.595-11-138–2005.

Неразрушающий контроль [20] плит углепластика проводили на ультразвуковой иммерсионной установке при использовании фокусированного иммерсионного преобразователя с центральной частотой 5 МГц, диаметром пьезопластины 0,5 дюйма (1,27 см) и фокусным расстоянием 1,5 дюйма (3,81 см), а также методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ).

Определение температуры стеклования образцов углепластика проводили по ГОСТ Р 56753–2015 методом динамического механического анализа в режиме трехточечного изгиба в атмосфере аргона, со скоростью нагревания 5 °С/мин и при осциллирующей нагрузке с частотой 1 Гц.

По методу гидростатического взвешивания по ГОСТ Р 57713–2017 определяли плотность образцов углепластика, а по ГОСТ Р 56682–2015 (метод 2) – толщину монослоя и массовую долю связующего.

Объемную долю пор в углепластике определяли несколькими методами: с помощью РКТ согласно ТР 1.2.2883–2020, а также расчетным методом, исходя из весового содержания и плотности связующего ($C_{св}$, %; $\rho_{св}$, г/см³) и наполнителя (C_n , %; ρ_n , г/см³) по формуле:

$$\Pi = 100 - V_{св} - V_n,$$

где $V_{св}$ – объемное содержание связующего, % ($V_{св} = \frac{\rho_{углепластик}}{\rho_{наполнитель}} C_{св}$); V_n – объемное содержание

наполнителя, % ($V_n = \frac{\rho_{углепластик}}{\rho_{наполнитель}} C_n$).

Определение механических характеристик проводили при испытаниях на растяжение (ГОСТ Р 56875–2016), сжатие (ГОСТ Р 56812–2015), изгиб (ГОСТ Р 56805–2015) и межслойный сдвиг (ГОСТ 32659–2014) при комнатной 23 ± 3 °С и повышенных (220 и 250 °С) температурах.

Результаты и обсуждение

Для сравнительной оценки различных способов формования (автоклавный, прессовый, вакуумный) по расплавной технологии на пропиточной машине изготовили две партии препрега на основе термореактивного бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 и равнопрочной углеродной ткани марки ВТкУ-5. Из полученного препрега, используя различные способы формования, изготовлены образцы углепластика ВСТ-71/ВТкУ-5 для проведения дальнейших исследований.

Для определения основных температурно-временных параметров формования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего методами термического анализа проведено исследование реакционной активности связующего в составе препрега – определены параметры отверждения связующего (методом ДСК) и время гелеобразования (методом ТМА). Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Реакционная активность связующего в составе препрега углепластика ВТкУ-5/ВСТ-71

Характеристика	Значения характеристик
Температурный интервал отверждения, °С	
– начало	110±10
– окончание	290±10
Температура начала активной реакции отверждения, °С	135±10
Температура пика реакции отверждения, °С (пик ДСК)	255±5
Нормированный тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	140±15
Время гелеобразования связующего в препреге, мин (после температуры 120 °С в течение 60 мин)	7,0±0,5

Исследованный методами ДСК и ТМА процесс отверждения бисмалеинимидного связующего ВСТ-71 в составе препрега, протекающий в интервале температур от 110±10 до 290±10 °С, позволяет реализовать отверждение углепластика на его основе любым способом формования – как прессовым, так и автоклавным или вакуумным. Исходя из полученных данных реакционной активности связующего в составе препрега, определены основные температурно-временные параметры формования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71, составлены и опробованы различные режимы изготовления плит углепластика, отличающиеся температурно-временными параметрами стадий отверждения, временем и температурой подачи давления и обусловленные типом применяемого оборудования (автоклав, пресс, вакуумный шкаф).

Для дальнейших исследований отобраны плиты углепластика, полученного различными способами формования, с одинаковой массовой долей связующего 33,5–34,0 % и толщиной монослоя 0,203–0,205 мм.

На рис. 1 представлено оборудование, используемое для изготовления углепластиков, а также показана сборка пакетов углепластика, отличающихся тем, что в прессовом методе собирается простой однослойный пакет, упакованный в высокотемпературную пленку, а для автоклавного и вакуумного методов собирается герметичный вакуумный мешок с дополнительным дренажным слоем:

– автоклав на рабочую температуру до 250 °С и собранный герметичный вакуумный пакет препрега углепластика с дренажным слоем и с подключенными штуцерами на столе в автоклаве;

– пресс гидравлический на рабочую температуру до 250 °С и собранный пакет препрега углепластика между обогреваемыми плитами пресса;

– термошкаф на рабочую температуру до 250 °С и собранный герметичный вакуумный пакет препрега углепластика с дренажным слоем со штуцерами, подключенными к вакуумному насосу.

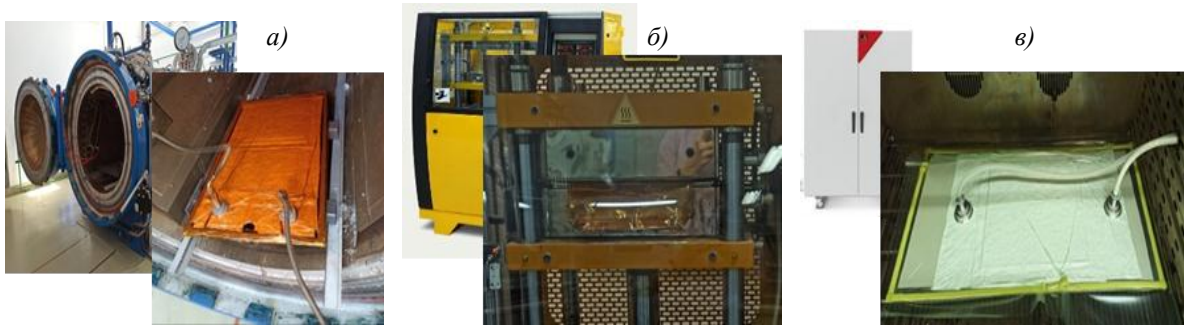


Рис. 1. Оборудование и пакеты препрега углепластика при формировании автоклавным (а), прессовым (б) и вакуумным (в) методами

При производстве ПКМ нередко возникают различные изъяны, которые классифицируются по размеру на три основные категории: микро-, мини- и макродефекты.

Микродефекты представляют собой структурные нарушения, линейные размеры которых находятся в том же порядке величины, что и поперечные размеры армирующих волокон. Данная категория включает микротрещины, мелкие пустоты, посторонние включения, нарушения структуры матрицы между отдельными волокнами.

Минидефекты (разориентация волокон, искривления, вмятины, царапины и т. п.) и макродефекты (трещины, надрезы, раковины и т. п.) достаточно легко обнаруживать при помощи стандартного ультразвукового контроля либо визуально, если они расположены на поверхности материала. Одним из распространенных дефектов в ПКМ (в частности, в углепластике) является пористость, относящаяся к микродефектам и отрицательно влияющая на упруго-прочностные свойства, особенно на устойчивость к сжатию и прочность при межслойном сдвиге [21].

Наиболее часто встречающийся микродефект – пористость, ухудшающая прочностные свойства материала, которая представляет собой разного размера пустоты, образующиеся по различным причинам: будь то плохо удаленный при пропитке воздух или влага из межволоконного или межнитевого пространства наполнителя, наличие летучих продуктов, образовавшихся при пропитке или последующем отверждении связующего. Наличие или отсутствие пористости напрямую зависит от технологии переработки препрега [22].

Плиты углепластика, полученного различными методами формования, исследовали при помощи неразрушающего метода контроля – ультразвукового эхоимпульсного метода [23, 24]. По результатам контроля получены карты амплитуд донных эхо-сигналов (С-сканы), где цвету от фиолетового до красного соответствует амплитуда эхо-сигнала от 0 до 100 % (рис. 2).

По результатам неразрушающего контроля установлено, что все представленные методы формования позволяют получить образцы углепластика без дефектов и нарушений структуры. Однако по изображениям С-сканов можно видеть и отличия полученных плит. По переходу цвета от красного к синему (рис. 2, в) наблюдается уменьшение амплитуды сигнала, что позволяет судить об увеличении пористости по краям плиты углепластика, полученного с помощью вакуумного метода формования. В данном методе отсутствует внешнее давление, которое равномерно распределяется по площади, как в случае автоклавного и прессового метода формования.

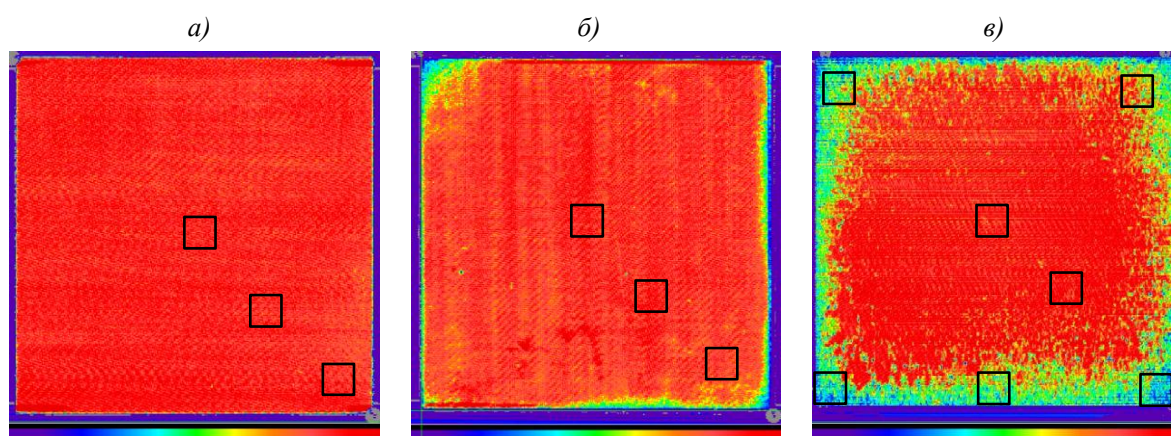


Рис. 2. С-сканы плит углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, изготовленного автоклавным (а), прессовым (б) и вакуумным (в) методами формования

Ультразвуковым эхо-импульсным методом можно качественно оценить исследуемый материал и (или) обнаружить дефекты структуры. Для количественной оценки пористости использован метод РКТ для определения объемной доли пористости [25–27]. Для этого на полученных С-сканах (рис. 2) выбраны несколько зон размером 30×30 мм с разными значениями амплитуд донных эхо-сигналов, изготовлены соответствующие образцы, на которых проведено определение фактической объемной доли пористости расчетным методом (табл. 2).

Таблица 2

Пористость углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, полученного автоклавным, прессовым и вакуумным методами формования, определенная методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ)

Способ изготовления	Исследуемая зона по С-скану	Томограмма поперечного сечения	Плотность, г/см ³	Объемная доля пор, %	
				расчетная	по данным РКТ
Автоклавное формование			1,557	0,03–0,05	0
Прессовое формование			1,556	0,08–0,12	0,01
Вакуумное формование			1,555	0,07–0,10	0,08
			1,553	1,22–1,34	1,52
			1,552	1,36–1,62	1,84
			1,548	2,08–2,31	2,83

Уникальность метода РКТ состоит в том, что при контроле исследуемых образцов повышается информативность результатов контроля, появляется возможность проводить оценку объемной доли пористости как на отдельных участках, так и по всему объему объекта контроля (исследуемых образцов углепластиков). В результате проведения РКТ получают объемную трехмерную модель исследуемого объекта посредством сшивания в единый массив множества проекций.

Проведение РКТ и оценку объемной доли пористости в вырезанных образцах углепластика осуществляли в соответствии с ТР 1.2.2883–2020 на рентгеновском компьютерном томографе. На рис. 3 представлены томограммы поперечного сечения образцов углепластика на основе препрега ВСТ-71/ВТкУ-5, полученного автоклавным, прессовым и вакуумным методами формования.

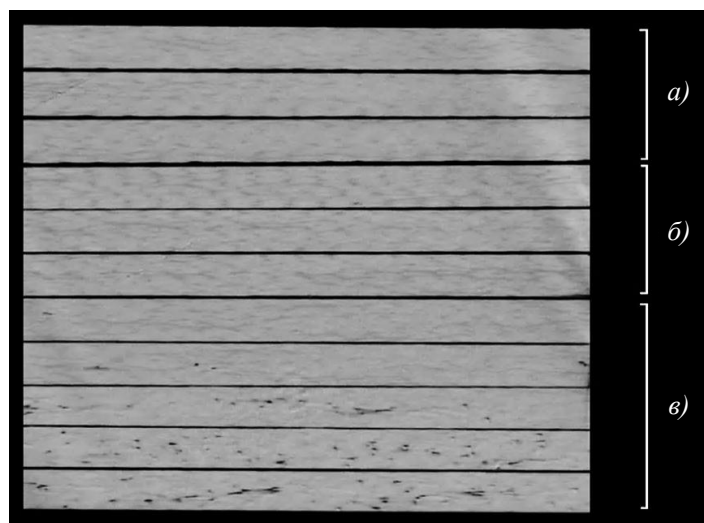


Рис. 3. Томограммы поперечного сечения образцов углепластика из препрега ВСТ-71/ВТкУ-5, полученного автоклавным (а), прессовым (б) и вакуумным (в) методами формования

Один из этапов обработки томограмм – получение значений среднего уровня серого и стандартного отклонения. В каждом образце выбирали фрагмент как без дефектов, так и с наибольшим количеством наиболее часто встречающихся дефектов, который подвергали статистическому анализу.

По результатам РКТ определили, что значения объемной доли пористости в исследуемых объектах контроля напрямую зависят от метода получения образцов углепластика. На рис. 4 представлены изображения поперечного сечения томограмм образцов, на которых прослеживается изменение плотности распределения пор в зависимости от метода получения образцов углепластика.

При сравнении результатов, представленных в табл. 2, выявлено, что плотность образцов углепластика, полученных различными методами (образцы отобраны в красной зоне на С-скане), отличаются незначительно, пористость при этом минимальная $<0,1\%$ (по данным РКТ) и не больше $0,12\%$ (полученная расчетным способом).

Различия при определении пористости расчетным методом и методом РКТ можно объяснить тем, что для увеличения точности подсчет пористости методом РКТ осуществляли на образцах гораздо меньшего размера (10×5 мм). Несмотря на отличия в значениях пористости, полученных расчетным методом и определенных по томограммам образцов, существует общая корреляция между ними, а также с результатами, полученными при исследовании плит углепластика с помощью ультразвукового контроля.

Несмотря на видимый краевой эффект, наблюдаемый при вакуумном формовании и не превышающий 20 мм по периметру плиты (рис. 2, в), где наблюдается увеличенная доля пористости, можно говорить о пригодности данного метода формования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего ВСТ-71, так как существуют различные технологические приемы для устранения данного эффекта [28–31].

Проведены также исследования температуры стеклования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71, изготовленного разными методами формования. На рис. 4 приведены термограммы углепластика.

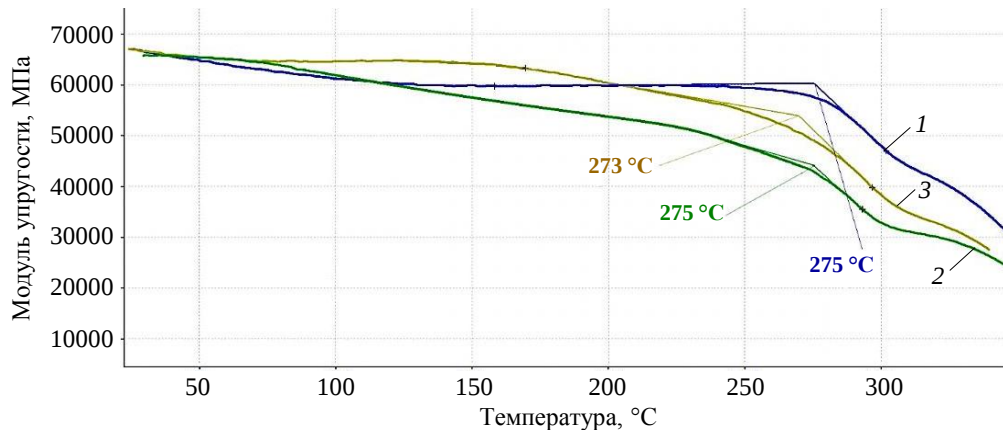


Рис. 4. Термограммы динамического механического анализа углепластиков, изготовленных автоклавым (1), прессовым (2) и вакуумным (3) методами формования

Видно, что температура стеклования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 практически не зависит от способа формования и составляет 273–275 °C.

Другим немаловажным свойством любого материала, характеризующим его структуру и зависящим от технологии изготовления, является устойчивость к воде и влаге. Особенно это важно для полимеров, чувствительных к воздействию влаги, к которым относятся бисмалеинимидные композиции [32, 33]. На рис. 5 приведены данные водопоглощения углепластиков на основе связующего марки ВСТ-71, изготовленных разными методами формования.

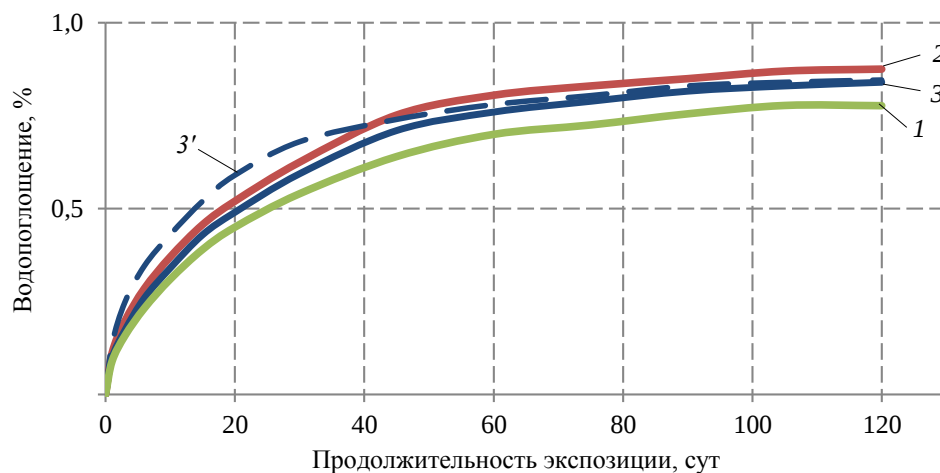


Рис. 5. Водопоглощение углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, изготовленного автоклавым (1), прессовым (2) и вакуумным (3, 3') методами формования

Равновесное водопоглощение достигается через 60–70 сут. У углепластиков, полученным автоклавным методом, водопоглощение составило 0,78 %, прессовым методом 0,88 %, а вакуумным 0,83 %. Характер кривых показывает, что скорость поглощения воды у образцов, полученных разными методами, практически одинаковая. В течение первых 25 сут наблюдается наибольшая скорость водонасыщения, которая составляет 0,5–0,6 %. Отдельно следует отметить образцы, полученные вакуумным методом, отобранные с края плиты с повышенной пористостью. Несмотря на пористость, равновесное водопоглощение для данных образцов составляет 0,84 %, а повышенная пористость влияет только на начальную скорость водопоглощения, что видно по характеру кривой (рис. 5, кривая 3').

Все три метода формования позволяют получить углепластик достаточно высокого качества, что также подтверждают результаты исследования прочностных характеристик углепластика, полученного разными методами, которые представлены в табл. 3 и на рис. 6.

Таблица 3

Механические свойства углепластиков на основе бисмаленимидного связующего, полученного прессовым, автоклавным и вакуумным методами формования

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств для углепластика, полученного методом формования		
		автоклавным	прессовым	вакуумным
Предел прочности при растяжении, МПа	23±3	875	870	865
	220	890	880	865
	250	880	870	860
Модуль упругости при растяжении, ГПа	23±3	76	76	73
Предел прочности при сжатии, МПа	23±3	750	780	735
	220	580	580	570
	250	520	–	–
Предел прочности при изгибе, МПа	23±3	1120	1150	1130
	220	1010	970	990
	250	900	870	890
Модуль упругости при изгибе, ГПа	23±3	76	70	65
	220	78	73	68
	250	79	72	66
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	23±3	72	65	57
	220	50	43	36
	250	45	–	–

По результатам исследования прочностных характеристик установлено, что образцы углепластика, полученного различными методами, находятся на одном уровне по прочности при растяжении, сжатии и изгибе. Разброс значений прочности образцов углепластика, полученного разными методами, при температуре испытаний 23±3 °С составляет не более 6 %, что не считается значительной разницей и входит в допустимый разброс значений в выборке для испытаний. Следует отметить отличия, полученные в значениях прочности при межслойном сдвиге: наилучшие результаты показывают образцы, изготовленные автоклавным методом формования. Образцы, полученные вакуумным методом, по значениям прочности при сдвиге уступают образцам, изготовленным автоклавным методом – на 21 %, а прессовым методом – на 12 %.

На рис. 6 приведены диаграммы сравнения прочностных характеристик углепластика, полученного разными методами формования, а также уровень сохранения прочности при повышенной температуре испытаний 220 °С.

По значениям сохранения прочности при повышенной температуре испытаний углепластики находятся на одном уровне независимо от метода получения. Разброс сохранения прочности при температуре 220 °С составляет не более 6 %. Учитывая уровень сохранения прочностных характеристик при повышенной температуре испытаний, можно сделать вывод, что свойства бисмалеинимидной матрицы реализованы в углепластике независимо от метода формования. Сохранение прочности при растяжении при температуре испытаний 220 °С составляет 100 %, а при статическом изгибе 84–90 %. Такие характеристики, как сжатие и межслойный сдвиг, которые в большей степени характеризуют уровень термостойкости именно матрицы в образцах углепластика, показали сохранение прочности при сжатии 74–78 %, а при межслойном сдвиге 63–69 %.

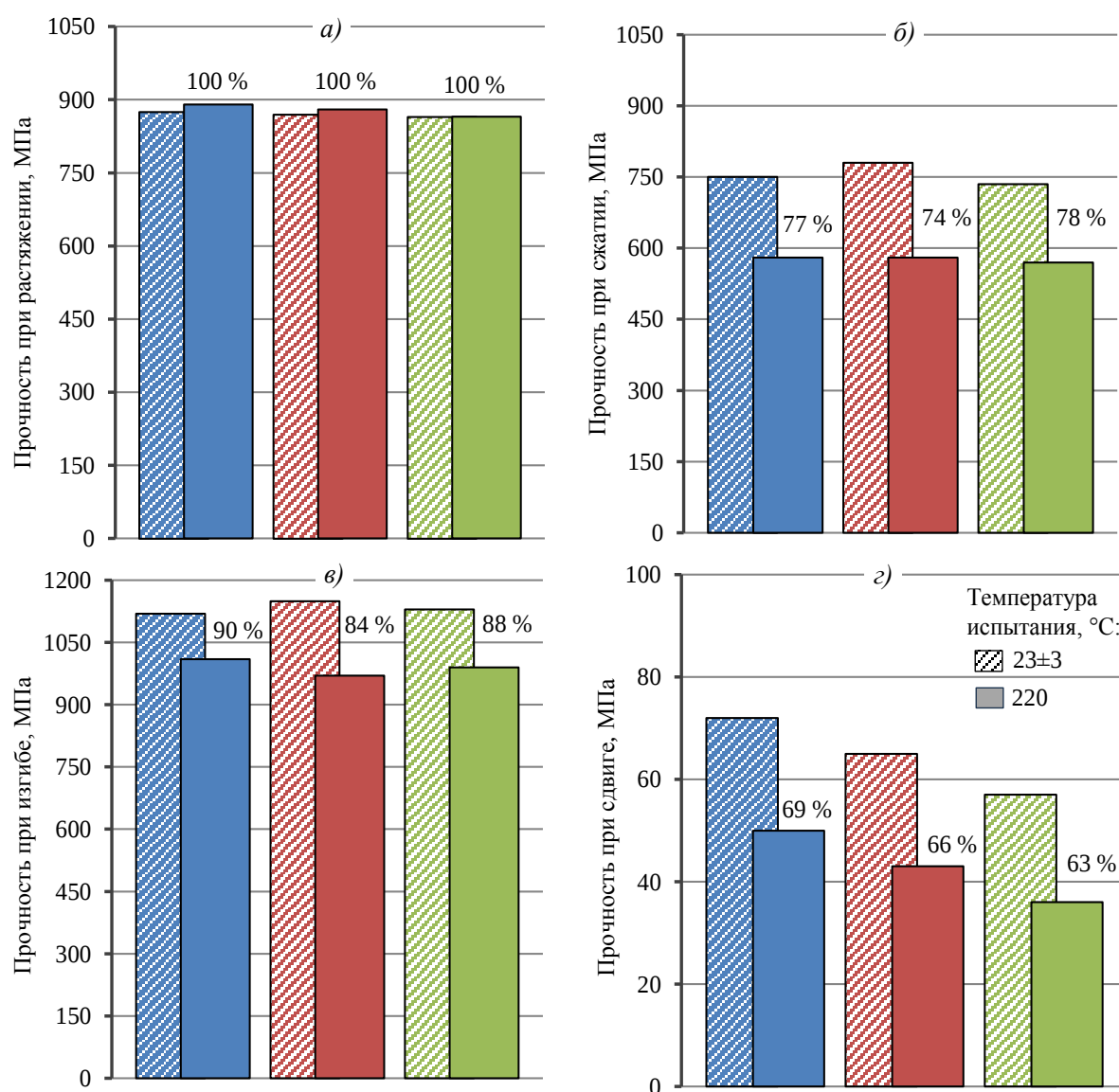


Рис. 6. Прочность и ее сохранение при растяжении (а), сжатии (б), изгибе (в) и межслойном сдвиге (г) для углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, изготовленного автоклавным (■), прессовым (■) и вакуумным (■) методами формования

Заключения

В данной работе проведены экспериментальные исследования по получению углепластика различными методами формования: автоклавным, прессовым и вакуумным. Полученные углепластики исследованы методами неразрушающего контроля, которые позволили определить объемную долю пор – менее 0,1 % (для образцов углепластика, полученного вакуумным формованием в красной зоне по C-скану). Исследованы также другие физические характеристики углепластика, полученного разными методами, которые имеют одинаковый уровень значений независимо от метода формования: содержание связующего 33–34 %, плотность 1,555–1,557 г/см³, температура стеклования 273–275 °С, водопоглощение 0,78–0,88 %. При исследовании упруго-прочностных характеристик установлено, что образцы углепластика, полученного различными методами, находятся на одном уровне по прочности при растяжении, сжатии и изгибе. Уровень сохранения прочности при повышенной температуре испытаний 220 °С составил при испытаниях: на растяжение 100 %, на сжатие 84–90 %, на изгиб 74–78 %, при межслойном сдвиге 63–69 %.

В плитах углепластика, изготовленных вакуумным методом, несмотря на присутствие краевого эффекта и повышенную пористость до 2,8 % на расстоянии 1,5–2 см от края плиты, при испытании образцов из центральной зоны с минимальными значениями пористости получены характеристики на уровне характеристик для углепластиков, полученных автоклавным и прессовым методами формования. Существуют разные технологические приемы для устранения данного эффекта, и в дальнейшем будут продолжены работы для получения бездефектного углепластика вакуумным методом формования.

Проведенная работа показала, что углепластик на основе бисмалеинимидного связующего ВСТ-71, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, можно изготавливать разными методами формования. Автоклавный и прессовый методы позволяют обеспечить получение монолитной, бездефектной и минимально пористой структуры, а также получить высокий уровень свойств разработанного материала. Термостойкий углепластик ВСТ-71/ВТкУ-5 предназначен для эксплуатации при температурах до 220 °С.

Список источников

1. 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.
2. ВИАМ 90 лет: гордимся прошлым, создаем будущее / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. 155 с.
3. 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). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Kablov E.N. New generation materials and technologies for their digital processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
5. Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Сидорина А.И., Славин А.В. Высокотемпературные углепластики на основе полиимидных связующих // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-71-88.
6. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.

7. Xu X., Peng G., Zhang B. et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review // *Thin-Walled Structures*. 2025. Vol. 209. Art. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
8. Hubert P., Fernlund G., Poursartip A. Autoclave processing for composites // *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. P. 414–434.
9. Бычкова Е.В., Борисова Н.В., Панова Л.Г. Технология переработки полимеров методами прессования и литья под давлением: учеб. пособие. Саратов; М.: Профобразование; Ай Пи Ар Медиа, 2021. 97 с.
10. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
11. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 834–839.
12. Evsyukov S., Klomp-de Boer R., Stenzenberger H.D. et al. A new m-xylylene bismaleimide-based high performance resin for vacuum-assisted infusion and resin transfer molding // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. P. 3063–3072.
13. Бабкин А.В., Эрдни-Горяев Э.М., Солопченко А.В., Кепман А.В. Инфузионные бисмалеимидные связующие для полимерных композиционных материалов // *Химия и химическая технология*. 2015. № 58. С. 54–57.
14. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Кудрявцева А.Н. Применение бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57 для получения теплостойких размеростабильных оснасток из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
15. BMI resin formulation for carbon fiber reinforced composite material, method for making it and BMI prepreg; pat. WO 2022120049; appl. 02.12.21; publ. 09.06.22.
16. Fischer G. High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics. Materials. Université de Lyon, 2015 // HAL archives-ouvertes; офиц. сайт. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (дата обращения: 18.07.2025).
17. Iredale R.J., Ward C., Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides // *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 69. P. 1–21.
18. Wu T., Jiang P., Zhang X. et al. Additively manufacturing high-performance bismaleimide architectures with ultraviolet-assisted direct ink writing // *Materials and Design*. 2019. Vol. 180. P. 107947.
19. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Савицкий Р.С. Подход к выбору технологического режима изготовления ПКМ // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.
20. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 3. С. 20–33.
21. Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты в полимерных слоистых композиционных материалах // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер.: Технические науки*. 2017. № 2 (42). С. 79–89.
22. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
23. Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Определение пористости в монолитных деталях и агрегатах крыла самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхо-импульсного метода // *Дефектоскопия*. 2019. № 1. С. 3–9.

24. Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Особенности определения пористости в деталях из ПКМ с применением ультразвукового эхо-импульсного метода контроля // Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: мат. X Всерос. конф. «ТестМат». М.: ВИАМ, 2018. С. 65–79.
25. Косарина Е.И., Демидов А.А., Михайлова Н.А., Смирнов А.В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную информацию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.
26. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
27. Ветошкин С.В., Долгодворов А.В., Сыромятникова А.И. Исследование объемной микроструктуры конструкционного углерод-углеродного композиционного материала и создание компьютерной 3D-модели исследуемого образца // Вестник ПНИПУ. Сер.: Аэрокосмическая техника. 2014. № 2 (37). С. 202–221.
28. Mason K.F. Autoclave quality out-side the autoclave // High-performance composites. 2006. Vol. 14. P. 44–49.
29. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 831–838.
30. Amouroux S.C., Heider D., Gillespie Jr. J.W. Membrane-based VARTM: membrane and resin interactions // JEC Magazine. 2006. No. 24. P. 61–78.
31. Li W., Krehl J., Gillespie J.W., Heider D. Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process // Journal of Composite Materials. 2004. Vol. 38. No. 20. P. 1803.
32. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 4 (77). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru>. (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
33. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328 с.

References

1. 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.
2. *VIAM is 90 years old: proud of the past, creating the future*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022. 155 p.
3. Sidorov D.V., Grunin A.A., Schavnev A.A. Formation of carbon coatings in the process of methane pyrolysis by the chemical vapor deposition. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Kablov E.N. New generation materials and technologies for their digital processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
5. Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Sidorina A.I., Slavin A.V. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on polyimide binders. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-71-88.
6. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.

7. Xu X., Peng G., Zhang B. et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review. *Thin-Walled Structures*, 2025, vol. 209, art. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
8. Hubert P., Fernlund G., Poursartip A. Autoclave processing for composites. *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 414–434.
9. Bychkova E.V., Borisova N.V., Panova L.G. *Technology of polymer processing by pressing and injection molding methods*: textbook. Saratov; Moscow: Profobrazovanie; IPR Media, 2021, 97 p.
10. Tkachuk A.I., Donetskyy K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
11. Postnov V.I., Veshkin E.A., Abramov P.A. Ways to improve the quality of parts made of polymer composite materials during vacuum forming. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (3), pp. 834–839.
12. Evsyukov S., Klomp-de Boer R., Stenzenberger H.D. et al. A new m-xylylene bismaleimide-based high performance resin for vacuum-assisted infusion and resin transfer molding. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, pp. 3063–3072.
13. Babkin A.V., Erdni-Goryaev E.M., Solopchenko A.V., Kepman A.V. Infusion bismaleimide binders for polymer composite materials. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2015, no. 58, pp. 54–57.
14. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Kudryavtseva A.N. Application of bismaleimide VST-57 binder for obtaining heat-resistant dimensionally stable molds from polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
15. *BMI resin formulation for carbon fiber reinforced composite material, method for making it and BMI prepreg*: pat. WO 2022120049; appl. 02.12.21; publ. 09.06.22.
16. Fischer G. High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics. Materials. Université de Lyon, 2015. *HAL archives-ouvertes*. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (accessed: July 18, 2025).
17. Iredale R.J., Ward C., Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides. *Progress in Polymer Science*, 2017, vol. 69, pp. 1–21.
18. Wu T., Jiang P., Zhang X. et al. Additively manufacturing high-performance bismaleimide architectures with ultraviolet-assisted direct ink writing. *Materials and Design*, 2019, vol. 180, p. 107947.
19. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Savitsky R.S. Approach to the selection of technological mode for the manufacture of PCM. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.
20. Troitsky V.A., Karmanov M.N., Troitskaya N.V. Non-destructive testing of composite materials quality. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2014, no. 3, pp. 20–33.
21. Kartashova E.D., Muizemnek A.Yu. Technological defects in polymer layered composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Ser.: Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2 (42), pp. 79–89.
22. Mikhaylin Yu.A. *Heat, thermal and fire resistance of polymeric materials*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2011, 416 p.
23. Boychuk A.S., Dikov I.A., Chertischev V.Yu., Generalov A.S. Determination of porosity in monolithic parts and aircraft wing assemblies made of polymer composite materials using the ultrasonic echo-pulse method. *Defektoskopiya*, 2019, no. 1, pp. 3–9.
24. Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Generalov A.S. Features of determining porosity in polymer composite parts using the ultrasonic echo-pulse testing method. *Main trends, directions and prospects for the development of non-destructive testing methods in the aerospace industry: Proc. of the X All-Rus. Conf. «TestMat»*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 65–79.

25. Kosarina E.I., Demidov A.A., Mikhaylova N.A., Smirnov A.V. Theoretical aspects when creating electronic reference X-ray images containing quantitative information. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.
26. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
27. Vetoshkin S.V., Dolgodvorov A.V., Syromyatnikova A.I. Study of the volume microstructure of structural carbon-carbon composite material and creation of a computer 3D model of the studied sample. *Bestnik PNIPU. Ser.: Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 2 (37), pp. 202–221.
28. Mason K.F. Autoclave quality out-side the autoclave. *High-performance composites*, 2006, vol. 14. P. 44–49.
29. Veshkin E.A., Postnov V.I., Abramov P.A. Ways to improve the quality of parts made of polymer composite materials during vacuum forming. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (3), pp. 831–838.
30. Amouroux S.C., Heider D., Gillespie Jr. J.W. Membrane-based VARTM: membrane and resin interactions. *JEC Magazine*, 2006, no. 24, pp. 61–78.
31. Li W., Krehl J., Gillespie J.W., Heider D. Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process. *Journal of Composite Materials*, 2004, vol. 38, no. 20, pp. 1803.
32. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
33. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. *Polyimides – a class of heat-resistant polymers*. Leningrad: Nauka, 1983 328 p.

Информация об авторах

Начаркина Анастасия Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зеленина Ирина Викторовна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Смирнов Алексей Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бойчук Александр Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anastasia V. Nacharkina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Zelenina, Leading Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey V. Smirnov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander S. Boychuk, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.09.2025.

The article was submitted 21.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 02.09.2025.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-50-62

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛИМЕРНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В КОНСТРУКЦИИ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЕТА

Ю.А. Гусев¹, М.Н. Усачева¹, И.В. Парахин¹, А.В. Коваленко¹, А.Н. Васюков¹

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

Аннотация. Приведен обзор современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) и полимерных заполнителей, применяемых в лопастях вертолетов в РФ и мире, а также история и перспективы их развития. Приведены основные требования к материалам вертолетных лопастей, примеры элементов лопастей, в которых используются ПКМ и полимерный заполнитель, основные схемы армирования и технологии изготовления. Проведен анализ современных углеродных наполнителей, рассмотрены основные отличия среднемодульных и высокопрочных углеродных волокон.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, полимерный заполнитель, лопасть вертолета, препреги, изделия авиационного назначения, углепластик, стеклопластик

Для цитирования: Гусев Ю.А., Усачева М.Н., Парахин И.В., Коваленко А.В., Васюков А.Н. Применение композиционных материалов и полимерного заполнителя в конструкции лопасти вертолета // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-50-62.

Scientific article

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS AND POLYMER FILLER IN A HELICOPTER BLADE DESIGN

Yu.A. Gusev¹, M.N. Usacheva¹, I.V. Parakhin¹, A.V. Kovalenko¹, A.N. Vasyukov¹

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

Abstract. This article presents the overview of modern polymer composite materials and polymer fillers used in helicopter blades in Russia and worldwide, as well as the history and prospects for their development. The main requirements for helicopter blade materials, examples of blade elements using PCM and polymer filler, basic reinforcement schemes and manufacturing technologies are presented. The analysis of modern carbon fillers is carried out, and the main differences between medium-modulus and high-strength carbon fibers are considered.

Keywords: polymer composite materials, polymer filler, helicopter blade, prepregs, aviation products, carbon fiber reinforced plastic, fiberglass reinforced plastic

For citation: Gusev Yu.A., Usacheva M.N., Parakhin I.V., Kovalenko A.V., Vasyukov A.N. Application of composite materials and polymer filler in a helicopter blade design. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-50-62.

Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в конструкциях вертолетной техники. В частности, из ПКМ изготавливают элементы интерьера, обтекатели двигателя, панели фюзеляжа, двери и приборные панели, элементы молниезащиты, но наиболее ответственными являются конструкции несущей системы вертолета.

Конструкция и производство лопастей несущего винта вертолета – объект пристального внимания и инноваций, поскольку именно лопасти определяют летные возможности и безопасность вертолета. Сложная картина движения лопасти зависит от ее динамических характеристик, крепления к втулке, режима полета и других переменных. Поиск оптимальных решений в этой области требует интенсивных исследований и внедрения новейших материаловедческих технологий [1–4].

На протяжении всей истории вертолетостроения (от первых моделей до современных) для изготовления силовых элементов лопасти применяли разнообразные материалы: дерево, коррозионностойкие легированные стали, алюминиевые и титановые сплавы. В последние десятилетия широкое распространение получили лопасти из композитов. В отечественных и большинстве зарубежных средних и тяжелых вертолетов лонжероны лопастей выполняются с D-образным сечением. Такая форма оптимизирует крутильную жесткость при минимальной массе лопасти. Широкое распространение получают также лопасти интегрированной безлонжеронной конструкции [5].

Основные преимущества композитных лопастей связаны с их повышенной удельной прочностью (соотношение прочности к плотности материала). Важный фактор также – особенность разрушения армированных композитов. В отличие от металлов, в которых микротрещина обычно растет лавинообразно, в композитах локальное повреждение (разрыв волокна) не вызывает мгновенного разрушения. Связующее (матрица) перераспределяет напряжения на соседние волокна, локализуя дефект в микрообъеме, что существенно повышает усталостную долговечность.

Применение сферопластиковых заполнителей в сэндвич-конструкциях из стекло- или углепластика в условиях с предельными влажностно-температурными, электро- и теплофизическими свойствами, а также физико-механическими характеристиками позволяет упрочнить сотовые элементы. Сферопластики представляют собой в основном композиции холодного отверждения или подвергающиеся эндотермическому воздействию, что позволяет за один технологический этап проводить работы по повышению прочности, жесткости в зонах установки крепежа, для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей, закрепления электротехнических кабелей, жгутов провода противообледенительной системы (ПОС) и т. п. Такие характеристики сферопластиков, как прочность и низкое набухание в воде, позволяют распределять действующие на деталь нагрузки с подтверждением требуемого уровня свойств. Заполнители из сферопластика можно применять для защиты от химических, коррозионных, механических и других видов воздействий [6].

Применяемая в настоящее время в конструкциях лопастей несущего и рулевого винтов вертолетной техники мастика характеризуется повышенной коррозионной агрессивностью к металлам и низкой технологичностью. Взамен мастики требуется создание материала, который будет обладать необходимым уровнем механических свойств, небольшой плотностью, технологичностью и сниженной коррозионной агрессивностью.

В данной статье приведен обзор современных ПКМ и полимерных заполнителей, применяемых в лопастях вертолетов в РФ и мире, а также перспективы их развития.

Результаты и обсуждение

Вертолет – это винтокрылый летательный аппарат, где лопасти являются частью крупной динамической системы, называемой ротором, которая предназначена для обеспечения подъемной силы, тяги и управления [7]. Безопасность вертолета в значительной степени зависит от ротора и лопастей. С точки зрения конструкции лопасть представляет собой непрерывный несущий элемент, у которого четко определены направления главных осей напряжения. Наибольшее напряжение в лопасти возникает от действия центробежных сил и направлено вдоль ее длины [8]. Во время полета лопасти испытывают сжимающие циклические нагрузки.

В вертолетостроении все чаще применяют композиционные материалы для проектирования более легких, тихих и безопасных летательных аппаратов. Например, вертолеты Eurocopter EC175 фирмы Airbus, Sikorsky S-76D фирмы Sikorsky полностью оснащены композитными лопастями несущего винта, вертолет UH-60M Blackhawk фирмы Sikorsky имеет широкохордную лопасть несущего винта полностью из ПКМ, конвертоплан V-22 Osprey фирм Bell Helicopter и Boeing Rotorcraft Systems сделан почти полностью из композиционных материалов (угле- и стеклопластиков на основе эпоксидных связующих) [9]. Для лопастей вертолета Airbus H145 фирмы Airbus Helicopters используют стеклянные ткани для несущего винта. Материал обеспечивает хорошую прочность и геометрическую форму длинных лопастей нового вертолета [10]. У вертолета S-64 Skycrane фирмы Erickson Inc. металлические лопасти заменены на композиционные из угле- и стеклопластиков [11].

Раньше вертолеты, например, такие как Bell 47 фирмы Bell Aircraft, оснащались лопастями несущего винта из дерева. Прочность и гибкость древесины сделали ее идеальным материалом для первых конструкций лопастей. Однако древесина легко повреждалась птицами, пылью, камнями и осадками, что приводило к сильным вибрациям из-за разбалансировки несущей системы. По мере развития отрасли лопасти стали изготавливать из металлов. Использование металлов решило некоторые проблемы, присущие деревянным лопастям, но возникли другие. Деформационное разрушение металлических конструкций привело к тому, что срок службы лопастей несущих винтов стал ограниченным. До этого считалось, что деревянные лопасти могут служить очень долго [12]. Таким образом, металлы заменили древесину, а теперь композиционные материалы заменяют металлы [13].

Современные лопасти несущего винта вертолета изготавливают из различных материалов, включая титан, ПКМ на основе углеродных и стеклянных наполнителей, сталь и алюминий [12].

Следует отметить, что конструкционные металлы (алюминий, сталь и титан) ограничены по величине значений удельной прочности и жесткости. Титан обладает наилучшими механическими характеристиками, но его применение ограничено высокой стоимостью и труднодоступностью. Композиционные материалы на основе эпоксидного связующего, стекло- и углеволокна, а также арамидного волокна имеют более высокие значения удельной прочности и жесткости, что делает их более выгодными и подходящими для применения в конструкции лопастей. По усталостным характеристикам ПКМ также превосходят металлы, что обеспечивает более длительный срок службы лопастей [14].

Использование препрегов для изготовления лопасти предпочтительнее, чем контактное формование, так как качество изготавливаемой детали можно лучше контролировать, хотя препрег стоит дороже [15]. Кроме ручной выкладки в мире широко используются автоматизированные методы – Automated Tape Laying (ATL) и Automated Fiber Placement (AFP), применение которых позволяет существенно уменьшить трудоемкость производства и увеличить точность выкладки изделия [16, 17].

В России на раннем этапе развития авиастроения лопасти также выполнялись из дерева, позже их стали изготавливать из стали (для вертолетов Ми-6, Ми-10, Ми-26) и дюралюминия (для вертолетов Ми-2, Ми-24Д, Ми-24В, Ми-24П и др.). Первые лопасти из ПКМ разработаны в 60-е гг. XX в. для вертолета Ка-18, в начале 1970-х гг. лопасти несущего винта из ПКМ созданы для вертолета Ка-26. Несколько позже композитные лопасти для несущих винтов легких и средних вертолетов и рулевых винтов разработаны для вертолетов семейства «Ми». Изначально в конструкции лопастей использовали стекло- и углепластики на основе связующих ЭДТ-10П и 5-211Б растворного типа, которые позволяли обеспечить повышенный ресурс лопастей (по сравнению с металлическими) [18, 19].

В настоящее время в РФ для производства лопастей вертолетов активно осваивают материалы на основе связующего расплавного типа марки ВСР-3М. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ с использованием данного связующего разработана широкая серия материалов на основе высокопрочных углеродных волокон, стеклоровингов, стеклянных и углеродных тканей [20]. Препреги обладают жизнеспособностью не менее 90 сут при температуре 20 °С и контролируемой текучестью, а ПКМ на их основе – высоким уровнем физико-механических свойств и термовлагодостойкостью, что позволяет использовать их в сложных климатических условиях. Эти материалы позволили обеспечить более высокие эксплуатационные характеристики и еще больше увеличить ресурс работы лопастей [18, 21, 22].

Тенденции расширения областей применения сферопластиков на основе новых высокопрочных связующих в многослойных композитах с обшивками из угле- или стеклопластика, демонстрирующих высокие физико-механические, диэлектрические и теплофизические свойства в различных условиях эксплуатации, включая воздействие высоких температур и повышенной влажности, описаны в научно-технических источниках [23–25].

В АО «НЦВ Миль и Камов» совместно с ПАО «Роствертол» и ПАО «КВЗ» активно осваивают новый класс материалов на основе расплавного связующего, а также внедряют в производство различные технологии изготовления лопастей из ПКМ. Лопасти проектируют с использованием методов компьютерного моделирования, изготавливают методами автоматизированной спиральной намотки, ручной и автоматизированной выкладки, а также отрабатывают технологии формования лопасти целиком в специальной пресс-форме, проводят испытания на усталость и методами неразрушающего контроля [26].

Современная лопасть вертолета с применением ПКМ представляет собой многослойную композицию, как правило, включающую:

- лонжерон – основную силовую конструкцию лопасти, которая выполняется из высокопрочного высокомодульного стеклопластика, гибридного ПКМ или углепластика с основным направлением волокон вдоль длины лопасти, а также с укладками $[\pm 45, 0, 90]$; $[0, 90, 90, 0]$; $[0, \pm 45, 0]$; $[60, 0, 60]$. Для противостояния скручиванию лонжерон может быть армирован слоями с укладкой $[\pm 45]$;
- обшивку с многослойной укладкой в разных направлениях $[\pm 45; 0; 90]$ для восприятия крутящих и изгибающих нагрузок;
- наполнитель (например, на основе арамидной бумаги, алюминия или пенопласта), обеспечивающий жесткость при минимальной массе;
- элементы молниезащиты (медные сетки, проводящие ленты);
- встроенные системы подогрева для предотвращения обледенения, которые содержат ПОС лопастей несущего и хвостового винта, систему обогрева лобовых стекол вертолета, обтекателей воздухозаборников и входных устройств двигателя. Противообледенительная система винтов и стекол основана на электротепловом принципе действия, воздухозаборников двигателей – на воздушно-тепловом, несущего или рулевого винта

с полимерным наполнителем – например, на основе токопроводящих жил, залитых заполнительной мастикой;

– титановые или композитные элементы крепления к втулке винта.

Такое сочетание позволяет не только оптимизировать массу, но и повысить устойчивость к усталостным разрушениям и вибрациям.

Большая часть объема лопасти состоит из сотового или пенопластового наполнителей (в некоторых частях лопасти – совместно с другими материалами) для обеспечения прочности и жесткости. Внедрение наполнителей существенно улучшило конструкцию лопасти и срок ее службы [12]. Передняя кромка защищена оковкой из коррозионностойкой стали или титанового сплава [27].

Один из вариантов конструкции лопасти приведен на рис. 1 [12].

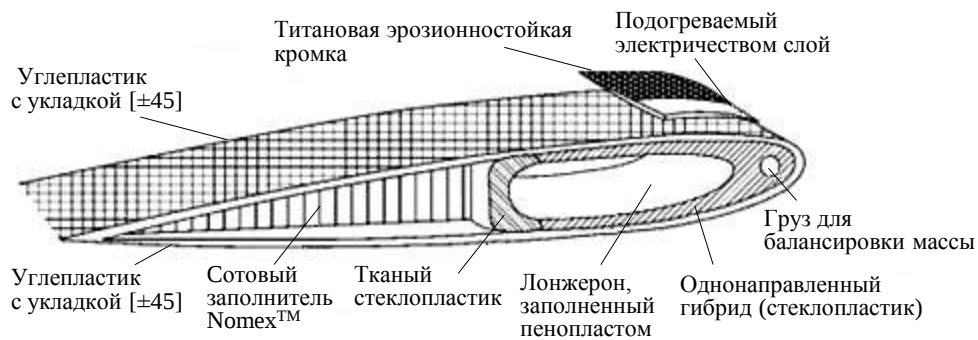


Рис. 1. Типовой вариант конструкции лопасти несущего винта вертолета

Существует также безлонжеронная конструкция лопасти [5, 26, 28], которая позволяет изготавливать ее за один технологический цикл, т. е. не требуется приклеивать отдельно обшивки и другие элементы. При такой схеме в качестве наполнителя используется предварительно сжатый на 2–5 % пенопласт, что позволяет создать необходимое давление на внутренние слои препрега для формирования ПКМ. Снаружи давление создается за счет смыкания пресс-формы (рис. 2).

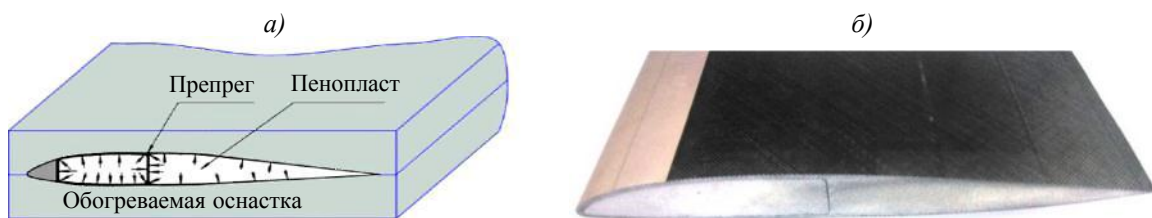


Рис. 2. Схема оснастки для формования лопасти безлонжеронной конструкции (а) и фрагмент изготовленной лопасти (б)

Требования к лопастям отражают, как правило, требования ко всему летательному аппарату и могут быть сведены к следующему [29]:

- необходимо сочетание высокой удельной прочности и жесткости, а также высокое сопротивление усталости;
- важно снижать массу вертолета для увеличения полезной нагрузки и/или повышения летных характеристик;
- для обеспечения безопасности конструкции материалы должны иметь высокие запасы прочности;

- лопасти должны быть устойчивы к ударным нагрузкам – например, к столкновению с птицами;
- проявлять эрозионную стойкость – лопасти вращаются в воздухе с высокой скоростью, в результате чего частицы, содержащиеся в воздухе (пыль, песок и т. д.), являются абразивом. Эрозионное воздействие особенно сильно проявляется при взлете и посадке, когда потоки воздуха поднимают с земли частицы, поэтому для передних кромок лопастей следует использовать абразивостойкие материалы;
- коррозионностойкие материалы позволяют сократить расходы на техническое обслуживание и увеличить запас прочности для используемого материала;
- необходимо обеспечить надежную конструкцию при минимальных затратах, снизив стоимость за счет автоматизации процесса и сократив затраты на техническое обслуживание;
- повысить износостойкость – срок службы лопастей существенно влияет на эксплуатационные расходы, поэтому его необходимо увеличивать для экономической эффективности и сокращать затраты на обслуживание. Срок службы также сокращается из-за усталостного воздействия эрозии и коррозии;
- в конструкции должны быть предусмотрены молниезащита и противообледенительная защита. На рис. 3 и 4 приведены типовые схемы расположения нагревательной накладки и нагревательных элементов лопастей вертолетов.



Рис. 3. Нагревательная накладка лопасти несущего винта, состоящая из слоев стекло- или углеткани, жил силовых проводов нагревательного элемента и заполнителя

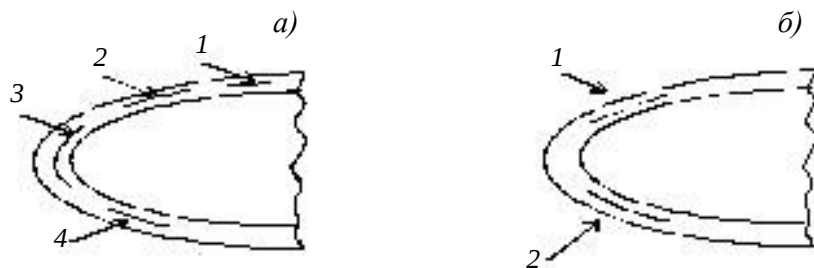


Рис. 4. Схема размещения секций (1–4) нагревательных элементов несущего (а) и рулевого (б) винтов (схема из открытых источников)

Применяемый в настоящее время в конструкции ПОС герметизирующий заполнитель на основе полисульфидного олигомера и эпоксидной смолы способен вызывать образование коррозионных поражений на поверхности металлического нагревательного элемента, а также сопряженных металлических деталей, находящихся в контакте с ним. Данные образования могут являться центрами развития коррозии, а вследствие того, что металлические детали контактируют также с конструкциями из углепластика, может наблюдаться интенсивное развитие коррозионных поражений.

Использование полимерного заполнителя на основе микросфер из-за специфики его состава и свойств позволит снизить концентрационные напряжения и коррозионное воздействие. Такой заполнитель обладает химической стойкостью и инертностью, пониженной пожароопасностью, повышенной стойкостью к растрескиванию, улучшенным сопротивлением материала разрушению под влиянием атмосферных воздействий и влаги [30]. Сниженная коррозионная агрессивность – один из основных параметров из-за непосредственного контакта материала с системой ПОС. Плотность материала должна находиться в конкретном диапазоне значений для создания однородности конструкции и необходимых аэродинамических характеристик лопастей. Материал должен обеспечивать возможность изготовления накладки с ПОС за единый технологический цикл и минимизировать количество дефектов, возникающих во время формирования изделия. Так, высокое сопротивление наполненных материалов разрушению, обеспечивающее прочность деталей при различных силовых воздействиях и снижение коррозии за счет отсутствия серных групп полисульфидного каучука и нейтральности среды, должно значительно увеличить регламентное время налета несущих и рулевых лопастей.

Внедрение современных материалов в летательные аппараты с системой ПОС обеспечит поддержание регулярного авиационного сообщения, в том числе в регионах с суровым климатом: Новосибирской области, Красноярском и Камчатском краях, Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах.

Коррозия – это серьезная проблема для металлических конструкций, особенно при эксплуатации вертолетов в морском климате. Соленая вода агрессивна к металлам, в отличие от композиционных материалов, однако для последних требуется использовать водо- и влагостойкие связующие [29]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана серия препрегов на основе тепловлагостойких связующих [31, 32].

Однако ПКМ, в отличие от металлов, не имеют высокой устойчивости к эрозионному воздействию, так как являются более «мягкими» материалами. Поэтому передние кромки лопастей, уязвимые для эрозионного воздействия, можно покрыть металлической кромкой, что обеспечит требуемую защиту [13].

Один из способов решения данной проблемы описан в патенте фирмы Bell Helicopter [33] на лопасти вертолетов из ПКМ, которые обладают рядом особенностей, повышающих их надежность с одновременным уменьшением массы. В данном изобретении также описана уникальная технология выкладки волокон, которая позволяет максимально повысить сопротивление усталости конструкции.

В лопастях для перспективных вертолетов потребуются еще более высокие упруго-прочностные характеристики используемых в них материалов [34], в том числе с повышенной прочностью и жесткостью для увеличения порога флаттера и восприятия увеличенных центробежных и крутильных нагрузок.

Увеличения упруго-прочностных характеристик ПКМ можно добиться, используя перспективные наполнители. Анализ различных типов углеродных наполнителей, используемых в ПКМ, показал, что такими наполнителями могут являться среднемодульные или высокомодульные углеродные волокна и гибридные ПКМ с использованием таких волокон, так как они обладают оптимальным соотношением значений прочности и модуля упругости.

Соотношение прочности и модуля упругости при растяжении для отечественных и зарубежных типов углеродных наполнителей показано на рис. 5.

Модуль упругости у среднемодульных углеродных волокон больше на 10–15 %, чем у высокопрочных волокон, а прочность, как правило, выше на 5–10 %.

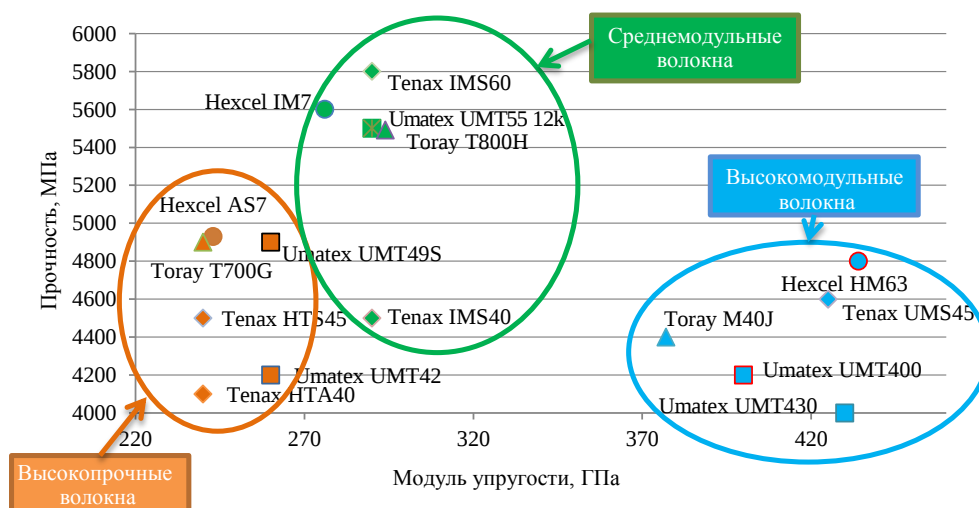


Рис. 5. Соотношение прочности и модуля упругости российских и зарубежных углеродных наполнителей

Среднемодульные углеродные волокна имеют также ряд преимуществ по сравнению с высокомодульными [34–36].

- Лучшая ударная прочность и устойчивость к повреждениям.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон обладают большей вязкостью разрушения, т. е. они менее хрупкие, чем ПКМ на основе высокомодульных волокон. Это критично для авиации, где возможны ударные нагрузки (птицы, обломки, посадка в пыльной среде). Для лопастей вертолетов важными характеристиками являются сопротивление микроповреждениям и способность материала не разрушаться мгновенно при сколах или ударах, что повышает безопасность полетов.

- Более высокая длительная прочность.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон демонстрируют лучшую длительную прочность при циклическом нагружении, что критично для вертолетных лопастей, находящихся в условиях постоянных вибраций и переменных изгибающих/центробежных нагрузок. Высокомодульные волокна более чувствительны к накоплению микротрещин в полимерной матрице и расслоению.

- Более высокая межслоевая прочность в композите за счет более сбалансированной жесткости.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон обеспечивают лучшее сцепление между слоями и с полимерной матрицей, что снижает вероятность расслоения под нагрузкой.

- Лучшие технологические характеристики.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон менее чувствительны к термическим и механическим дефектам при обработке: они проще в резке, укладке, автоклавной обработке. Высокомодульные волокна могут быть хрупкими при укладке, трескаться при радиусных изгибах, что усложняет производство лопастей сложной аэродинамической формы.

- Стоимость и доступность.

Среднемодульные волокна значительно дешевле высокомодульных, особенно в массовом производстве. Высокомодульные волокна (например, фирм Mitsubishi K13D2U и Toray M60J) в 2–5 раз дороже и чаще применяются только в космических летательных аппаратах, спутниках, радиопрозрачных антеннах и специализированных военных изделиях.

- Оптимальный баланс «жесткость – масса – прочность».

В конструкции лопастей критичен не максимум жесткости, а оптимальное соотношение массы, прочности и сопротивления вибрациям. Избыточная жесткость высокомодульных волокон может привести к локальным перегрузкам и снижению виброустойчивости конструкции.

Таким образом, среднемодульные углеродные волокна (например, Toray T800H, Hexcel IM7, Umatex UMT55S) – это наиболее рациональный выбор для большинства авиационных изделий, в том числе при изготовлении лопастей вертолета. Они обеспечивают:

- высокую прочность и достаточную жесткость;
- долговечность в условиях циклических нагрузок;
- хорошую технологичность;
- снижение риска хрупкого разрушения;
- приемлемую стоимость.

Высокомодульные волокна применяются точно, например, в элементах с повышенной жесткостью и строго заданными деформациями (жесткие лонжероны антенн, космические панели), но в лопастях вертолетов они практически не используются из-за вышеописанных рисков и избыточной жесткости.

Гибридные композиты на основе стеклянных и углеродных волокон представляют собой уникальные материалы, в которых синергия свойств превосходит ограничения по отдельным волокнам. Путем оптимизации соотношения компонентов, схем распределения (послойное/внутрислойное смешение) и методов переработки можно достичь баланса механических характеристик, функциональности и экономической эффективности [32, 37]. В статье [38] показано, что гибридизация внутри одного слоя материала обеспечивает более высокую прочность при растяжении и сжатии, чем послойная гибридизация.

Заключения

Использование ПКМ в конструкции лопастей вертолетов позволяет достичь значительного повышения прочностных и аэродинамических характеристик при одновременном снижении массы. Углепластики обеспечивают высокую жесткость и прочность, стеклопластики повышают ударную вязкость и снижают себестоимость, препреги позволяют реализовать сложную геометрическую форму и контролировать качество на этапе изготовления, а полимерные наполнители на основе микросфер повышают прочность и жесткость панелей сотовых конструкций в зонах установки крепежа, а также служат для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей, закрепления электротехнических кабелей и жгутов провода ПОС. Внедрение ПКМ способствует росту ресурса лопастей, уменьшению эксплуатационных затрат и повышению безопасности полетов.

В ближайшем будущем ожидается дальнейшее развитие технологий производства композитных лопастей, включая компьютерное моделирование конструкций, автоматизированные методы выкладки, формование интегрированной конструкции за один технологический цикл, а также использование новых типов наполнителей и полимерных наполнителей с пониженной коррозионной агрессивностью.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Ильченко С.И. и др. Конструкционные углепластики с повышенной проводимостью // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 2. С. 25–36.
2. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.

3. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
4. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
5. Безлонжеронная лопасть вертолета из полимерных композиционных материалов и способ ее изготовления: пат. WO2015/102521 A1 Рос. Федерация; заявл. 30.12.14; опубл. 09.07.15.
6. Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Соколов И.И., Тундайкин К.О. Сферопластик с регулируемой вязкостью для заполнения участков сотовых конструкций // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
7. Moir I., Seabridge A.G. Aircraft systems. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1992. 415 p.
8. Case J., Chilver A.H., Ross C.T.F. Strength of materials and structures. London: Arnold, 1999. 346 p.
9. Helicopters // Hexcel: офиц. сайт. URL: <https://www.hexcel.com/Markets/Space-and-Defense/Helicopters> (дата обращения: 22.07.2025).
10. SGL Carbon delivers composite materials for Airbus Helicopter rotor blades // *Composite-World.com*. URL: <https://www.compositesworld.com/news/sgl-carbon-delivers-composite-materials-for-airbus-helicopter-rotor-blades> (дата обращения: 22.07.2025).
11. Erickson S-64 Air Crane full composite main rotor blades // Jec: офиц. сайт. URL: <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/erickson-s-64-air-crane-full-composite-main-rotor-blades> (дата обращения: 22.07.2025).
12. What are Helicopter Blades Made of? // Pilot Teacher: офиц. сайт. URL: <https://www.pilotteacher.com/what-is-a-helicopter-blade-made-of-it-used-to-be-wood/> (дата обращения: 22.07.2025).
13. Edwards K.L., Davenport C. Materials for rotationally dynamic components: rationale for higher performance rotor-blade design // *Materials and Design*. 2006. Vol. 27. P. 31–35.
14. Hancox N.L., Mayer R.M. Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designer. London: Chapman & Hall, 1994. 264 p.
15. Strong A.B. Manufacturing // *International encyclopedia of composites* / ed. S.M. Lee. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1990. P. 102–126.
16. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
17. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
18. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 2. С. 16–18.
19. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С. и др. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. 230 с.
20. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
21. Баранников А.А., Постнова М.В., Крашенинникова Е.В., Васюков А.Н. Применение новых технологий в производстве лопастей несущего винта вертолета // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.

22. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S2. С. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
23. Соколов И.И. Сферопластики на основе термореактивных связующих для изделий авиационной техники: дис. ...канд. техн. наук. М., 2013. 127 с.
24. Кириллов В.Н., Вапиров Ю.М., Дрозд Е.А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 31–38.
25. Соколов И.И., Минаков В.Т. Сферопластики авиационного назначения на основе эпоксидных клеев и дисперсных наполнителей // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. № 5. С. 22–26.
26. Дорошенко Н.И. Применение ПКМ в конструкции лопастей винтов вертолетов // *Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли: мат. Всерос. науч.-техн. конф.* (6 дек. 2019 г., г. Москва). М.: ВИАМ, 2019. С. 23–41.
27. Pascal F., Navarro P., Marguet S., Ferrero J.-F. Study of medium velocity impacts on the lower surface of helicopter blades // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 88. P. 93–100.
28. Лопасть несущего винта вертолета и способ изготовления лопасти из композиционного материала: пат. RU 2541574 C1 Рос. Федерация; заявл. 25.12.13; опубл. 20.02.15.
29. Middleton D.H. Composite materials in aircraft structures. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1990. 530 p.
30. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
31. Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Ланцов И.А., Гусев Ю.А. Препрег и углепластик на основе связующего ВСР-3М и углеродной ткани для применения в составе конструкций лопастей рулевого винта вертолетов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 11 (129). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65.
32. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Беспалова Л.С., Хрульков А.В., Коган Д.И. Стеклопластик ВПС-31 и гибридный композиционный материал ВКГ-5 из однонаправленных препрегов на основе расплавного связующего и жгутовых угле-, стеклонаполнителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2006. № 1. С. 10–20.
33. Composite rotor blade and method of manufacture: pat. US 6659722 B2 USA; appl. 07.11.02; publ. 09.12.03.
34. Montagnier O. Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fiber reinforced plastic composite drive shafts // *Materials & Design*. 2013. Vol. 46. P. 88–100.
35. Morgan P. Carbon Fibers and Their Composites. Boca Raton: CRC Press, 2005. 1200 p.
36. High Modulus Carbon Fiber: Modulus And Composite Explained // Baetro Machining Blog. URL: <https://baetro-machining.com/blog/high-modulus-carbon-fiber> (дата обращения: 24.07.2025).
37. Gupta M.K., Srivastava R.K. Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Polymer Composite: A Review // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015. Vol. 55 (6). P. 1–66.
38. Ikbāl M.H., Ahmed A., Qingtao W. et al. Hybrid composites made of unidirectional T600S carbon and E-glass fabrics under quasi-static loading // *Journal of Industrial Textiles*. 2017. Vol. 46 (7). P. 1–25.

References

1. Kablov E.N., Gunyaev G.M., Ilchenko S.I. et al. Structural carbon fiber reinforced plastics with increased conductivity. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 25–36.
2. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
3. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

4. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
5. *Sparless helicopter blade made of polymer composite materials and its manufacturing method*: pat. WO2015/102521 A1 Rus. Federation; appl. 30.12.14; publ. 09.07.15.
6. Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Sokolov I.I., Tundaykin K.O. Spheroplastic with adjustable viscosity for filling sections of honeycomb structures. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
7. Moir I., Seabridge A.G. *Aircraft systems*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1992, 415 p.
8. Case J., Chilver A.H., Ross C.T.F. *Strength of materials and structures*. London: Arnold, 1999, 346 p.
9. Helicopters. *Hexcel*. Available at: <https://www.hexcel.com/Markets/Space-and-Defense/Helicopters> (accessed: July 22, 2025).
10. SGL Carbon delivers composite materials for Airbus Helicopter rotor blades. *CompositeWorld*. Available at: <https://www.compositesworld.com/news/sgl-carbon-delivers-composite-materials-for-airbus-helicopter-rotor-blades> (accessed: July 22, 2025).
11. Erickson S-64 Air Crane full composite main rotor blades. *Jec*. Available at: <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/erickson-s-64-air-crane-full-composite-main-rotor-blades> (accessed: July 22, 2025).
12. What are Helicopter Blades Made of? *Pilot Teacher*. Available at: <https://www.pilotteacher.com/what-is-a-helicopter-blade-made-of-it-used-to-be-wood/> (accessed: July 22, 2025).
13. Edwards K.L., Davenport C. Materials for rotationally dynamic components: rationale for higher performance rotor-blade design. *Materials and Design*, 2006, vol. 27, pp. 31–35.
14. Hancox N.L., Mayer R.M. *Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designer*. London: Chapman & Hall, 1994, 264 p.
15. Strong A.B. Manufacturing. *International encyclopedia of composites*. Eds. S.M. Lee. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1990, pp. 102–126.
16. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
17. Timoshkov P.N. Equipment and materials for the technology of automated calculations prepregs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 2, pp. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
18. Doroshenko N.I., Chursova L.V. Evolution of materials for blades of helicopters. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 16–18.
19. Slyusar B.N., Flek M.B., Goldberg E.S. et al. *Helicopter engineering technology. Technology of production of helicopter blades and aircraft structures from polymer composite materials*. Rostov-on-Don: Publ. house of the SSC of RAS, 2013, 230 p.
20. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
21. Barannikov A.A., Postnova M.V., Krashenninnikova E.V., Vasyukov A.N. Application of new technologies in the production of helicopter main rotor blades. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
22. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Khrulkov A.V. The new generation of materials and technologies for helicopter blade spars. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
23. Sokolov I.I. *Spheroplastics based on thermosetting binders for aviation products*: thesis, Cand. of Sc. (Tech.). Moscow, 2013, 127 p.
24. Kirillov V.N., Vapirov Yu.M., Drozd E.A. Research of atmospheric firmness of polymeric composite materials in the conditions of the atmosphere of warm wet and moderately warm climate. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 4, pp. 31–38.

25. Sokolov I.I., Minakov V.T. Spheroplasts for aviation purposes based on epoxy adhesives and dispersed fillers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 22–26.
26. Doroshenko N.I. Application of PCM in the design of helicopter propeller blades. *Polymer composite materials for the aerospace industry: proc. All-Rus. sci. and tech. conf. Moscow: VIAM*, 2019, pp. 23–41.
27. Pascal F., Navarro P., Marguet S., Ferrero J.-F. Study of medium velocity impacts on the lower surface of helicopter blades. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 88, pp. 93–100.
28. *Helicopter rotor blade and method of manufacturing a blade from a composite material*: pat. RU 2541574 C1 Rus. Federation; appl. 25.12.13; publ. 20.02.15.
29. Middleton D.H. *Composite materials in aircraft structures*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1990, 530 p.
30. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
31. Kolokoltseva T.V., Popov Yu.O., Lantsov I.A., Gusev Yu.A. Prepregs and fiberglass based on VSR-3M resin and fiberglass fabrics for use in helicopter blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65.
32. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Beshpalova L.S., Khrulkov A.V., Kogan D.I. Fiberglass VPS-31 and hybrid composite material VKG-5 from unidirectional prepregs based on melt binder and rope carbon, glass fillers. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2006, no 1, pp. 10–20.
33. *Composite rotor blade and method of manufacture*: pat. US 6659722 B2 USA; appl. 07.11.02; publ. 09.12.03.
34. Montagnier O. Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fiber reinforced plastic composite drive shafts. *Materials & Design*, 2013, vol. 46, pp. 88–100.
35. Morgan P. *Carbon Fibers and Their Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2005, 1200 p.
36. High Modulus Carbon Fiber: Modulus And Composite Explained. *Baetro Machining Blog*. Available at: <https://baetro-machining.com/blog/high-modulus-carbon-fiber> (accessed: July 24, 2025).
37. Gupta M.K., Srivastava R.K. Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Polymer Composite: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2015, vol. 55 (6), pp. 1–66.
38. Ikbali M.H., Ahmed A., Qingtao W. et al. Hybrid composites made of unidirectional T600S carbon and E-glass fabrics under quasi-static loading. *Journal of Industrial Textiles*, 2017, vol. 46 (7), pp. 1–25.

Информация об авторах

Гусев Юрий Андреевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Усачева Мария Николаевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Парахин Игорь Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коваленко Антон Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Васюков Александр Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yuri A. Gusev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria N. Usacheva, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Anton V. Kovalenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasyukov A. Nikolaevich, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.08.2025.
The article was submitted 18.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 22.08.2025.

Научная статья

УДК 621.357.74

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76

ВЫБОР ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ПРИ КОНТАКТЕ С АЛЮМИНИЕВЫМИ СПЛАВАМИ

Л.И. Закирова¹, С.В. Сибилева¹, А.И. Вдовин¹, М.А. Кольцова¹

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

Аннотация. Проведены электрохимические исследования образцов из коррозионно-стойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 (с покрытиями и без покрытий): определены значения стационарных потенциалов, модуля импеданса, потенциала и плотности тока контактной коррозии, потенциала перепассивации. По результатам коррозионных испытаний в камере соляного тумана в течение 2160 ч пакетов образцов из коррозионно-стойких сталей с гальваническими покрытиями и алюминиевых сплавов (Ан.Окс.нхр) выбрано гальваническое покрытие, не уступающее по защитной способности кадмиевому покрытию.

Ключевые слова: электроосаждение, кадмиевое покрытие, покрытие сплавом, гальванотермическое покрытие, спектроскопия электрохимического импеданса, анодные и катодные поляризационные кривые, потенциал контактной коррозии, плотность тока контактной коррозии, ускоренные коррозионные испытания

Для цитирования: Закирова Л.И., Сибилева С.В., Вдовин А.И., Кольцова М.А. Выбор гальванического покрытия коррозионно-стойких сталей с целью защиты от коррозии при контакте с алюминиевыми сплавами // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76.

Scientific article

SELECTION OF ELECTRODEPOSITED COATING ON CORROSION-RESISTANT STEELS FOR CORROSION PROTECTION IN CONTACT WITH ALUMINIUM ALLOYS

L.I. Zakirova¹, S.V. Sibileva¹, A.I. Vdovin¹, M.A. Koltsova¹

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 paper presents the results of electrochemical studies of samples of corrosion-resistant steels (08kH18N10, 12kH18N10T) and aluminum alloys (1163, B95, 1933) both with and without coatings. We have determined the values of the steady-state potentials, impedance modulus, the potential and current density of contact corrosion, and the passivation potential. Based on the results of 2160-hour corrosion tests in the salt spray chamber on samples packages made of corrosion-resistant steels with electroplating and aluminum alloys with non-chromated anodic coating, we have selected an electrodeposited coating that is as good as cadmium coating in its protective ability.

Keywords: electrodeposition, cadmium coating, alloy coating, electrodeposited coating, electrochemical impedance spectroscopy, anodic and cathodic polarization curves, contact corrosion potential, contact corrosion current density, accelerated corrosion tests

For citation: Zakirova L.I., Sibileva S.V., Vdovin A.I., Koltsova M.A. Selection of electrodeposited coating on corrosion-resistant steels for corrosion protection in contact with aluminium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76.

Введение

В экологических нормах предъявляются строгие требования к автомобильной и авиационной промышленности по сокращению выбросов загрязняющих веществ за счет производства все более энергоэффективных транспортных систем. В настоящее время основные усилия в этих отраслях направлены на снижение массы изделий, замену некоторых сталей более легкими сплавами [1, 2].

В отечественном самолетостроении основным материалом для обшивки фюзеляжа являются листы из алюминиевого сплава 1163-АТВ на основе системы Al–Cu–Mg. Для верхней панели крыла применяется высокопрочный алюминиевый сплав В950.ч.-Т1 системы Al–Zn–Mg–Cu, из которого также производят фюзеляж и рамы [3]. При производстве панелей крыла применяют болтовое и заклепочное соединения, так как данный сплав склонен к растрескиванию при сварке [4].

Одним из основных материалов для изготовления деталей внутреннего силового набора современных изделий авиационной техники является высокопрочный алюминиевый сплав 1933 [5, 6], который выпускают в виде поковок, штамповок, массивных прессованных полос толщиной до 250 мм.

К крепежным элементам, применяемым при производстве авиационных конструкций, предъявляются повышенные требования к прочности и коррозионной стойкости, поэтому использование коррозионностойкой стали в качестве основного материала для изготовления крепежа является приоритетным направлением [7].

Таким образом, в усовершенствованных конструкциях различных летательных аппаратов возрастает количество контактов разнородных металлов, что значительно увеличивает риск образования гальванической пары при отсутствии изоляции между контактирующими поверхностями в условиях эксплуатации при воздействии влаги и других агрессивных факторов, что приводит к усиленной контактной коррозии одной из деталей [8, 9].

Сведения о контактной коррозии изложены как в научных монографиях, обзорах и статьях, так и в стандартах [10]. Наиболее полно контактная коррозия рассмотрена в монографии [11], в которой большое внимание уделено также контактной коррозии в атмосферных условиях. Американским обществом ASTM в серии STP выпущена книга, посвященная контактной и питтинговой коррозии [12]. Обзор по контактной коррозии в атмосферных условиях представлен в работе [13].

На шкале потенциалов распространенные металлы перечислены в порядке от наиболее анодных до наиболее катодных (благородных). Чем дальше друг от друга находятся металлы в этом ряду, тем больше разница и скорость коррозии между ними. Судя по шкале потенциалов, алюминий более электроотрицателен, чем железо. На скорость коррозии также влияет площадь поверхности анода по сравнению с катодом. Например, небольшой винт из нержавеющей стали в мачте большой яхты, сделанной из алюминия, будет вызывать коррозию алюминия от незначительной до умеренной, но небольшой алюминиевый винт в большом фитинге из нержавеющей стали с морской водой будет означать, что маленький алюминиевый винт очень быстро прокорродирует. Поэтому следует избегать контакта разнородных металлов в местах, где может скапливаться влага.

Для повышения коррозионной стойкости деталей из стали широко применяются металлические покрытия, которые защищают от коррозии не только стальную деталь, но и контактирующие материалы из других более электроотрицательных металлов. Например, соединение деталей из стали и алюминиевого сплава без покрытия

в присутствии электропроводящего электролита приводит к интенсивному коррозионному поражению алюминиевых деталей.

Для защиты стальных деталей широко применяется кадмирование и цинкование, так как эти металлы по своим электрохимическим свойствам близки к алюминию [14]. Недостатками цинковых покрытий являются их низкая коррозионная стойкость и непродолжительная защита, особенно в условиях морской атмосферы, поэтому для защиты стальных изделий, эксплуатируемых в морской атмосфере, используют кадмиевое покрытие. Однако кадмий токсичен и вреден для окружающей среды, поэтому его применение в авиастроении сокращается [15–17]. Существующие альтернативы пока не могут обеспечить достаточную защиту от контактной коррозии в течение всего срока службы изделия, а некоторые из них сложны в применении и небезопасны [18–20].

В работе [21] по результатам испытаний на контактную коррозию сборных образцов «сталь марки 08X18H10 (с различными покрытиями)–алюминиевый сплав 1440 (Ан.Окс.нхр)» установлено, что высокими защитными свойствами обладают покрытия цинк-никель, олово-цинк и гальванотермическое покрытие.

В данной статье рассматриваются несколько распространенных покрытий сплавами на основе цинка и многослойные гальванотермические покрытия в сравнении с кадмиевым покрытием, а также представлены результаты электрохимических исследований коррозионностойких сталей 08X18H10, 12X18H10T и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 (с покрытиями и без покрытий).

Материалы и методы

В работе применяли образцы из сталей марок 08X18H10, 12X18H10T и алюминиевых сплавов 1163, 1933, В95:

- для электрохимических исследований – образцы размером 70×30×2 мм;
- для испытаний в камере соляного тумана (КСТ) – образцы из сталей (70×25×2 мм) и алюминиевых сплавов (110×65×2 мм) с отверстиями М8.

Для подготовки, осаждения и наполнения покрытия на образцах из алюминиевых сплавов использовали электролиты в соответствии с ГОСТ 9.305–84 [22]. Анодное оксидирование образцов из алюминиевых сплавов проводили в растворе H_2SO_4 в течение 30 мин с последующим наполнением покрытия в растворе $K_2Cr_2O_7$ в течение 30 мин. Средняя толщина покрытия Ан.Окс.нхр составила 10 мкм.

Для приготовления растворов и электролитов применяли реактивы марок «хч» или «чда», деионизированную воду с электропроводностью не более 1 мкСм/см.

Обезжиривание образцов из сталей проводили в щелочном растворе при температуре 65 °С в течение 10 мин [22]. В соответствии с ГОСТ 9.402–2004 [23] осуществляли контроль качества обезжиривания.

Активацию поверхности стальных образцов и нанесение никелевого подслоя проводили в соответствии с ГОСТ 9.305–84 [22].

Термообработку образцов с покрытиями осуществляли в воздушной среде в сушильном шкафу: покрытие Ц-Н(85)9 – при температуре 190 °С в течение 2 ч [24], гальванотермическое покрытие – по двухступенчатому режиму.

Электрохимические исследования проводили с помощью потенциостата-гальваностата. Использовали трехэлектродную ячейку объемом 350 мл, позволяющую задавать рабочую (контактную) площадь образца 1 см². Платиновую сетку (2,5×2,5 мм) применяли в качестве вспомогательного электрода, хлорсеребряный электрод (х.с.э.) в насыщенном растворе KCl – в качестве электрода сравнения (потенциал относительно нормального водородного электрода +197 мВ). В качестве рабочего электролита использовали 3%-ный раствор NaCl. Исследование проводили путем измерения потенциала разомкнутой цепи $E_{p,ц}$ и регистрации потенциодинамических кривых: анодных (АПК) и катодных (КПК) поляризационных кривых. Измерение $E_{p,ц}$ образцов осуществляли

в течение 1 ч, принимая за стационарный потенциал $E_{ст}$ конечное значение при условии, что изменение $E_{р.ц}$ за последние 0,5 ч не превышало 30 мВ. Построение АПК и КПК проводили после выдержки в растворе в течение 1 ч. Устанавливали начальное значение потенциалов относительно $E_{ст}$: для АПК – положительнее на 100 мВ, для КПК – отрицательнее на 100 мВ. Использовали скорость развертки потенциала 0,166 мВ/с. Снятие АПК завершали при достижении потенциала +1000 мВ или плотности тока 20 мА/см². Снятие КПК прекращали при достижении потенциала –1000 мВ либо плотности тока 20 мА/см². Перед проведением измерений для удаления продуктов коррозии с поверхности образцов применяли шлифование (для образцов без покрытия) или выдержку при потенциале –1,2 В в течение 2 мин (для образцов с покрытием).

Ввиду высокого сопротивления анодно-оксидного покрытия на сплавах алюминия построение АПК и КПК не представляется возможным и указанный метод не подходит для характеристики подобных покрытий. Поэтому для электрохимической экспресс-оценки защитных свойств таких покрытий применяли метод спектроскопии электрохимического импеданса (СЭИ), суть которого заключается в анализе отклика электрохимической системы «электролит–покрытие–металл», к которой прилагается электрический сигнал (обычно синусоидальной формы) малой амплитуды (несколько десятков мВ) относительно свободного потенциала [21]. Самым простым способом оценки защитных свойств покрытий с использованием метода СЭИ является определение модуля импеданса при частоте 0,1 Гц (импеданс в области низких частот характеризует барьерные свойства покрытия). Исследование с помощью СЭИ проводили в диапазоне частот от 0,01 до 100 кГц (10 точек на одну декаду) посредством приложения синусоидального сигнала с амплитудой 25 мВ.

Пакеты, состоящие из образцов коррозионностойких сталей 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с электрохимическими покрытиями (сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр), гальванотермическим (Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр), кадмиевым (Кд9.хр)) и образцов из алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с Ан.Окс.нхр, для испытаний на контактную коррозию изготавливали в соответствии с ГОСТ 9.909–2023 (тип 2) (рис. 1) [25]. Испытания проводили в КСТ в соответствии с ГОСТ 9.308–85 (метод 1) [26] с непрерывным распылением 5%-ного нейтрального раствора NaCl в течение 2160 ч при температуре 35±2 °С и относительной влажности 95 %. Соотношение площади стального образца к площади образца из алюминиевого сплава составляло 1:4.

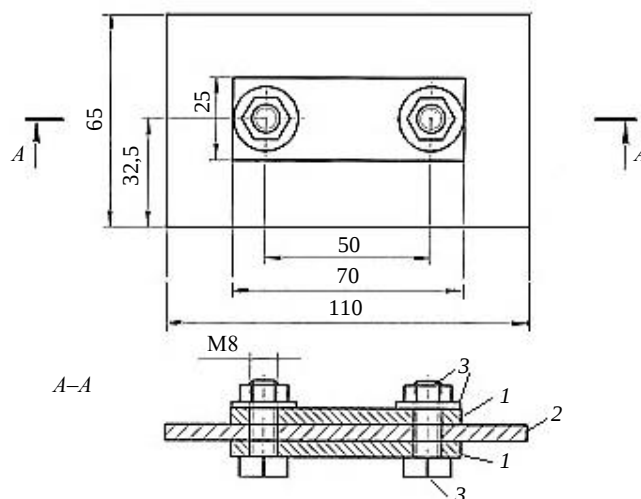


Рис. 1. Схема сборки пакета образцов для коррозионных испытаний: 1 – коррозионностойкая сталь с гальваническим покрытием; 2 – алюминиевый сплав с Ан.Окс.нхр; 3 – полипропиленовые болт, гайка и шайба

Измерение глубины коррозионных поражений на образцах алюминиевых сплавов в местах контакта со стальными образцами проводили с помощью профилометра в трех точках после удаления продуктов коррозии в растворе HNO_3 в соответствии с ГОСТ 9.907–2007 [27].

Результаты и обсуждение

Значения стационарных потенциалов $E_{\text{ст}}$ коррозионностойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T (с покрытиями и без покрытий) и алюминиевых сплавов 1163, B95, 1933 в 3%-ном растворе NaCl представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения стационарных потенциалов коррозионностойких сталей и алюминиевых сплавов без покрытий

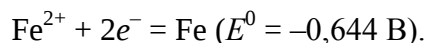
Металл	Стационарный потенциал $E_{\text{ст}} \pm 0,02$, В
Сталь 08X18H10	–0,03
Сталь 12X18H10T	–0,05
Алюминиевый сплав 1163	–0,62
Алюминиевый сплав 1933	–0,68
Алюминиевый сплав B95	–0,67

Таблица 2

Значения стационарных потенциалов коррозионностойких сталей с гальваническими покрытиями

Металл	Покрытие	Стационарный потенциал $E_{\text{ст}} \pm 0,02$, В
Сталь 08X18H10T Сталь 12X18H10T	Ц9.хр	–0,98
	Кд9.хр	–0,72
	Ц-Н(85)9.хр	–0,84
	О-Ц(80)9.хр	–0,88
	Ц4.О2.т.хр	–0,89
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	–0,91

Установлено, что стационарные потенциалы коррозионностойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T без покрытий в 3%-ном электролите NaCl имеют наиболее положительные значения: –0,03 и –0,05 В соответственно. Благодаря формированию пассивной пленки на поверхности коррозионностойких сталей в нейтральных средах [28–30], их стационарные потенциалы смещаются в положительную область. Это приводит к тому, что они становятся более электроположительными по сравнению с углеродистыми сталями (со стационарными потенциалами от –0,5 до –0,3 В) и потенциалом, определяемым равновесием Fe(II)/Fe по реакции [31]:



Разница между $E_{\text{ст}}$ исследованных сталей и алюминиевых сплавов составила ~(600–700) мВ, что свидетельствует о склонности этих материалов к контактной коррозии. При этом сталь будет являться катодом, а алюминиевый сплав – анодом, приводя к ускоренному окислению последнего. Этим определяется необходимость использования защитных покрытий при контакте металлов.

Значения $E_{ст}$, полученные для всех исследованных покрытий на сталях, оказались более отрицательными по сравнению со значениями $E_{ст}$ для алюминиевых сплавов, что свидетельствует о том, что при контакте они будут являться анодами и выступать в качестве жертвенного покрытия, защищая тем самым от коррозии сплавы алюминия. Наиболее отрицательные значения $E_{ст}$ в 3%-ном растворе NaCl показывают цинковое покрытие Ц9.хр (–0,98 В) и гальванотермические покрытия Ц4.О2.т.хр (–0,89 В) и Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр (–0,91 В). Наиболее близкие к $E_{ст}$ алюминиевых сплавов значения, а значит, потенциально более низкую склонность к контактной коррозии имеют кадмиевое Кд9.хр (–0,72 В), цинк-никелевое Ц-Н(85)9.хр (–0,84 В) и олово-цинковое О-Ц(80)9.хр (–0,88 В) покрытия.

В табл. 3 представлены значения модуля импеданса при частоте 0,1 Гц покрытий Ан.Окс.нхр на алюминиевых сплавах до и после испытаний в КСТ.

Таблица 3

Значения модуля импеданса при частоте 0,1 Гц покрытий Ан.Окс.нхр на алюминиевых сплавах 1163, 1933, В95 до и после испытаний в камере соляного тумана

Алюминиевый сплав с покрытием Ан.Окс.нхр	Модуль импеданса, МОм/см ²	
	до испытаний	после испытаний (1920 ч)
1163	601,99	40,18
1933	291,76	0,07
В95	1163,10	0,29

Проведенные исследования показали, что анодно-оксидные покрытия обладают высокими защитными свойствами, так как препятствуют переходу электронов между алюминиевым сплавом и другим контактным металлом. Однако со временем происходит значительное уменьшение значения модуля импеданса на несколько порядков, что свидетельствует о снижении защитных свойств за счет выщелачивания наполнения пленки. Следует отметить, что покрытие Ан.Окс.нхр может повреждаться также за счет механического воздействия, приводящего к образованию царапин, трещин, эрозии при взаимном трении с крепежными элементами. В таком случае коррозионные процессы будут активно протекать в местах повреждения анодно-оксидного покрытия, так как площадь катода (стали) будет значительно превышать площадь анода (алюминия). При определенных условиях образующиеся продукты коррозии могут вызывать внутренние напряжения, способствующие трещинообразованию и/или разрушению защитного покрытия, приводя к дальнейшему распространению коррозионного процесса. Наличие анодного покрытия на стали при контакте позволит избежать интенсивной коррозии алюминия в местах повреждения покрытия Ан.Окс.нхр.

Оценку защитных свойств гальванических покрытий на стальных образцах проводили с помощью графического анализа, основанного на построении и интерпретации АПК и КПК.

На рис. 2 изображены АПК и КПК для образцов из алюминиевых сплавов 1163 (а, б), 1933 (в, г), В95 (д, е) и сталей 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с исследуемыми покрытиями.

На рис. 3 представлено графическое определение потенциала контактной коррозии ($E_{к.к}$) и плотности тока коррозии ($i_{к.к}$) для системы, состоящей из сплава Sn–Zn и алюминиевого сплава 1163. Полученные таким образом значения $E_{к.к}$ и $i_{к.к}$ для исследованных контактных пар представлены в табл. 4.

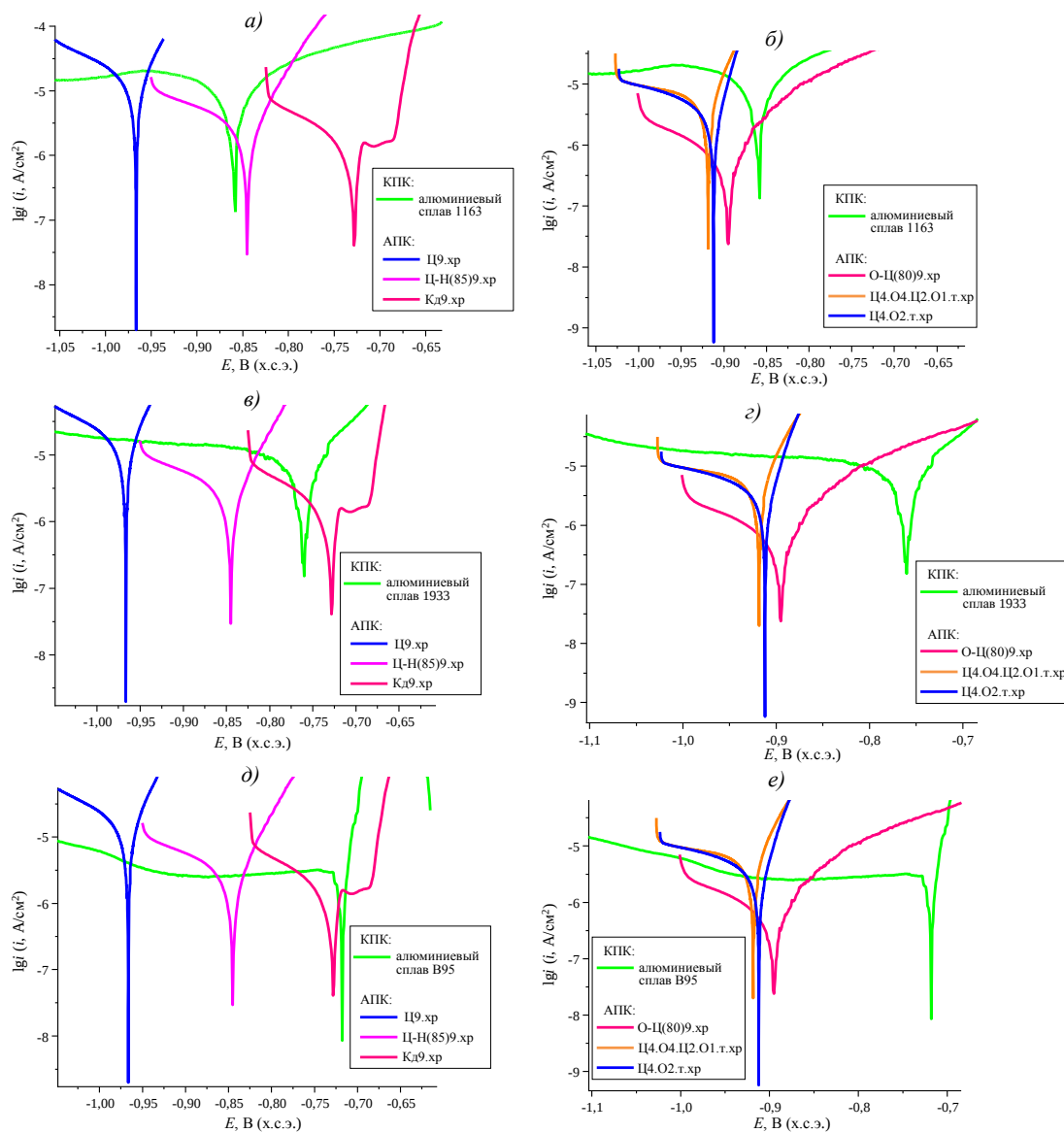


Рис. 2. Анодные (АПК) и катодные (КПК) поляризационные кривые в координатах $\lg i$ - E (х.с.э. – электрод сравнения)

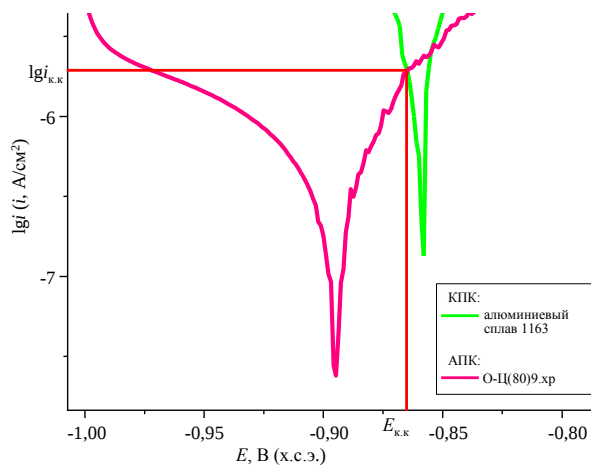


Рис. 3. Определение потенциала контактной коррозии $E_{k.k}$ и плотности тока контактной коррозии $i_{k.k}$ (х.с.э. – электрод сравнения)

**Значения потенциала контактной коррозии $E_{к.к}$
и плотности тока контактной коррозии $i_{к.к}$ контактных пар**

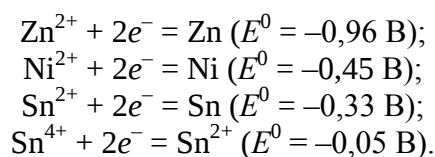
Покрyтия на сталях 08X18H10 и 12X18H10T	Значения показателей для алюминиевых сплавов					
	1163		1933		B95	
	$E_{к.к} \pm 0,02$, В	$i_{к.к}$, мкА/см ²	$E_{к.к} \pm 0,02$, В	$i_{к.к}$, мкА/см ²	$E_{к.к} \pm 0,02$, В	$i_{к.к}$, мкА/см ²
Кд9.хр	–0,82	17,0*	–0,75	1,90*	–0,72	0,93
Ц9.хр	–0,95	20,90	–0,96	17,00	–0,96	3,98
Ц-Н(85)9.хр	–0,86	1,74*	–0,81	10,50	–0,83	2,69
О-Ц(80)9.хр	–0,86	1,91	–0,81	10,00	–0,85	2,57
Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	–0,90	14,10	–0,90	14,80	–0,91	2,70
Ц4.О2.т.хр	–0,89	12,60	–0,89	14,10	–0,91	2,70

* Алюминиевый сплав является анодом.

Согласно полученным данным, большинство рассмотренных покрытий являются анодами по отношению к алюминиевым сплавам. Наиболее близкие значения к потенциалу коррозии $E_{кор}$ алюминиевых сплавов 1933 и B95 среди анодных покрытий имела система Ц-Н(85)9.хр (рис. 2, в, д), в случае со сплавом 1163 их значения $E_{кор}$ практически совпадали (рис. 2, а).

Величина плотности тока в общем случае – это показатель скорости коррозионного процесса, что является следствием закона Фарадея. Согласно полученным данным, наименьшими значениями плотности тока контактной коррозии обладают покрытия цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр), олово-цинк (О-Ц(80)9.хр) и кадмиевое (Кд9.хр) (в контакте со сплавом B95). Однако следует отметить, что в двух других случаях покрытие Кд9.хр в контакте с алюминиевыми сплавами 1163 и 1933 являлось катодом и не подходило в качестве жертвенного покрытия.

Окисление гальванических покрытий происходит по сложному механизму, поэтому в процессе эксплуатации может меняться характер контактной коррозии. На рис. 4 в линейных координатах представлены АПК стальных образцов с покрытиями, на которых видно наличие нескольких пиков анодного окисления, заканчивающихся вторичной пассивацией. При потенциалах >100 мВ наблюдается резкое увеличение плотности тока, в данной области потенциалов происходит полное растворение покрытия согласно справочным данным по реакциям:



Однако при этом растворение подложки наблюдается при более положительных потенциалах (табл. 5). В большинстве случаев полное растворение рассмотренных покрытий осуществляется при более положительных потенциалах, нежели потенциал $E_{ст}$ для алюминиевых сплавов. На АПК гальванотермического покрытия (рис. 4) имеются пики анодного окисления при потенциалах –750, –470 и –280 мВ. Положение пиков указывает на процесс селективного растворения цинка из фаз с различным содержанием данного металла. По мере протекания процесса будет происходить постепенное обезлегирование поверхности по цинку, и потенциал на поверхности покрытия будет смещаться в положительную область, увеличивая защитные свойства покрытия.

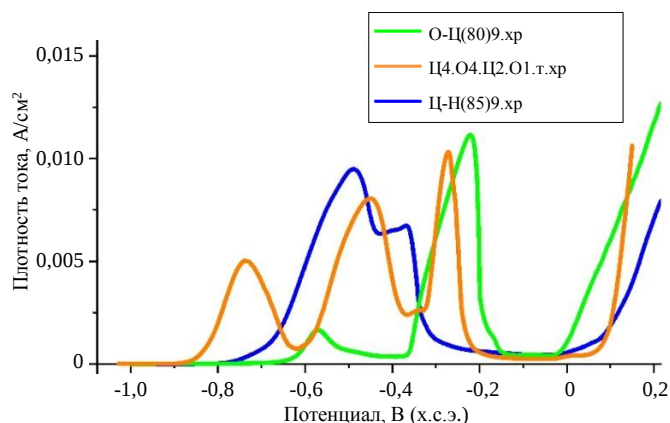


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые в линейных координатах для образцов с покрытиями сплавами олово-цинк, цинк-никель и многослойным гальванотермическим покрытием (х.с.э. – электрод сравнения)

Таблица 5

Значения потенциала перепассивации для сталей 12X18H10T, 08X18H10 и гальванических покрытий

Металл	Покрытие	Потенциал перепассивации $E_{пер}$, В
12X18H10T	Без покрытия	0,52
08X18H10		0,39
12X18H10T	Ц9.хр	0,08
08X18H10	Кд9.хр	0,05
	Ц-Н(85)9.хр	0,02
	О-Ц(80)9.хр	0,13
	Ц4.О2.т.хр	0,11
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	0,09

По результатам проведенных электрохимических исследований для дальнейших испытаний выбраны покрытие сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) и многослойное гальванотермическое покрытие (Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр).

В КСТ проведены испытания пакетов образцов из сталей марок 08X18H10 и 12X18H10T с гальваническими покрытиями и алюминиевых сплавов 1163, В95 и 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр. Проведенные испытания в течение 2160 ч показали, что коррозионные поражения на образцах из сталей марок 08X18H10 и 12X18H10T отсутствуют, определены значения глубины коррозионных поражений алюминиевых сплавов с анодно-оксидным покрытием в местах контакта со сталью (табл. 6 и 7).

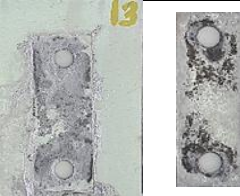
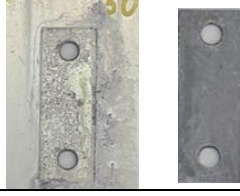
Таблица 6

Результаты осмотра пакетов образцов из коррозионностойких сталей с гальваническими покрытиями и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр в процессе и после испытаний в течение 2160 ч на контактную коррозию в камере соляного тумана

Сталь	Гальваническое покрытие	Время до появления продуктов коррозии покрытия на стали, сут	Глубина коррозионных поражений алюминиевых сплавов с покрытием Ан.Окс.нхр после 2160 ч испытаний (среднее значение), мкм		
			1163	В95	1933
08X18H10	Кд9.хр	8	51,5	69,5	41,9
	Ц-Н(85)9.хр	1	16,0	17,6	14,9
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	4	17,5	18,3	16,3
12X18H10T	Кд9.хр	8	88,7	94,8	81,1
	Ц-Н(85)9.хр	1	13,5	18,8	11,5
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	4	20,8	19,9	21,5

Таблица 7

Внешний вид сборочных пакетов образцов из стали 08X18H10 с покрытием сплавом В95 (Ан.Окс.нхр) до и после проведения ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана в течение 2160 ч

Сборочный образец (пакет)	До испытаний (в исходном состоянии)	После испытаний	
		в сборе	в разобранном виде
08X18H10 (Кд9.хр) + В95 (Ан.Окс.нхр)			
08X18H10 (Ц-Н(85)9.хр) + В95 (Ан.Окс.нхр)			
08X18H10 (Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр) + В95 (Ан.Окс.нхр)			

Установлено, что на кадмиевом покрытии через 1 сут испытаний обесцветилась желтая хроматная пленка, а первые продукты коррозии покрытия появились через 8 сут. Первые продукты коррозии покрытия сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) появились через 1 сут, на гальванотермическом покрытии системы цинк-олово (Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр) – через 4 сут. Таким образом, многослойное гальванотермическое покрытие системы цинк-олово обладает большей коррозионной стойкостью по сравнению с покрытием цинк-никель, однако менее всего подвержены коррозии алюминиевые сплавы, находящиеся в контакте с покрытием цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр). Полученные результаты также подтверждаются проведенными электрохимическими исследованиями защитной способности покрытий, которые показали, что наименьшим образом контактной коррозии подвержено покрытие цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр).

Заключения

Проведенные электрохимические исследования покрытий и образцов из алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр показали, что:

- значения стационарных потенциалов образцов из нержавеющей сталей 12Х18Н10Т и 08Х18Н10 в 3%-ном растворе NaCl имеют наиболее положительные значения – от –0,05 до –0,03 В;
- наиболее близкие к стационарным потенциалам алюминиевых сплавов значения в 3%-ном растворе NaCl, а значит, потенциально более низкую склонность к контактной коррозии имели кадмиевое (Кд9.хр), цинк-никелевое (Ц-Н(85)9.хр) и олово-цинковое (О-Ц(80)9.хр) покрытия.

Проведено исследование защитных свойств покрытий на алюминиевых сплавах методом импедансной спектроскопии. Установлено, что:

- со временем происходит снижение защитных свойств покрытий из-за выщелачивания наполнения покрытий;
- самыми высокими защитными свойствами после испытаний в КСТ в течение 1920 ч обладало покрытие Ан.Окс.нхр, сформированное на алюминиевом сплаве 1163.

Проведенный анализ анодных и катодных поляризационных кривых показал, что в наименьшей степени контактной коррозии подвержены покрытия цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) и олово-цинк (О-Ц(80)9.хр). Вместе с тем многокомпонентные гальванотермические покрытия (Ц4.О2.т.хр, Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр) могут уменьшать свою склонность к контактной коррозии за счет селективного выщелачивания цинка и, как следствие, смещения потенциала коррозии в положительную область.

По результатам ускоренных коррозионных испытаний в КСТ пакетов образцов из нержавеющей стали 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с исследуемыми электрохимическими покрытиями и образцов из алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр установлено, что гальванотермическое покрытие Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр и покрытие сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) обладают высокими защитными свойствами: после выдержки в КСТ в течение 2160 ч (3 мес.) отсутствуют продукты коррозии стали. Менее всего подвержены коррозии алюминиевые сплавы, находящиеся в контакте с цинк-никелевым покрытием (Ц-Н(85)9.хр).

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

Список источников

1. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Исламов Р.С. Интерметаллическое соединение Ti_2AlNb – перспективный материал для авиационной и космической техники. Часть 1. Кристаллическая структура и фазовые превращения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-42-61.
2. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (85). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
3. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
4. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-195-211.
5. Peng Y., Zhao J., Liu Y. et al. Galvanic corrosion between Al–Zn–Mg–Cu alloy and stainless steel in the salt-spray atmosphere // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 294. Art. 127009. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.127009.
6. Вахромов Р.О., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Милевская Т.В. Обобщение опыта применения и оптимизация технологии изготовления полуфабрикатов из высокопрочного алюминиевого сплава 1933 для силовых конструкций современной авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2. С. 34–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-34-39.
7. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Ruiz A.G., Jimenez-Gonzalez E., Canoc E. et al. The corrosion products in a carbon steel/aluminum alloy galvanic couple under thin electrolyte films: An efficient model // Electrochemistry Communications. 2019. Vol. 104. Art. 106485. DOI: 10.1016/j.elecom.2019.106485.
9. Matzdorf C.A., Nickerson W.C., Rincon Tronconis B.C. et al. Galvanic Test Panels for Accelerated Corrosion Testing of Coated Al Alloys: Part 1 – Concept // Corrosion. 2013. Vol. 69. Is. 12. P. 1240–1246.
10. ГОСТ 9.005–72. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами. М.: Стандартинформ, 2008. 28 с.
11. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Metallurgia, 1970. 448 с.
12. ASTM STP 576. Galvanic and Pitting Corrosion – Field and Laboratory Studies. American Society for Testing and Materials, 1974. P. 5–19.

13. Kucera V., Mattson E. Atmospheric Corrosion of Bimetallic Structures // *Atmospheric Corrosion*. Wiley & Sons, 1982. P. 561–574.
14. Матыс В.Г., Поплавский В.В. Устойчивость алюминия и его сплава к контактной коррозии в гальванопарах со сталями с металлическими покрытиями // *Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ*. 2015. № 3. С. 85–92.
15. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И., Вдовин А.И. Сравнительная оценка защитной способности гальванотермического покрытия системы цинк-олово и кадмиевого покрытия в среде хлоридов // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 5. С. 21–29. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29.
16. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
17. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Деговец М.Л. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 2. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
18. Navinsek B., Panjan P., Milosev I. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 116–119. P. 476–487.
19. Enders B., Knau B.S., Wolf G.K. Corrosion properties of aluminum based alloys deposited by ion beam assisted deposition // *Surface and Coatings Technology*. 1994. Vol. 65. P. 203–207.
20. Jianming X., Weijiang Z., Wolf G.K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBADE // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 187. P. 194–198.
21. Закирова Л.И., Сибилева С.В., Демин С.А., Дуюнова В.А. Исследование гальванических покрытий коррозионностойких сталей для предотвращения контактной коррозии // *Труды ВИАМ*. 2024. № 9 (139). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.
22. ГОСТ 9.305–84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий. М.: Изд-во стандартов, 2003. 105 с.
23. ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартинформ, 2006. 43 с.
24. ГОСТ 9.302–88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 2001. 40 с.
25. ГОСТ 9.909–2023. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические, металлы и сплавы. Методы испытаний на климатических испытательных станциях. М.: РСТ, 2023. 12 с.
26. ГОСТ 9.308–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990. 21 с.
27. ГОСТ Р 9.907–2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. М.: Стандартинформ, 2007. 19 с.
28. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.
29. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 592 с.
30. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р., Горбовец М.А. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
31. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяном соединении, используемом в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

References

1. Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Alekseyev E.B., Islamov R.S. Intermetallic compound Ti_2AlNb – promising material for aviation and space technology. Part 1. Crystal structure and phase transformations. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-42-61.
2. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
3. Illarionov E.I., Kolobnev N.I., Gorbunov P.Z., Kablov E.N. *Aluminum alloys in aerospace engineering*. Gen. ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2001, 192 p.
4. Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
5. Peng Y., Zhao J., Liu Y. et al. Galvanic corrosion between Al–Zn–Mg–Cu alloy and stainless steel in the salt-spray atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, vol. 294, art. 127009. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.127009.
6. Vahromov R.O., Tkachenko E.A., Popova O.I., Milevskaya T.V. Summarizing of the experience of usage and optimization of manufacturing technology semi-fished product of high strength aluminum alloy 1933 for the primary structures of modern aircraft. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 34–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-34-39.
7. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Ruiz A.G., Jimenez-Gonzalez E., Canoc E. et al. The corrosion products in a carbon steel/aluminum alloy galvanic couple under thin electrolyte films: An efficient model. *Electrochemistry Communications*, 2019, vol. 104, art. 106485. DOI: 10.1016/j.elecom.106485.
9. Matzdorf C.A., Nickerson W.C., Rincon Tronconis B.C. et al. Galvanic Test Panels for Accelerated Corrosion Testing of Coated Al Alloys: Part 1 – Concept. *Corrosion*, 2013, vol. 69, is. 12, pp. 1240–1246.
10. State Standard 9.005–72. *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals, alloys, metallic and non-metallic inorganic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals*. Moscow: Standartinform, 2008, 28 p.
11. Rosenfeld I.L. *Corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 448 p.
12. ASTM STP 576. *Galvanic and Pitting Corrosion – Field and Laboratory Studies*. American Society For Testing And Materials, 1974, pp. 5–19.
13. Kucera V., Mattson E. Atmospheric Corrosion of bimetallic Structures. *Atmospheric Corrosion*. Wiley & Sons, 1982, pp. 561–574.
14. Matys V.G., Poplavsky V.V. Resistance of aluminum and its alloy to contact corrosion in galvanic couples with steels with metallic coatings. *Trudy BGTU: Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv*, 2015, no. 3, pp. 85–92.
15. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I., Vdovin A.I. Comparative assessment of the protective ability of a galvanothermic coating of the zinc-tin system and a cadmium coating in a chloride environment. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2020, no. 5, pp. 21–29. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29.
16. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
17. Laptev A.B., Zakirova L.I., Degovets M.L. Properties of protective galvanic coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 2. Hydrogen embrittlement and frictional characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
18. Navinsek B., Panjan P., Milosev I. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 116–119, pp. 476–487.

19. Enders B., Knau B.S., Wolf G.K. Corrosion properties of aluminum based alloys deposited by ion beam assisted deposition. *Surface and Coatings Technology*, 1994, vol. 65, pp. 203–207.
20. Jianming X., Weijiang Z., Wolf G.K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBAD. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 187, pp. 194–198.
21. Zakirova L.I., Sibileva S.V., Demin S.A., Duyunova V.A. Investigation of electroplating of corrosion-resistant steels to prevent contact corrosion. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.
22. State Standard 9.305–84. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Operations of technological processes for obtaining coatings*. Moscow: Publ. House of Standards, 2003, 105 p.
23. State Standard 9.402–2004. *Unified system of corrosion and aging protection. Paint and varnish coatings. Preparation of metal surfaces for painting*. Moscow: Standartinform, 2006, 43 p.
24. State Standard 9.302–88. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Control methods*. Moscow: Publ. House of Standards, 2001, 40 p.
25. State Standard 9.909–2023. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings, metals and alloys. Test methods at climatic test stations*. Moscow: RST, 2023, 12 p.
26. State Standard 9.308–85. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Accelerated corrosion testing methods*. Moscow: Publ. House of Standards, 1990, 21 p.
27. State Standard R 9.907–2007. *Unified system of corrosion and aging protection. Metals, alloys, metallic coatings. Methods of removing corrosion products after corrosion testing*. Moscow: Standartinform, 2007, 19 p.
28. Zhuk N.P. *Course in the theory of corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 472 p.
29. Tomashov N.D. *Theory of corrosion and protection of metals*. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1959, 592 p.
30. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 2. Formation of passive films and hydrogen sulfide cracking of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
31. Kablov E.N., Kutyrev 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), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

Информация об авторах

Закирова Лилия Ильдусовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сибилева Светлана Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вдовин Александр Ильич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кольцова Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Liliya I. Zakirova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana V. Sibileva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Vdovin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Koltsova, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.08.2025.

The article was submitted 08.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 12.08.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-77-89

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ С ВЫСОКОЙ СТОЙКОСТЬЮ К СУЛЬФИДНО-ОКСИДНОЙ КОРРОЗИИ

С.А. Будиновский¹, А.С. Бенклян¹, Д.А. Мовенко¹, С.В. Татарников¹

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

Аннотация. Представлены результаты испытания на жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С на базе 30 циклов образцов из сплава ЖС32 с серийными ионно-плазменными жаростойкими и коррозионностойким покрытиями. По результатам испытаний наиболее высокий комплекс защитных свойств имеют покрытия СДП-42 + ВСДП-16 и ВСДП-3 + ВСДП-16, в которых отсутствует диффузия серы и хлора с поверхности во внутренние слои жаропрочного сплава. Покрытия превосходят в условиях испытаний серийное коррозионностойкое покрытие СДП-1Т + ВСДП-13.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология, жаропрочные никелевые сплавы, ионно-плазменные покрытия, изотермическая жаростойкость, сульфидно-оксидная коррозия

Для цитирования: Будиновский С.А., Бенклян А.С., Мовенко Д.А., Татарников С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с высокой стойкостью к сульфидно-оксидной коррозии // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-77-89.

Scientific article

ION-PLASMA HEAT-RESISTANT COATINGS WITH HIGH RESISTANCE TO SULFIDE-OXIDE CORROSION

S.A. Budinovskiy¹, A.S. Benklyan¹, D.A. Movenko¹, S.V. Tatarnikov¹

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 paper presents the results of heat resistance testing of ZhS32 alloy samples with serial ion-plasma heat-resistant and corrosion-resistant coatings. The tests demonstrated heat resistance at 1150 °C for 400 h and resistance to sulfide-oxide corrosion at 750 and 850 °C for 30 cycles. According to the test results, the coatings SDP-42 + VSDP-16 and VSDP-3 + VSDP-16 exhibit the highest set of protective properties. These coatings prevent diffusion of sulfur and chlorine from the surface into the inner layers of the heat-resistant alloy. The above mentioned coatings out-perform the standard corrosion-resistant coating SDP-1T + VSDP-13 under test conditions.

Keywords: ion-plasma technology, heat-resistant nickel alloys, ion-plasma coatings, isothermal heat resistance, sulfide-oxide corrosion

For citation: Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Movenko D.A., Tatarnikov S.V. Ion-plasma heat-resistant coatings with high resistance to sulfide-oxide corrosion. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-77-89.

Введение

Опыт эксплуатации газотурбинных агрегатов показал, что ресурс работы турбины определяется не только характеристиками прочности используемых материалов сопловых и рабочих лопаток турбины, но и развитием на поверхности пера лопаток процессов коррозии различной природы, которые при контакте горячего газа турбины с поверхностью пера реализуются в виде высокотемпературного окисления или сульфидно-оксидной коррозии, приводящих в конечном итоге к разрушению лопатки. По мере роста рабочей температуры газа турбины для изготовления лопаток были разработаны сплавы на основе железа и никеля, обладающие необходимой жаропрочностью. Эти сплавы имели в своем составе хром в количестве, достаточном для образования на поверхности пера сплошной защитной пленки на основе оксида хрома, которая сохраняла свои защитные свойства вплоть до температур 850–900 °С. При разработке новых поколений литейных никелевых сплавов с рабочей температурой до 1150 °С основной задачей было достижение нового уровня жаропрочности, а разработка защитных покрытий для пера лопаток, позволяющих многократно повысить их долговечность, стала самостоятельной материаловедческой задачей.

Высокотемпературное окисление ограничивает срок службы лопаток турбин с относительно постоянной скоростью окисления поверхности пера. В отличие от этого разрушение лопаток турбин от сульфидно-оксидной коррозии может носить неконтролируемый характер, а в ряде случаев имеет катастрофические последствия. Причиной возникновения сульфидно-оксидной коррозии является попадание в турбину различных примесей из топлива или воздушной атмосферы. Отметим, что механизм развития сульфидно-оксидной коррозии, а также интенсивность ее протекания, существенно зависят от множества различных внешних факторов, в том числе от материала лопаток, качества топлива, региона эксплуатации, температурных режимов работы турбины и т. д. В зависимости от температуры обычно рассматривают два характерных типа сульфидно-оксидной коррозии. *Первый тип* реализуется в области относительно невысоких температур 600–700 °С и связан с попаданием на поверхность пера серы, приводящей к образованию эвтектических расплавов сульфитов никеля и кобальта на поверхности лопаток. *Второй тип* сульфидно-оксидной коррозии наблюдается в интервале температур 800–900 °С при взаимодействии поверхности пера из жаропрочного сплава и смеси отложений, содержащих сульфат и хлорид натрия из окружающей среды.

В настоящее время газовые турбины широко используются в разных отраслях промышленности, на транспорте, в энергетике, в том числе и в транспортируемых полевых электрогенераторах большой мощности [1–18]. Таким образом, во всех сферах стоит задача достижения максимального срока службы турбины с использованием различных защитных покрытий [19–29]. Выбор эффективного покрытия затруднен тем, что температурное поле на поверхности пера существенно неоднородно, в результате чего на поверхности пера лопаток одновременно присутствуют участки с температурой от 600 до 1150 °С и более, что приводит к появлению разных типов коррозионного повреждения на рабочей поверхности пера одной лопатки. В данной статье представлены результаты исследований серийных двухслойных конденсационно-диффузионных ионно-плазменных покрытий для защиты лопаток турбин от высокотемпературного окисления при температуре 1150 °С и сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С для выбора универсальной композиции защитного ионно-плазменного покрытия, способной обеспечить защиту лопаток газовых турбин, изготовленных из жаропрочного литейного сплава на основе никеля ЖС32, одновременно от высокотемпературного окисления и сульфидно-оксидной коррозии.

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

Материалы и методы

Исследована изотермическая жаростойкость при температуре 1150 °С и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С образцов в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 3 мм из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с ионно-плазменными покрытиями. Рассмотрено четыре варианта двухслойных конденсационно-диффузионных покрытий, в том числе три жаростойких покрытия систем: ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16, СДП-2 + ВСДП-16, и коррозионностойкого покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 с внутренними слоями на основе никелевых сплавов толщиной 40–80 мкм и внешним слоем на основе двух алюминиевых сплавов с удельным привесом 20–40 г/м². Нанесение покрытий проводили по серийной технологии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на промышленной установке ионно-плазменного напыления типа МАП-2 [30–34] с использованием катодов из никелевых сплавов марок СДП-1Т (NiCoCrAlTiY), СДП-2 (NiCrAlY), ВСДП-3 (NiCrAlReHfY), СДП-42 (NiCrAlTaWHfY) и алюминиевых сплавов марок ВСДП-16 (AlNiY) и ВСДП-13 (AlNiSiB). Установки типа МАП широко используются в двигателестроительной отрасли, позволяют с высокой точностью воспроизводить процессы нанесения металлических и керамических покрытий вакуумно-дуговым методом, обеспечивая при этом высокое качество получаемых покрытий. После нанесения покрытий образцы отожжены в вакуумной печи.

Испытания покрытий на жаростойкость проводили по ГОСТ 6130–71 «Методы определения жаростойкости» при температуре 1150 °С на базе испытаний 400 ч. Через 10–20 ч образцы извлекали для взвешивания (по три образца каждой системы) с помощью аналитических весов (точность измерения составляла 0,0001 г), после чего определяли среднеарифметическую величину удельного изменения массы образцов с покрытиями (отношение изменения массы образца к площади поверхности образца в исходном состоянии).

Циклические испытания на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С проводили по методике НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Перед испытаниями образцы обезжиривали органическим растворителем и взвешивали на аналитических весах с точностью $\pm 0,0002$ г. Испытания проводили по циклическому режиму. Один цикл испытания включал: нанесение на подогретую поверхность образцов солевой корки путем напыления водного раствора смеси натриевой соли серной кислоты (Na₂SO₄) и хлорида натрия (NaCl) и выдержку образцов при заданной температуре (750 и 850 °С) в течение 1 ч в муфельной электропечи сопротивления с воздушной атмосферой. Охлаждение образцов осуществляли на воздухе. Общая продолжительность испытаний составляла 30 циклов. Стойкость образцов к сульфидно-оксидной коррозии оценивали по удельному изменению массы. Для определения кинетики процесса сульфидно-оксидной коррозии через каждые пять циклов испытаний образцы взвешивали для построения графиков изменения удельной массы.

Исследование структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с покрытиями в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии проводили на оптическом микроскопе с цифровой системой обработки изображения при увеличении до $\times 500$.

Анализ локального элементного состава проведен в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015 на растровом электронном микроскопе, оснащенном энергодисперсионным спектрометром, при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 300 пА. Получены изображения микроструктуры образцов в режиме отраженных электронов.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные зависимости изменения удельной массы образцов в процессе испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч

представлены на рис. 1. Видно, что по результатам испытаний лучшей жаростойкостью в данном эксперименте обладают покрытия систем СДП-42 + ВСДП-16 и СДП-1Т + ВСДП-13. Однако следует отметить, что покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13 относится к коррозионностойким и легировано кобальтом и хромом (суммарно – до 40 % (по массе)). При повышении температуры испытаний до 1200 °С его жаростойкость резко снижается. В то же время жаростойкие покрытия систем ВСДП-3 + ВСДП-16 и СДП-2 + ВСДП-16 обеспечивают длительную защиту жаропрочных никелевых сплавов от окисления при температурах 1200 °С и более.

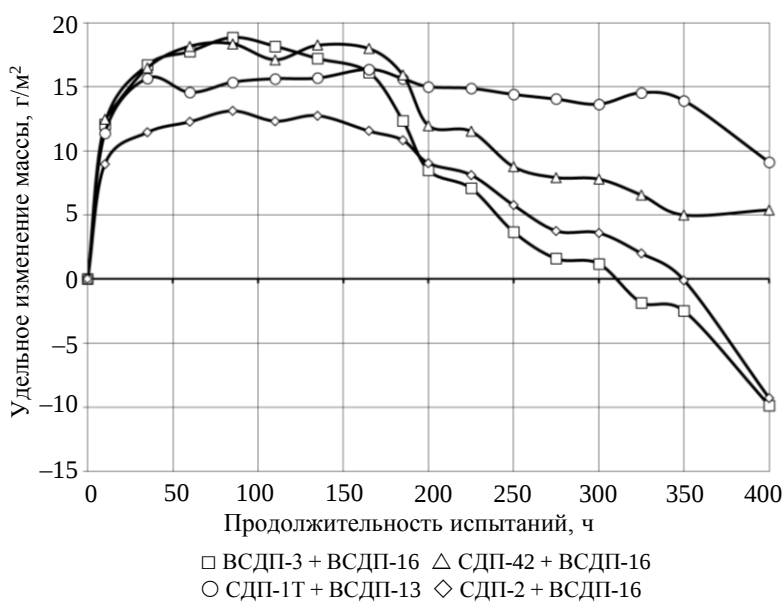


Рис. 1. Зависимости удельного изменения массы образцов с защитными покрытиями систем ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16, СДП-2 + ВСДП-16 и СДП-1Т + ВСДП-13 по результатам испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С в течение 400 ч

На рис. 2 представлены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытий систем СДП-2 + ВСДП-16 (рис. 2, а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (рис. 2, б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С. Видно, что покрытия в исходном состоянии имеют многослойную структуру с внешним слоем на основе моноалюминид никеля. В процессе окисления кислородом и взаимодействия с сульфатом и хлоридом натрия внешний слой покрытий становится рыхлым. Покрытие системы СДП-2 + ВСДП-16 при температуре 750 °С утрачивает защитные свойства на половину толщины алюминидного слоя, а при 850 °С – полностью на всю толщину (рис. 2, а). В покрытии системы СДП-1Т + ВСДП-13 моноалюминид никеля во внешнем слое сохраняется, но из-за коррозионных повреждений покрытия его защитные свойства также теряются (рис. 2, б), так как на поле шлифа видны выходы пор на поверхность, заполненную продуктами коррозии.

На рис. 3 представлены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытия системы ВСДП-3 + ВСДП-16 заявленной толщины (рис. 3, а) и в 2 раза меньше (рис. 3, б) в исходном состоянии и после испытания на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С. Видно, что независимо от толщины слоя покрытия обеспечили защиту образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 от сульфидно-оксидной коррозии.

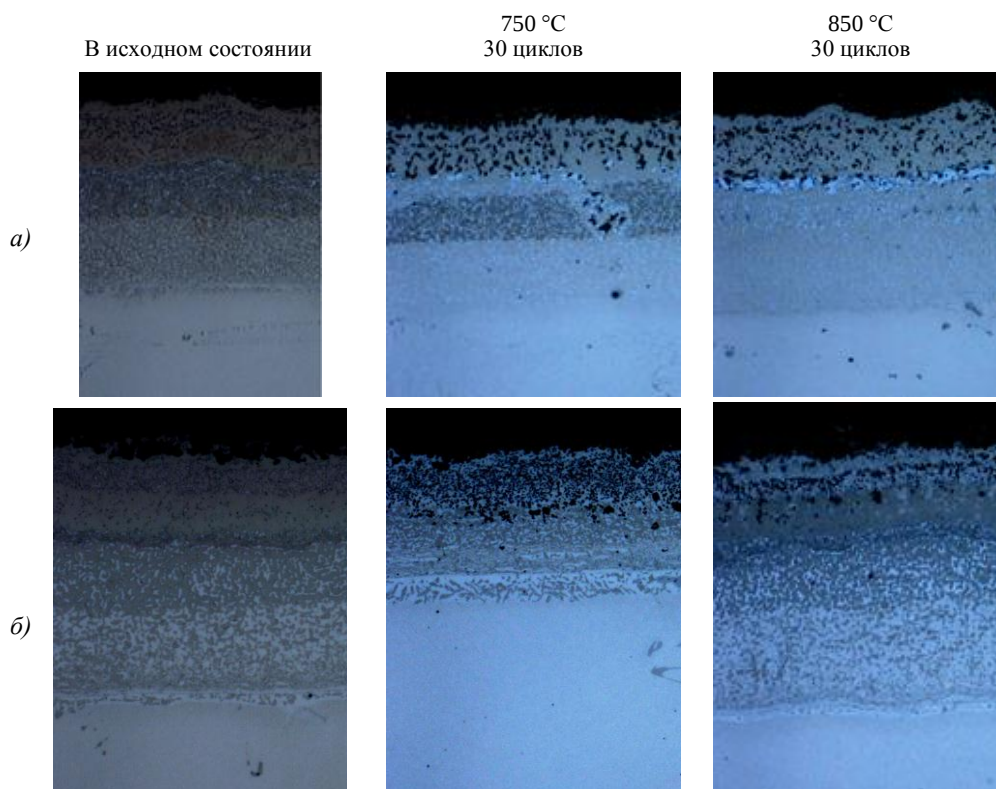


Рис. 2. Микроструктуры покрытий систем СДП-2 + ВСДП-16 (а) и СДП-1Т + ВСДП-13 (б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-окислительной коррозии при температурах 750 и 850 °С

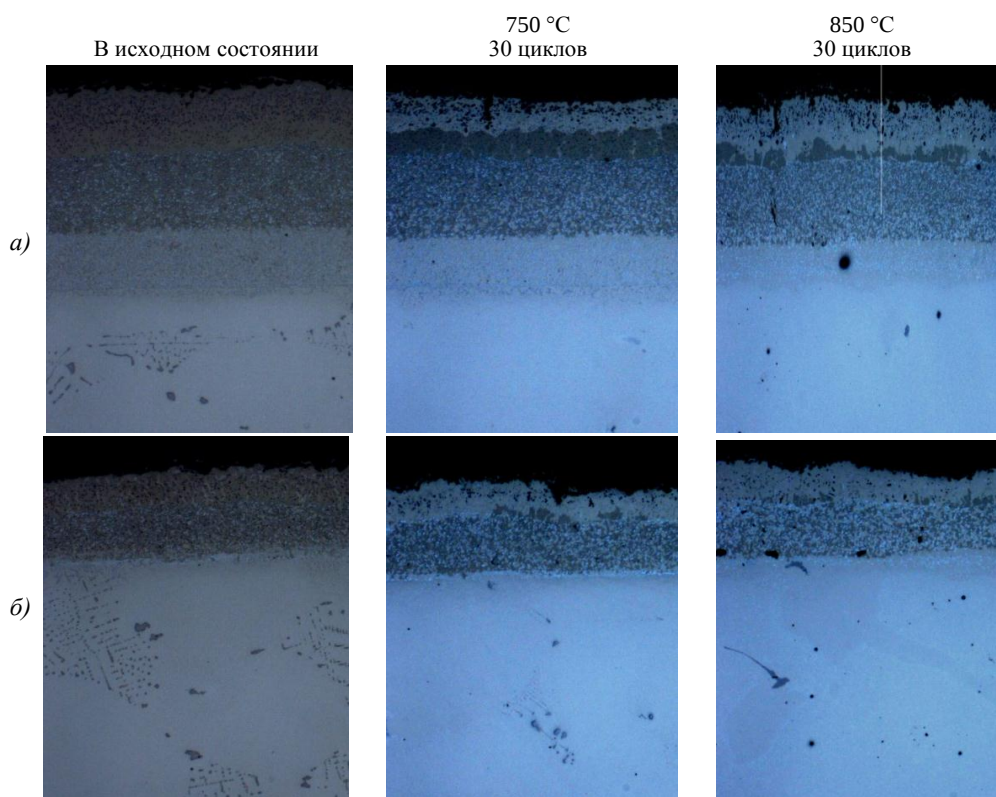


Рис. 3. Микроструктуры покрытий систем ВСДП-3 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) (а) и ВСДП-3 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м²) (б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-окислительной коррозии при температурах 750 и 850 °С

На рис. 4 представлены результаты металлографических исследований микроструктуры покрытий систем СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) (рис. 4, а) и СДП-42 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м²) (рис. 4, б) в исходном состоянии и после испытания на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С. Коррозионные повреждения видны в тонком поверхностном слое покрытий. Слой моноалюминид-да никеля локальных коррозионных повреждений не имеет. Высокие защитные свойства покрытия от коррозии, очевидно, связаны с высоким содержанием хрома (до 25 % (по массе)) в подслое из сплава СДП-42.

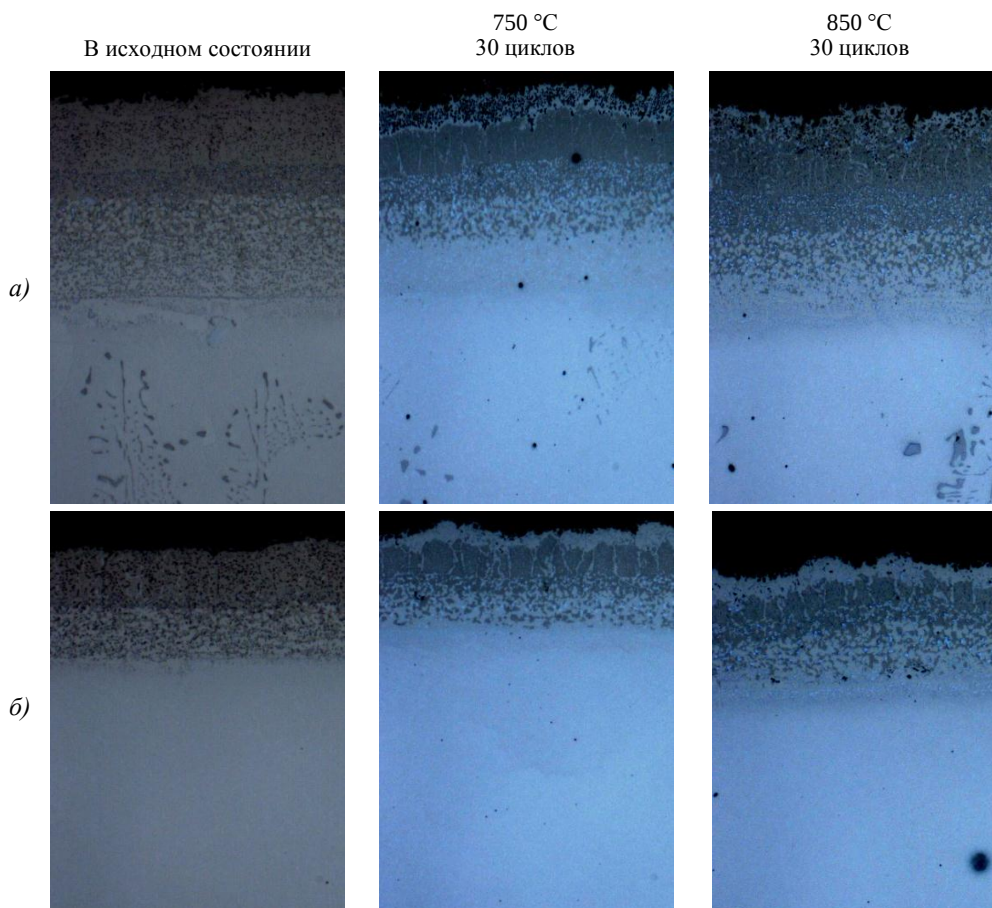


Рис. 4. Микроструктуры покрытий систем СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) (а) и СДП-42 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м²) (б) в исходном состоянии и после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С

При анализе микроструктур покрытий после испытаний (рис. 2–4) следует отметить, что повреждение поверхности покрытий систем СДП-2 + ВСДП-16 и СДП-1Т + + ВСДП-13 имеет локальный (питтинговый) характер, а у покрытий систем ВСДП-3 + + ВСДП-16 и СДП-42 + ВСДП-16 – фронтальный. Количественные характеристики коррозионного повреждения (удельное изменение массы образцов за 30 циклов испытаний) некоторых покрытий приведены в табл. 1.

Следует отметить, что представленные значения удельного изменения массы образцов с покрытиями являются результатом динамического равновесия между процессами формирования и накопления коррозионноустойчивых соединений на поверхности защищаемого жаропрочного сплава и продуктами коррозии, которые осыпаются с поверхности или накапливаются под покрытием и способствуют его разрушению. Этот

эффект хорошо виден на примере покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13. Покрытие толщиной 80 мкм по удельному изменению массы не уступает покрытиям систем ВСДП-3 + ВСДП-16 и СДП-42 + ВСДП-16 той же толщины. Но то же покрытие меньшей толщины (40 мкм) разрушается катастрофически, что свидетельствует о питтинговом механизме коррозии покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 (рис. 2, б).

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 750 °С

Система покрытия	Удельное изменение массы (за 30 циклов испытаний), г/м ²
ВСДП-3 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м ²)	8,05–0,11
ВСДП-3 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м ²)	0,58–0,41
СДП-1Т (80 мкм) + ВСДП-13 (40 г/м ²)	17,5–24,98
СДП-1Т (40 мкм) + ВСДП-13 (20 г/м ²)	(–233)–(–106)
СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м ²)	5,42–5,92
СДП-42 (40 мкм) + ВСДП-16 (20 г/м ²)	0,49–2,14

На рис. 5 представлены зависимости удельного изменения массы образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с покрытиями и без защитных ионно-плазменных покрытий от количества циклов испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С. Видно, что образцы с покрытиями систем ВСДП-3 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) и СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²) полностью обеспечили защиту жаропрочного никелевого сплава ЖС32 от сульфидно-оксидной коррозии. Покрытия систем СДП-1Т + ВСДП-13 и СДП-2 + ВСДП-16 через 10–15 циклов испытаний теряют защитные свойства, о чем свидетельствует резкий прирост величины удельного изменения массы образцов с этими покрытиями.

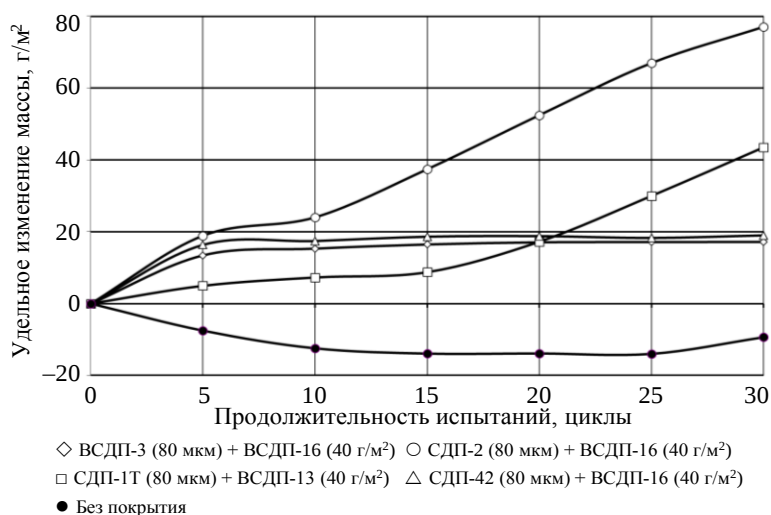


Рис. 5. Зависимости удельного изменения массы образцов из сплава ЖС32 с покрытиями систем ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16, СДП-2 + ВСДП-16, СДП-1Т + ВСДП-13 и без защитных покрытий от количества циклов испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С

На рис. 6 представлены микроструктуры покрытий систем ВСДП-3 + ВСДП-16, СДП-42 + ВСДП-16 и СДП-2 + ВСДП-16 с указанием мест, выбранных для исследования элементного состава по толщине, после проведения испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С.

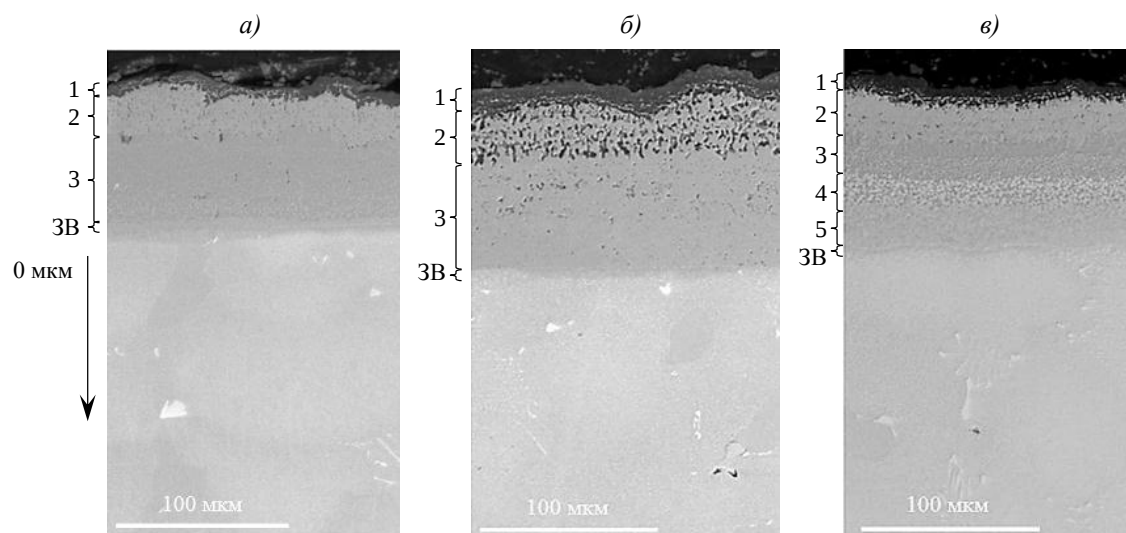


Рис. 6. Микроструктуры покрытий систем ВСП-3 + ВСП-16 (а), СДП-2 + ВСП-16 (б) и СДП-42 + ВСП-16 (в) с указанием мест анализа элементного состава после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С (3В – зона диффузионного взаимодействия покрытия с основой)

Таблица 2

Локальный элементный состав образцов с покрытием
после испытаний на стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температуре 850 °С

Место измерения	Содержание элементов, % (по массе)								
	Al	Cr	Co	Nb	Mo	W	Ta	Re	Ni
Покрытие ВСП-3 + ВСП-16									
Спектр 1	49,3	2,2	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	2,9
Дополнительно содержит 1,9 % Y; 1,1 % Cl									
Спектр 2	11,4	11,3	0,5	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	76,5
Дополнительно содержит 0,2 % Cl									
Спектр 3	13,4	26,7	1,1	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	0,7	58,0
3В	7,7	22,5	1,7	0,6	0,7	5,7	3,2	2,8	60,5
15 мкм	4,8	6,1	8,6	2,2	1,0	12,3	6,0	3,9	63,3
Покрытие СДП-2 + ВСП-16									
Спектр 1	50,1	5,5	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	1,4
Дополнительно содержит 1,6 % S; 0,9 % Y; 0,4 % Cl									
Спектр 2	16,8	15,2	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	56,6
Дополнительно содержит 2,7 % S									
Спектр 3	5,0	20,9	1,5	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	72,5
Дополнительно содержит 0,2 % S									
3В	6,7	11,4	3,2	0,9	Н/о	6,8	4,2	2,5	64,3
15 мкм	5,6	5,2	9,6	1,6	1,0	9,0	5,0	3,2	59,8
Покрытие СДП-42 + ВСП-16									
Спектр 1	51,0	1,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	2,2
Дополнительно содержит 1,8 % Y; 0,4 S; 0,4 Cl									
Спектр 2	12,9	5,0	0,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	81,4
Спектр 3	16,8	8,3	0,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	74,3
Спектр 4	15,2	19,0	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	65,8
Спектр 5	11,9	11,6	1,4	Н/о	Н/о	2,6	4,8	Н/о	67,7
3В	7,7	14,3	2,5	Н/о	0,7	5,1	3,9	1,6	65,0
15 мкм	5,8	5,4	9,5	1,2	1,0	9,5	4,6	3,6	59,6
Примечание. 3В – зона диффузионного взаимодействия покрытия с основой; Н/о – не определено.									

Как видно из данных табл. 2, внешняя поверхность всех образцов защищена оксидами алюминия, никеля и иттрия. В покрытии системы ВСДП-3 + ВСДП-16 на глубине 20–30 мкм присутствуют соединения хлора, концентрация которого снижается с 1,1 % (по массе) в первом слое до 0,2 % (по массе) во втором. В более глубоких слоях покрытий от зоны 3 до зоны диффузионного взаимодействия покрытия с основой (жаропрочного никелевого сплава ЖС32) наличие хлора или серы не установлено. Покрытие системы ВСДП-3 + ВСДП-16 сохранило защитные свойства к сульфидно-оксидной коррозии и высокотемпературному окислению.

Покрытие системы СДП-2 + ВСДП-16 также имеет на поверхности защитную оксидную пленку из оксидов алюминия, никеля и иттрия, но по всей толщине покрытия вплоть до зоны диффузионного взаимодействия с подложкой выявлено присутствие в слое серы до 2,7 % (по массе). Покрытие полностью утратило защитные свойства (рис. 5).

Покрытие системы СДП-42 + ВСДП-16 сохранило защитные свойства как к сульфидно-оксидной коррозии, так и к высокотемпературному окислению. Наличие по 0,4 % (по массе) хлора и серы установлено только в тонком поверхностном слое.

Заключения

Для выбора универсальной композиции системы защитного ионно-плазменного покрытия, сочетающей высокую жаростойкость и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии, проведены испытания на жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч и стойкость к сульфидно-оксидной коррозии при температурах 750 и 850 °С на базе 30 циклов образцов из сплава ЖС32 с ионно-плазменными жаростойкими покрытиями систем ВСДП-3 (NiCrAlReHfY) + ВСДП-16 (AlNiY), СДП-42 (NiCrAlTaWHfY) + ВСДП-16, СДП-2 (NiCrAlY) + ВСДП-16 и коррозионностойким покрытием системы СДП-1Т (NiCoCrAlTiY) + ВСДП-13 (AlNiSiB).

По результатам испытаний наиболее высокий комплекс защитных свойств имеют покрытия систем СДП-42 (40–80 мкм) + ВСДП-16 (20–40 г/м²) и ВСДП-3 (40–80 мкм) + ВСДП-16 (20–40 г/м²). В покрытиях отсутствует проникновение серы и хлора с поверхности во внутренние слои жаропрочного сплава. Покрытия превосходят в условиях испытаний серийное коррозионностойкое покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13.

Список источников

1. 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. 3–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-34.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электрометаллургия. 2016. № 10. С. 23–38.
3. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 149–163.
4. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем Gd₂O₃–ZrO₂–HfO₂ и Sm₂O₃–Y₂O₃–HfO₂ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
5. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. № 10. С. 6–10.
6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники: сб. докл. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 3.

7. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
8. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В. и др. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
9. Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнев Н.Н., Плескань А.Ю., Самохвалов Н.Ю., Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Солнцев Ст.С., Евдокимов С.А. Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
10. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Журавлева П.Л., Горлов Д.С. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
11. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // *Труды ВИАМ*. 2013. № 1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025).
12. Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // *Энциклопедия инженера-химика*. 2012. № 5. С. 34–41.
13. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450 °С // *Труды ВИАМ*. 2014. № 6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
14. Щепилов А.В., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Исследование влияния ионно-плазменных покрытий на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» при испытаниях на вибродинамическом стенде // *Труды ВИАМ*. 2015. № 4. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8.
15. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С. Повышение свойств упрочняющих ионно-плазменных покрытий при помощи ассистированного осаждения // *Труды ВИАМ*. 2015. № 7. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.
16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 3. С. 3–8.
17. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3. С. 25–30.
18. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3. С. 71–81.
19. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3. С. 20–25.
20. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть II // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 1. С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-3-11.
21. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Кашин Д.С. Термодиффузионные процессы насыщения тугоплавкими элементами и углеродом поверхности внутренней полости лопаток турбины высокого давления ГТД из перспективных никелевых жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 5. С. 45–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-5-45-55.

22. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Горлов Д.С. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ41 с жаростойкими покрытиями // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 55. С. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-55-61-66.
23. Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Щепилов А.А., Коннова В.И. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 55. С. 67–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-55-67-72.
24. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Кашин Д.С. Формирование термодиффузионных барьерных слоев на поверхности безуглеродистых жаропрочных рений- и рений-рутенийсодержащих сплавов методом газовой цементации // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 3 (36). С. 27–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
25. Будиновский С.А., Петрушин Н.В., Бенклян А.С., Елютин Е.С. Защита жаропрочного никелевого рений-рутениевого сплава ВЖМ10 от окисления в области температур 1150–1300 °С // *Электрометаллургия*. 2024. № 3. С. 24–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-3-24-31.
26. Будиновский С.А., Азаровский Е.Н., Бенклян А.С. Защита сплава ВЖМ4 от коррозии в области температур 850–1050 °С // *Электрометаллургия*. 2023. № 6. С. 15–24. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-6-15-24.
27. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаро- и коррозионностойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21 // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 17–24. DOI: 0.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.
28. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины ГТД из никелевых жаропрочных рений и рений-рутений содержащих сплавов // *Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД: сб. докл. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2016. С. 13.*
29. Мовенко Д.А., Заводов А.В., Лаптев А.Б., Лощина А.О. Изменение структуры сплава ВЖМ-4 в процессе высокотемпературной солевой коррозии при 750 °С // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024. № 5 (827). С. 22–29.
30. Мубояджян С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. № 3. С. 26–30.
31. Способ защиты лопаток газовых турбин: пат. 2404286 Рос. Федерация; заявл. 22.10.09; опубл. 20.11.10.
32. Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // *Энциклопедия инженера-химика*. 2012. № 5. С. 34–41.
33. Азаровский Е.Н., Мубояджян С.А. Модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей в вакуумно-дуговой плазме титана. Часть III // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 29–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-29-37.
34. Горлов Д.С., Мубояджян С.А., Щепилов А.А., Александров Д.А. Исследование эрозионной стойкости и теплостойкости ионно-плазменных демпфирующих покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2 (41). С. 11–17. DOI: 0.18577/2071-9140-2016-0-2-11-17.

References

1. 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. 3–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-34.
2. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for compressor blades of gas turbine engines. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 10, pp. 23–38.
3. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N., Ion etching and surface modification of critical machine parts in vacuum-arc plasma. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroenie*, 2011, no. SP2, pp. 149–163.
4. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ and $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
5. Kablov E.N. Science as a branch of the economy. *Science and Life*, 2009, no. 10, pp. 6–10.

6. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-protective coatings with a ceramic layer of low thermal conductivity based on zirconium oxide for high-pressure turbine blades of promising gas turbine engines. *Modern achievements in the field of creating promising non-metallic composite materials and coatings for aviation and space technology*: Reports of Sci. and Tech. Conf. Moscow: VIAM, 2015, p. 3.
7. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
8. Batraev I.S., Rybin D.K., Ivanyuk K.V., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Wear resistant detonation coatings based on tungsten carbide for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
9. Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N., Pleskan A.Yu., Samokhvalov N.Yu., Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Solntsev St.S., Evdokimov S.A. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-51-58.
10. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Zhuravleva P.L., Gorlov D.S. Investigation of the effect of surface preparation and ion-assisted deposition on the structure and properties of erosion-resistant ion-plasma coating. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.
11. Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Research of possibility of increase of office characteristics of compressor blades of GTE by method of ionic modifying of surface. *Trudy VIAM*, 2013, no. 1, paper no. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025).
12. Muboyadzhyan S.A. Industrial ion-plasma equipment for applying protective coatings. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
13. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Corrosion-resistant coating for protection of GTE details made of high-strength maraging constructional steel with operating temperature up to 450°C. *Trudy VIAM*, 2014, no. 6, paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
14. Shchepilov A.V., Muboyadzhyan S.A., Gorlov D.S., Konnova V.I. Investigation of the ion-plasma coatings influence on damping capacity of «alloy-coating» composition during testing on vibrodynamic bench. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, paper no. 8. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8.
15. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Gorlov D.S. reinforcing properties of ion-plasma coatings using plasma assisted deposition. *Trudy VIAM*, 2015, no. 7, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.
16. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanolayer strengthening coverings for protection of steel and titanic compressor blades of GTE. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 3–8.
17. Muboyadzhyan S.A., Galoyan A.G. Complex thermodiffusion heat resisting coatings for carbon-free hot strength alloys on nickel basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 25–30.
18. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Protective and strengthening ion-plasma coverings for blades and other responsible details of the GTE compressor. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 71–81.
19. Azarovskiy E.N., Mubojadzhyan S.A. Modifying of surface of details from constructional steels in vacuum and arc plasma of titanium. P. I. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 3, pp. 20–25.
20. Azarovskiy E.N., Mubojadzhyan S.A. Modifying of surface of details from constructional steels in vacuum and arc plasma of titanium. P. II. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-3-11.
21. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Kashin D.S. Thermal diffusion processes for saturation of internal surface of GTE turbine blades made of advanced high temperature superalloys with refractory elements and carbon. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 45–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-45-55.

22. Alexandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Gorlov D.S. Studies of heat resistance and kinetics of elemental composition of VT41 titanium alloy with heat-resistant coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 61–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-61-66.
23. Muboyadzhyan S.A., Gorlov D.S., Shchepilov A.A., Konnova V.I. Study of damping capacity of ion-plasma coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 67–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-67-72.
24. Galoyan A.G., Muboyadzhyan S.A., Kashin D.S. Termodiffusion barrier formation under vacuum cementation process on rhenium and rhenium-ruthenium comprising nickel based superalloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 3 (36), pp. 27–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-27-37.
25. Budinovskiy S.A., Petrushin N.V., Benklyan A.S., Elyutin E.S. Protection of heat-resistant nickel-rhenium-ruthenium alloy VZhM10 from oxidation in the temperature range of 1150–1300 °C. *Electrometallurgiya*, 2024, no. 3, pp. 24–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2024-0-3-24-31.
26. Budinovskiy S.A., Azarovskiy E.N., Benklyan A.S. Protection of VZhM4 alloy from corrosion in the temperature range of 850–1050 °C. *Electrometallurgiya*, 2023, no. 6, pp. 15–24. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-6-15-24.
27. Kosmin A.A., Budinovskiy S.A., Muboyadzhyan S.A. Heat and corrosion resistant coating for working turbine blades from promising high-temperature alloy VZhL21. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 17–24. DOI: 0.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.
28. Smirnov A.A., Budinovskiy S.A. Heat-resistant and heat-protective coatings for gas turbine engine blades made of nickel-based heat-resistant rhenium and rhenium-ruthenium containing alloys. *New developments in the field of protective, heat-protective and hardening coatings for gas turbine engine parts*: Reports of Sci.-Tech. Conf. Moscow: VIAM, 2016, p. 13.
29. Movenko D.A., Zavodov A.V., Laptev A.B., Loshchinina A.O. Changes in the structure of VZhM-4 alloy during high-temperature salt corrosion at 750 °C. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2024, no. 5 (827), pp. 22–29.
30. Muboyadzhyan S.A. Protective coatings for hot gas turbine tract parts. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2011, no. 3, pp. 26–30.
31. *Method for protecting gas turbine blades*: pat. 2404286 Rus. Federation; appl. 22.10.09; publ. 20.11.10.
32. Muboyadzhyan S.A. Industrial ion-plasma equipment for applying protective coatings. *Entsiklopediya inzhenera-khimiika*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
33. Azarovskiy E.N., Muboyadzhyan S.A. Surface modification of parts from structural steel in vacuum-arc titanium plasma. P. III. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 29–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-29-37.
34. Gorlov D.S., Muboyadzhyan S.A., Shchepilov A.A., Aleksandrov D.A. The research of erosion resistance and heat resistance of the ion-plasma damping coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 2, pp. 11–17. DOI: 0.18577/2071-9140-2016-0-2-11-17.

Информация об авторах

Будиновский Сергей Александрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бенклян Артем Сергеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мовенко Дмитрий Александрович, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Татарников Сергей Владимирович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey A. Budinovskiy, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem S. Benklyan, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dimitriy A. Movenko, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Tatarnikov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.08.2025.
The article was submitted 06.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 08.08.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-90-101

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКОГО МАТОВОГО ПОКРЫТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КАБИНЫ И ПАНЕЛЕЙ ПРИБОРОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В.А. Кузнецова¹, Е.А. Тимошина¹, Г.Г. Шаповалов¹, Е.В. Куршев¹

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

Аннотация. В настоящее время к качеству и внешнему виду покрытий, применяемых для защиты элементов кабины и панелей приборов авиационной техники, предъявляются особые требования, связанные с необходимостью обеспечения высокого уровня зрительной и общей работоспособности пилота как при естественном, так и при искусственном освещении, а также пожарной безопасности. Изучены свойства декоративных пожаро-безопасных износостойких матовых лакокрасочных покрытий, полученных с применением двухфазной полимерной системы «полиэфир–фторполиуретановый олигомер».

Ключевые слова: полимерное пленкообразующее, модификатор, отвердитель, покрытие, структура, износостойкость, адгезия, водостойкость, блеск покрытия, эластичность

Для цитирования: Кузнецова В.А., Тимошина Е.А., Шаповалов Г.Г., Куршев Е.В. Влияние модификации пленкообразующего на свойства износостойкого матового покрытия, используемого для защиты элементов кабины и панелей приборов авиационной техники // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-90-101.

Scientific article

INFLUENCE OF A MODIFIED FILM-FORMING AGENT ON THE PROPERTIES OF ANTI-WEAR MATTE COATING USED TO PROTECT CABIN AND DASHBOARD COMPONENTS IN AIRCRAFT

V.A. Kuznetsova¹, E.A. Timoshina¹, G.G. Shapovalov¹, E.V. Kurshev¹

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

Abstract. Currently, special requirements are imposed to the quality and appearance of the coverings used to protect elements of cabin and dashboards in aircraft. These requirements are associated with the need of providing high level of visual and overall performance of the pilot both under natural and artificial lighting, as well as with fire safety. This work is devoted to studying the properties of the decorative, fireproof, wear-resistant matte paint coatings obtained using a two-phase polymer system: polyester – fluoropolyurethane oligomer.

Keywords: polymer film-forming agent, modifier, hardener, coating, structure, wear resistance, adhesion, water resistance, coating gloss, elasticity

For citation: Kuznetsova V.A., Timoshina E.A., Shapovalov G.G., Kurshev E.V. Influence of a modified film-forming agent on the properties of anti-wear matte coating used to protect cabin and dashboard components in aircraft. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-90-101.

Введение

В связи с развитием авиационной техники особые требования предъявляются к качеству и внешнему виду лакокрасочных покрытий, применяемых для защиты и декоративной окраски элементов кабины и панелей приборов авиационной техники [1–6].

К покрытиям, применяемым для окраски кабины пилотов, а также бортового оборудования, размещенного в кабине, предъявляются следующие требования:

- покрытие должно быть матовым, так как на глянцевых поверхностях покрытия могут возникать блики, оказывающие негативное воздействие на зрение членов экипажа;
- цвет покрытия должен обеспечивать высокий уровень зрительной и общей работоспособности пилота как при естественном, так и при искусственном освещении;
- покрытия должны быть устойчивыми к повреждениям и сохранять оптические характеристики в процессе эксплуатации при воздействии истирающих факторов.

На современном этапе особые требования предъявляются не только к качеству и внешнему виду лакокрасочных покрытий, но также пожарной безопасности применяемых для защиты элементов кабины и панелей приборов кабины пилотов, т. е. покрытие должно соответствовать требованиям АП-25 по горючести, дымообразованию и тепловыделению.

Следует отметить, что в соответствии с ОСТ 1 02545–85 «Кабины экипажа самолетов и вертолетов», в котором изложены требования к цвету внутренних поверхностей, наиболее полно этим требованиям удовлетворяют цвета средней части спектра малой насыщенности. К ним относятся холодные цвета: зеленый, серо-голубой, темно-серый и др. Для исключения возникновения бликов от источников внешнего освещения все эмали должны быть матовыми [7–10].

Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время существуют разнообразные способы получения матовых декоративных покрытий, которые основаны на включении в их структуру микронеоднородностей для увеличения диффузного отражения.

Широко распространен способ получения матовых покрытий путем увеличения объемной концентрации наполнителей, что приводит к снижению блеска покрытия, но ухудшает физико-механические свойства и стойкость к истиранию.

Для получения матовых покрытий также применяют различные технологические приемы – например, способ микрорасслоения полимерного раствора с образованием ячеистой конденсационной структуры.

Один из способов получения матовых покрытий – применение смесей несовместимых растворов полимеров. Для достижения необходимых оптических и декоративных свойств следует выбрать полимерное пленкообразующее, позволяющее получать матовое покрытие при относительно невысоком содержании наполнения, при котором сохраняется достаточно высокий уровень адгезионной прочности, эластичности, а также твердости лакокрасочной пленки. Для разработки таких покрытий используются смеси несовместимых растворов полимеров, при этом формируется двухфазная полимерная структура, в которой каждая фаза характеризуется своим коэффициентом преломления. В этом случае падающий на поверхность свет подвергается диффузному рассеянию за счет преград в виде микронеоднородностей полимерной структуры [11–26].

Предлагаемая работа посвящена изучению свойств декоративных пожаробезопасных износостойких матовых лакокрасочных покрытий, полученных с применением двухфазной полимерной системы «полиэфир–фторполиуретановый олигомер».

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») [27].

Материалы и методы

Основным фактором, определяющим свойства лакокрасочного покрытия, является химическая природа пленкообразующего.

В качестве объекта исследований выбран полиэфир – продукт поликонденсации этиленгликоля и глицерина с себадиновой кислотой: $[-O-R-O-C(O)-(CH_2)_8-C(O)-O-]_n$.

Для модификации полиэфирного пленкообразующего в работе исследованы:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| – фторполиуретановый олигомер (ФПУ) | $[-O-C(O)-NH-R'-NH-C(O)-O-CH_2-(CF_2)_y-CH_2-O-]_n$; |
| – тиолсодержащий полиуретан (ТСУ) | $-[R-NH-CO-O-R-S]_n-H$; |
| – полисульфидный каучук (ПСК) | $SH[-R-Sm-]_nSH$. |

Модифицирующие компоненты вводили в полиэфирное пленкообразующее в виде растворов в смеси органических растворителей. Изготовленные лаковые композиции отверждали алифатическим изоцианатом.

Для получения наполненных лаковых композиций использовали структурообразующие и упрочняющие наполнители, а также пигменты.

Экспериментальным путем выбрана оптимальная рецептура для создания износостойкого матового пожаробезопасного лакокрасочного покрытия марки ВЭ-86. Для проведения исследований изготовлены образцы из сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр, а также стеклопластика ВПС-39П для нанесения системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и эмали ВЭ-86. Толщина системы покрытий составляла 70–100 мкм. Покрытия на поверхность образцов наносили методом пневматического распыления.

Для проведения исследований использовали стандартные методы: жизнеспособность (время желатинизации) определяли по ГОСТ 27271–2014; адгезию – по ГОСТ 15140–78 (для металла) и ГОСТ 31149–2014 (для полимерного композиционного материала); прочность покрытия при ударе – по ГОСТ 4765–2024; эластичность покрытия при изгибе – по ГОСТ 6806–2024; прочность при растяжении (эластичность) – по ГОСТ 29309–92; блеск покрытия под углом замера 60 градусов – по ГОСТ 31975–2017; устойчивость к абразивному износу (истиранию) – по ИСО 7784-2:2016; шероховатость – по ГОСТ 25142–82. Структуру лакокрасочных покрытий исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа.

Результаты и обсуждение

Для проведения исследований свойств модифицированных лаковых покрытий на основе полиэфирного пленкообразующего изготовлены экспериментальные образцы. Лаковые композиции наносили методом пневматического распыления, сушку покрытий проводили при комнатной температуре.

В табл. 1 приведены результаты определения технологических, физико-механических свойств, а также адгезии покрытий на основе исследуемых лаковых композиций.

Таблица 1

Определение технологических свойств, адгезии и физико-механических свойств модифицированных лаковых композиций

Модификатор	Содержание модификатора, %	Время высыхания, ч	Время желатинизации, ч	Адгезия к сплаву Д16-АТ Ан.Окс.нхр, балл	Прочность при ударе, Дж	Эластичность при изгибе, мм
Фторполиуретановый олигомер	10	6	24	1	5	1
	20		24	1	5	1
	30		7	1	5	1
Тиолсодержащий полиуретан	20	6	48	1	1	1
	30		48	1	1	1
	40		29	1	1	1
Полисульфидный каучук	20	8	32	1	1	1
	30		29	1	1	1
	40		24	1	1	1

Из полученных результатов следует, что время высыхания полиэфирных покрытий, модифицированных фторполиуретановым олигомером, а также тиолсодержащим полиуретаном составляет 6 ч; время высыхания покрытий, модифицированных полисульфидным каучуком: 8 ч. Следует отметить, что жизнеспособность (время желатинизации) вышеуказанных лаковых композиций зависит от содержания модификатора в полиэфирном пленкообразующем и составляет от 7 до 48 ч, что существенно превышает продолжительность рабочей смены. Адгезия всех исследуемых лаковых покрытий к поверхности сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр составляет 1 балл, эластичность при изгибе 1 мм. Прочность при ударе лаковых покрытий на основе полиэфирного пленкообразующего, модифицированного фторполиуретановым олигомером, при содержании модификатора 10–30 % составляет 5 Дж, в отличие от аналогичных композиций, модифицированных тиолсодержащим полиуретаном и полисульфидным каучуком, у которых прочность при ударе 1 Дж.

В табл. 2 и на рис. 1 приведены результаты определения декоративных свойств – блеска и шероховатости покрытия, а также износостойкости при истирании по ISO 7784-2:2016.

Таблица 2

Определение декоративных свойств и износостойкости модифицированных лаковых покрытий

Модификатор	Содержание модификатора, %	Блеск при угле замера 60 градусов, ед. блеска
Фторполиуретановый олигомер	10	67,1
	20	74,4
	30	86,3
Тиолсодержащий полиуретан	20	18,0–29,2
	30	21,6–25,5
	40	15,4–16,0
Полисульфидный каучук	20	9,0–10,2
	30	7,8–10,0
	40	6,7–8,4

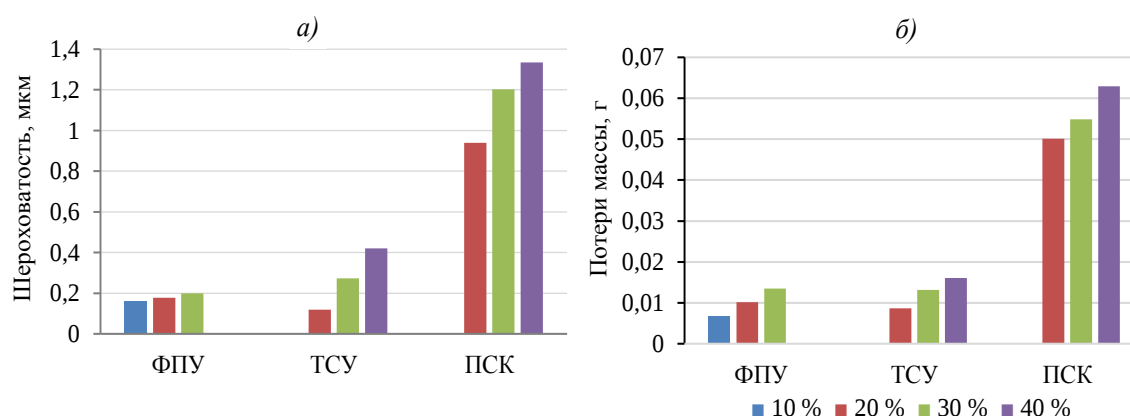


Рис. 1. Результаты определения шероховатости (а) и износостойкости (б) модифицированных лаковых покрытий

Анализ результатов, полученных при определении шероховатости и износостойкости, показал, что лаковые покрытия на основе полиэфирного пленкообразующего, модифицированного полисульфидным каучуком, по шероховатости и износостойкости существенно уступают аналогичным покрытиям, модифицированным фторполиуретановым олигомером и тиолсодержащим уретаном. Видно, что наиболее износостойкими являются полиэфирные покрытия, модифицированные фторполиуретаном (10 %), а также тиолсодержащим уретаном (20 %). Это связано с тем, что наиболее шероховатые покрытия при истирании изнашиваются наиболее интенсивно за счет выравнивания рельефа поверхности при истирании.

На основании полученных результатов в качестве полимерного пленкообразующего выбрана полиэфирная композиция, содержащая 10 % фторполиуретанового олигомера, обладающая наиболее высоким уровнем свойств: адгезия 1 балл; прочность при ударе 5 Дж, эластичность при изгибе 1 мм, износостойкость 0,0067 г.

Разработана система лакокрасочных покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86. Исследованы адгезия, физико-механические, декоративные, влагозащитные свойства, а также износостойкость системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и эмали ВЭ-86 в исходном состоянии (табл. 3, рис. 2).

Видно, что покрытие на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86 обладает высокой адгезией к алюминиевому сплаву Д16-АТ Ан.Окс.нхр, а также стеклопластику ВПС-39П, прочностью при ударе, эластичностью и износостойкостью.

Таблица 3

Результаты определения свойств системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86

Показатель	Значения показателей
Адгезия к сплаву Д16-АТ Ан.Окс.нхр, балл	1
Адгезия к стеклопластику ВПС-39П, балл	1
Прочность пленки покрытия при ударе, Дж	5
Блеск покрытия под углом 60 градусов, ед. блеска	1,5
Прочность пленки покрытия при растяжении, мм	5,5
Эластичность при изгибе, мм	1
Стойкость к абразивному износу (истиранию), индекс Табера	0,031

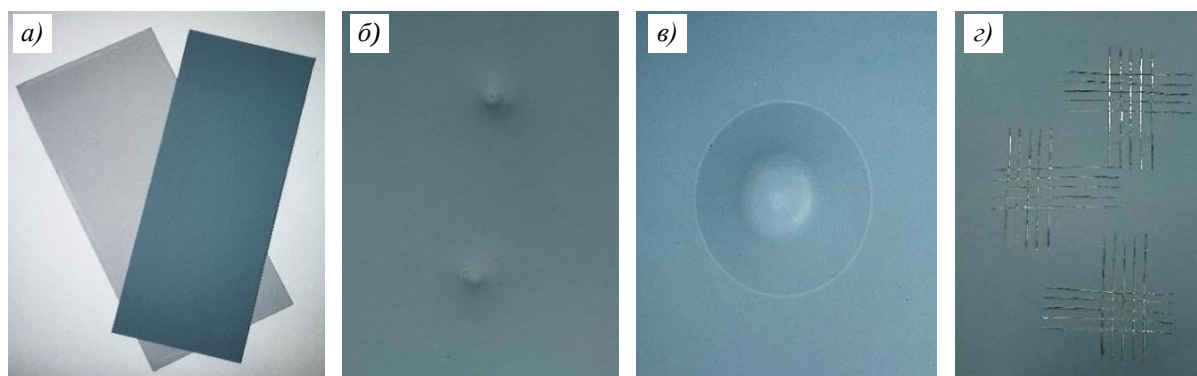


Рис. 2. Внешний вид образцов покрытия ВЭ-86 в исходном состоянии (а), после определения прочности при ударе (б) и при растяжении (эластичности) (в), адгезии на сплаве Д16-АТ Ан.Окс.нхр (г)

Исследована микроструктура износостойкого матового покрытия в исходном состоянии и после истирания.

Микроструктурные исследования проведены с помощью сканирующего электронного микроскопа при увеличении $\times 4000$. Результаты микроструктурных исследований, а также внешний вид образца после испытания на износостойкость приведены на рис. 3.

Микроструктурные исследования исходного покрытия на основе эмали ВЭ-86 показали (рис. 3, а), что эмаль равномерно распределена на поверхности подложки. Эмаль наполнена пигментами в виде мелкодисперсного порошка и частиц пластинчатой формы. В эмали выявлены единичные микропоры, трещин и расслоений не обнаружено.

После испытания на истирание эмали ВЭ-86 (рис. 3, б) происходит закономерное выкрашивание частиц наполнителя из покрытия и образование борозд в виде пластических деформаций поверхностного слоя. Борозды состоят из агрегатов порошкообразных частиц и полимерной матрицы. Выявлены также участки с разрушением частиц пластинчатой формы (рис. 3, б). Обнаружены участки со смятием (деформацией) полимерной матрицы (рис. 3, б). Трещин и обнажения металлической подложки не выявлено.

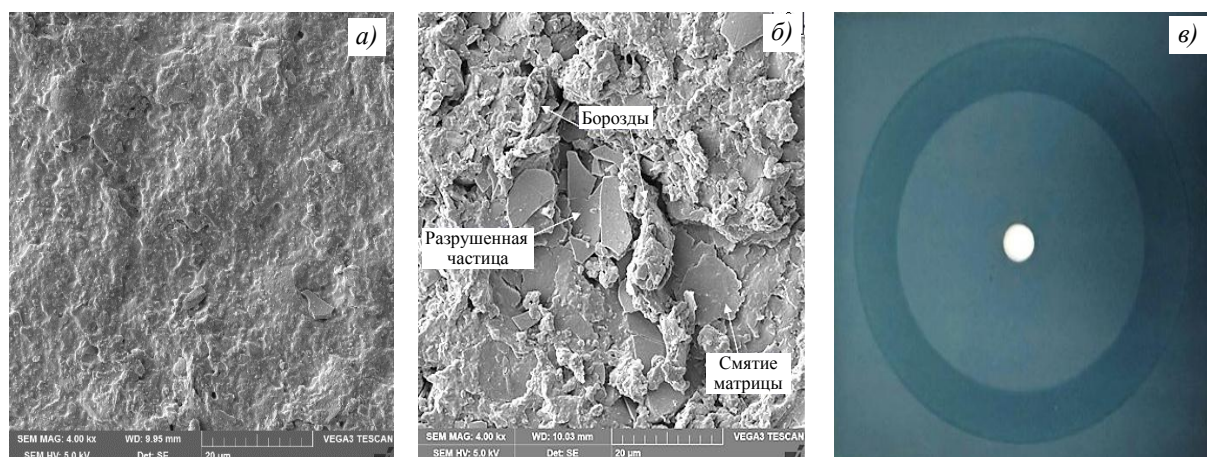


Рис. 3. Микроструктура поверхности покрытия ВЭ-86 в исходном состоянии (а) и после испытаний на истирание (б), а также внешний вид образца после испытаний на износостойкость (в)

Исследовано водопоглощение системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86 после испытаний в дистиллированной воде в течение 15 сут при комнатной температуре. Водопоглощение покрытия определяли гравиметрическим методом по изменению весовых характеристик образцов в процессе

испытаний. Кинетическая кривая водопоглощения системы лакокрасочных покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86 приведена на рис. 4.

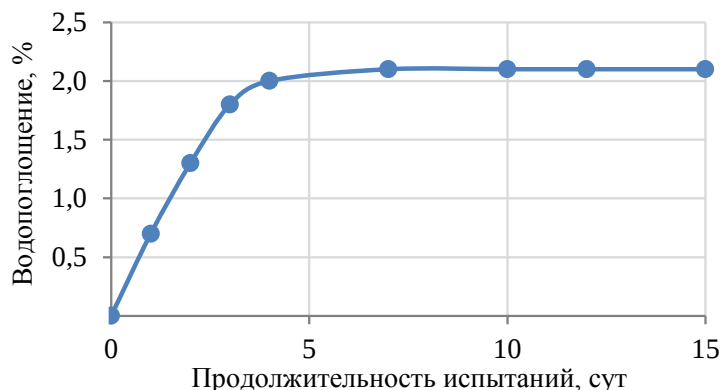


Рис. 4. Кинетика водопоглощения системы покрытий на основе грунтовки ВГ-45 и эмали ВЭ-86

Из анализа кривой равновесной сорбции следует, что при экспозиции покрытия в дистиллированной воде происходит увеличение массы покрытия. При этом достижение равновесной сорбции происходит в течение первых 5 сут. Покрытие на основе грунтовки ВГ-45 и эмали ВЭ-86 при толщине покрытия 75 мкм достигает максимального значения водопоглощения 2,1 %.

Исследована микроструктура износостойкого матового покрытия ВЭ-86 в исходном состоянии и после испытания в дистиллированной воде в течение 15 сут (рис. 5).

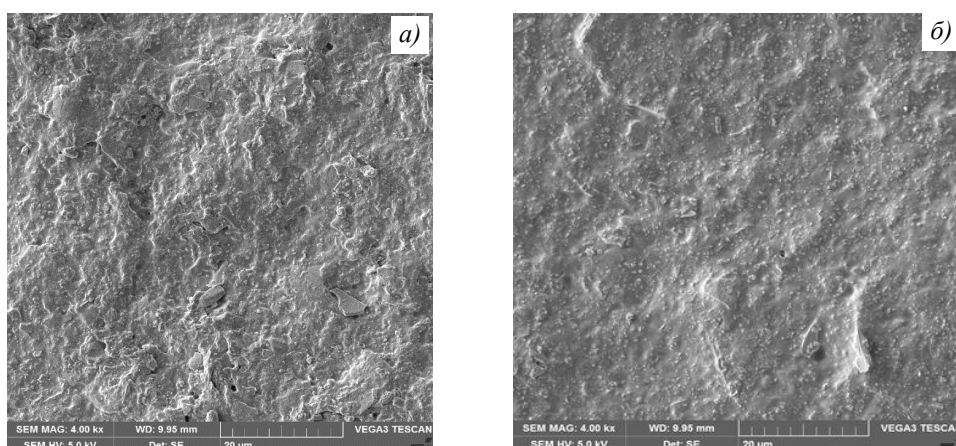


Рис. 5. Микроструктура поверхности покрытия ВЭ-86 в исходном состоянии (а) и после испытания в дистиллированной воде (б)

Видно, что микроструктура покрытия ВЭ-86 в исходном состоянии и после испытания не претерпевает значимых изменений по сравнению с исходным образцом.

Поскольку покрытия, применяемые для защиты внутренней поверхности кабины пилота, должны соответствовать нормативам АП-25 по пожароопасности, в данной работе определены показатели, определяющие пожароопасность: горючесть, тепловыделение и дымообразование.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на тепловыделение системы покрытий на основе эмали ВЭ-86. Испытания проводили на подложке из стеклопластика ВПС-39П, среднее значение толщины системы покрытий составляло 80 мкм.

Таблица 4

**Результаты испытаний на тепловыделение системы покрытий
на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86**

Система покрытий	Толщина, мм	Максимальная скорость выделения тепла (пик), кВт/м ²	Время достижения максимума, с	Общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, (кВт·мин)/м ²
ВЭ-45 + ВЭ-86	1,9	58,3	61	29,2
	1,8	60,0	62	30,6
	1,8	55,2	55	33,6
	Среднее значение	57,8		31,1
Допустимые значения по АП-25, п. 25.853 (d)		Не более 65	–	Не более 65

В табл. 5 приведены результаты испытаний на горючесть системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86. Испытания проводили при вертикальной ориентации образцов на подложке из алюминиевого сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр при средней толщине системы покрытий 80 мкм.

Таблица 5

**Результаты испытаний на горючесть образцов с системой покрытий
на основе эмали ВЭ-86 (толщина 80 мкм)
на подложке из алюминиевого сплава Д16-АТ**

Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения (тления), с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация по ГОСТ Р 57924–2017
0,79	60	0	1	Нет	Трудногорающий
1,02	60	0	1	Нет	
0,83	60	0	1	Нет	
Среднее значение		0	1		
Допустимые значения по АП-25 п. 25.853 (a)		Не более 15	Не более 152	Не более 3	–

В табл. 6 приведены результаты испытаний на дымообразование системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86. Испытания проводили на подложке из стеклопластика ВПС-39П, среднее значение толщины системы покрытий составляет 80 мкм.

Таблица 6

**Результаты испытаний на дымообразование образцов с системой покрытий на основе
грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86**

Группа наполнителя В1-43 и износостойкой маховой эмали В3-66				
Толщина, мм	Режим испытания	Показатель удельной оптической плотности дыма		
		D ₂	D ₄	D _{max}
1,92	Горение	9	22	23
1,72		8	22	24
1,83		6	24	26
Среднее значение		8	23	24
1,92	Пиролиз	11	28	39
1,87		6	34	45
1,9		9	30	41
Среднее значение		9	31	42
Допустимые значения по АП-25, п. 25.853 (d)		—	Не более 200	—

Из результатов испытаний, полученных при определении горючести, дымообразования и тепловыделения системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86, следует, что система покрытий, разработанная для окраски панелей приборов и элементов кабины пилота, соответствует требованиям АП-25, АП-27 и АП-29 по пожарной безопасности.

Заключения

Изготовлены полимерные лаковые композиции на основе полиэфирного пленкообразующего, содержащие модифицирующие компоненты: фторполиуретановый олигомер, тиолсодержащий полиуретан, а также полисульфидный каучук. Определены технологические свойства, адгезия и физико-механические, а также декоративные свойства и износостойкость модифицированных лаковых композиций. Показано, что наиболее износостойким является полиэфирное покрытие, модифицированное фторполиуретановым олигомером.

Выбрана полиэфирная композиция, модифицированная фторполиуретановым олигомером, обладающая наиболее высоким уровнем свойств: адгезия 1 балл; прочность при ударе 5 Дж, эластичность при изгибе 1 мм, износостойкость 0,0067 г.

Исследованы адгезия, физико-механические, декоративные и влагозащитные свойства, а также износостойкость системы покрытий на основе наполнителя ВГ-45 и эмали ВЭ-86 в исходном состоянии.

Установлено, что покрытие на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86 обладает высокой адгезией к алюминиевому сплаву Д16-АТ Ан.Окс.нхр, а также к стеклопластику ВПС-39П, прочностью при ударе (эластичностью) и износостойкостью.

Исследована микроструктура износостойкого матового покрытия в исходном состоянии и после истирания.

Исследовано водопоглощение, а также микроструктура системы покрытий на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и износостойкой матовой эмали ВЭ-86 в исходном состоянии и после испытаний в дистиллированной воде в течение 15 сут при комнатной температуре.

Показано, что покрытие на основе грунта-наполнителя ВГ-45 и эмали ВЭ-86 водостойкое. Микроструктура поверхностного слоя покрытия на основе эмали ВЭ-86 в исходном состоянии и после испытаний в дистиллированной воде не претерпевает значимых изменений по сравнению с исходным образцом.

Список источников

1. Житомирский Г.И. Конструкция самолетов. М.: Машиностроение, 1991. 400 с.
2. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
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. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. № 4. С. 28–29.
6. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
7. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.

8. Кузнецова В.А., Тимошина Е.А., Шаповалов Г.Г., Железняк В.Г. Тенденции в области разработки матовых износостойких лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
9. 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.
10. 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: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
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). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0293-2023-0-4-92-100.
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. Макущенко И.С., Козлов И.А., Смирнов Д.Н., Куршев Е.В., Лонский С.Л. Исследование микроструктуры и распределения ингибиторов коррозии в полисульфидном герметике // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 2 (79). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-128-136.
14. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Соловьева Н.А., Барботько С.Л. Влияние состава и структуры на огнестойкость арамидных органопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-81-89.
15. Юловская В.Д. Олигомеры. Каучук – олигомерные композиции, структура и свойства: учеб. пособие. М., 2008. 46 с.
16. Петров Г.Н., Синайский А.Г., Дальгрэн И.В. Жидкие углеводородные каучуки и области их применения // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 10. С. 24–27.
17. 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.
18. Сухарева Л.А. Полиэфирные покрытия. Структура и свойства. М.: Химия, 1987. 191 с.
19. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1969. 319 с.
20. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: Химиздат, 2016. 272 с.
21. Носков А.М., Новиков Н.И. Отверждение глицидиловых эфиров аминами в присутствии гидроксильных групп // Журнал прикладной химии. 2008. Т. LV. № 12. С. 2733–2737.
22. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. М.: Химия, 1987. С. 252–266.
23. Зиновьев В.Е. К вопросу связи адгезии и качества поверхностного слоя субстрата клеевого соединения // Вестник РГУПС. 2010. № 4. С. 5–9.
24. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г., Марченко С.А., Коврижкина Н.А., Силаева А.А. Матовые покрытия на основе двухфазной эпоксидно-акриловой композиции для окраски элементов кабины пилотов и панелей приборов // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-87-95.
25. Кондрашов Э.К., Козлова А.А. Лакокрасочные покрытия со специальными оптическими свойствами // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-101-109.

26. Семенова Л.В., Родина Н.Д., Нефедов Н.И. Влияние шероховатости систем лакокрасочных покрытий на эксплуатационные свойства самолетов // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 2. С. 37–40.
27. 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: Mashinostroenie, 1991, 400 p.
2. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
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 – the Basis for Innovation, Technological Leadership, and National Security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
5. Kablov E.N. New-Generation Materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4, pp. 28–29.
6. Kablov E.N. Main Results and Directions of Development of Materials for Advanced Aviation Technology. *75 Years. Aviation Materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
7. 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: July 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
8. Kuznetsova V.A., Timoshina E.A., Shapovalov G.G., Zheleznyak V.G. Trends in the development of matte wear-resistant paint coatings. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
9. 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.
10. 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: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
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), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0293-2023-0-4-92-100.
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. Makushchenko I.S., Kozlov I.A., Smirnov D.N., Kurshev E.V., Lonskii S.L. Study of the microstructure and distribution of corrosion inhibitors in polysulfide sealant. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-128-136.
14. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Soloveva N.A., Barbotko S.L. Influence of composition and structure on the fire resistance of aramid organoplastics. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-81-89.
15. Yulovskaya V.D. *Oligomers. Rubber – oligomeric compositions, structure and properties: textbook*. Moscow, 2008, 46 p.
16. Petrov G.N., Sinaisky A.G., Dahlgren I.V. Liquid hydrocarbon rubbers and their application areas. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2009, no. 10, pp. 24–27.

17. 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.
18. Sukhareva L.A. *Polyester Coatings. Structure and Properties*. Moscow: Khimiya, 1987, 191 p.
19. Berlin A.A., Basin V.E. *Basics of Polymer Adhesion*. Moscow: Khimiya, 1969, 319 p.
20. Yakovlev A.D., Yakovlev S.A. *Functional-Purpose Paint and Varnish Coatings*. St. Petersburg: Khimizdat, 2016, 272 p.
21. Noskov A.M., Novikov N.I. Curing of Glycidyl Ethers with Amines in the Presence of Hydroxyl Groups. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2008, vol. LW, no. 12, pp. 2733–2737.
22. Chalykh A.E. *Diffusion in Polymer Systems*. Moscow: Khimiya, 1987, pp. 252–266.
23. Zinoviev V.E. On the issue of the relationship between adhesion and the quality of the surface layer of the substrate of the adhesive joint. *Vestnik RGUPS*, 2010, no. 4, pp. 5–9.
24. Kuznetsova V.A., Shapovalov G.G., Marchenko S.A., Kovrizhkina N.A., Silaeva A.A. Paint coatings on the basis of epoxy and acrylic diphasic polymeric system for coloring of elements of cabin of pilots and dashboards. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-87-95.
25. Kondrashov E.K., Kozlova A.A. Paint coatings with special optical properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-101-109.
26. Semenova L.V., Rodina N.D., Nefedov N.I. An effect of roughness of paint and varnish coating systems on service properties of aircraft. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 2, pp. 37–40.
27. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

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

Тимошина Екатерина Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Курсев Евгений Васильевич, ведущий 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

Ekaterina A. Timoshina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 07.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.08.2025.
The article was submitted 07.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.08.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-102-110

ЭМАЛЬ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ОКРАСКИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕРЬЕРА ВОЗДУШНОГО СУДНА

А.А. Козлова¹, М.А. Шунина¹, И.А. Козлов¹

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

Аннотация. Приведены результаты исследования свойств эмали на водной основе, предназначенной для окрашивания элементов конструкции интерьера авиационной техники. Проведен сравнительный анализ свойств разработанной эмали с существующими отечественными и импортными аналогами. Показано, что разработанная эмаль удовлетворяет современным требованиям по пожаробезопасности, а за счет использования водной дисперсии сополимера стирола и (мет)акрилатов обеспечивает экологичность и безопасность благодаря отсутствию токсичных растворителей, а также достижение высокого уровня физико-механических характеристик.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, пожаробезопасность, стирол-акриловая дисперсия, адгезия, твердость, прочность при царапании, пассажирская кабина

Для цитирования: Козлова А.А., Шунина М.А., Козлов И.А. Эмаль на водной основе для окраски элементов интерьера воздушного судна // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-102-110.

Scientific article

WATER-BASED ENAMEL FOR COATING AIRCRAFT INTERIOR ELEMENTS

A.A. Kozlova¹, M.A. Shunina¹, I.A. Kozlov¹

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

Abstract. This paper examines the properties of a water-based enamel designed for coating interior structural elements of aircraft. We have performed a comparative analysis of the properties of the developed enamel with existing domestic and imported analogues. It is shown that the developed enamel meets modern fire safety requirements. The use of an aqueous styrene-(met) acrylates copolymer dispersion ensures environmental friendliness and safety by eliminating toxic solvents and enabling a high level of physical and mechanical properties.

Keywords: paint materials, fire safety, styrene-acrylic dispersion, adhesion, hardness, scratch resistance, passenger cabin

For citation: Kozlova A.A., Shunina M.A., Kozlov I.A. Water-based enamel for coating aircraft interior elements. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-102-110.

Введение

Одним из ключевых требований к воздушным судам, предназначенным для пассажирских перевозок, является их безопасная эксплуатация. Конструкция воздушного судна должна обеспечивать защиту от возгорания и распространения огня. Основные элементы конструкции должны соответствовать стандартам пожаробезопасности, включая материалы интерьера салона и отделочные покрытия. Требования Авиационных правил по пожарной безопасности включают комплекс мер, направленных на предотвращение возникновения пожаров и обеспечение безопасной эвакуации пассажиров и экипажа воздушных судов. Требования по пожаробезопасности, предъявляемые к материалам интерьера гражданских легких самолетов и самолетов транспортной категории, установлены Нормами летной годности НЛГ-23 и НЛГ-25 в соответствии с Авиационными правилами АП-23 и АП-25; требованиями к материалам интерьера винтокрылых аппаратов нормальной и транспортной категорий изложены в НЛГ-27 (АП-27) и НЛГ-29 (АП-29) соответственно. Выбор лакокрасочных материалов для защитно-декоративного окрашивания элементов конструкции пассажирского салона обусловлен несколькими важными факторами, такими как масса, прочность и эластичность, экологичность, простота ухода и высокие эксплуатационные характеристики материалов.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ ранее разработана интерьерная однокомпонентная эмаль ВЭ-67 на водной основе (ТУ 1-595-15-1010–2008). Эмаль обладает высокими физико-механическими характеристиками, грибостойка и определяется как трудносгорающая. Однако широкого применения эмаль не получила в связи с прекращением производства основного компонента – водорастворимого акрилового сополимера [1–4].

Лакокрасочные материалы на водной основе широко применяются для внутренней отделки интерьера воздушных судов иностранного производства благодаря своим преимуществам по экологичности, пожаробезопасности и высоким эксплуатационным характеристикам. Однако в связи с решением вопроса об импортозамещении, с повышенными требованиями к пожарной безопасности материалов функционального назначения, предназначенных для внутренней декоративной отделки пассажирской кабины авиационной техники [5–7], а также с существенным увеличением стоимости лакокрасочной продукции (преимущественно импортного производства), предназначенной для внутренней декоративной отделки пассажирской кабины авиационной техники, остается актуальным вопрос о создании лакокрасочных материалов на основе недефицитного отечественного сырья.

При разработке современных интерьерных лакокрасочных материалов выделяют следующие основные направления исследований: повышение экологической безопасности, устойчивость к царапанию, обеспечение адгезии к окрашиваемой поверхности, повышение устойчивости к воздействию пламени и грибостойкости. Это позволяет обеспечивать высокое качество поверхностей внутреннего пространства воздушного судна. Наиболее успешно проблемы получения высококачественных интерьерных покрытий разрешаются при использовании водорастворимых стирол-акриловых дисперсий, сочетающих свойства стирола и акрилатов. Основными преимуществами таких дисперсий являются высокая прочность пленки на их основе, высокая адгезия к окрашиваемым поверхностям, быстрое высыхание слоев, их использование также способствует упрощению технологического процесса изготовления лакокрасочных материалов.

В данной работе представлены результаты исследования новой интерьерной однокомпонентной эмали ВЭ-87 на основе водорастворимой стирол-акриловой

дисперсии и свойства получаемых покрытий на ее основе. Показаны результаты исследования покрытий в сравнении с существующими аналогами.

Продолжительность отверждения водно-дисперсионных лакокрасочных покрытий оказывает значительное влияние на их конечную твердость и прочность. Для набора максимальных значений данных показателей ключевыми факторами являются скорость испарения воды из нанесенного слоя лакокрасочного материала, а также степень наполнения лакокрасочного материала твердыми веществами (пигментами и функциональными наполнителями). Установлено, что искусственная сушка покрытий на основе экспериментальных образцов эмали ВЭ-87 при повышенных температурах (от 60 до 80 °С) приводит к образованию трещин и разрывов получаемого покрытия. Это связано с тем, что чрезмерно быстрое высыхание формируемого покрытия на основе водной дисперсии полимера приводит к ослаблению связей между частицами полимера, что в свою очередь снижает итоговые значения твердости и прочности сформированного покрытия. Поэтому необходимо обеспечить постепенное испарение воды из формируемого покрытия, что позволит частицам полимера сблизиться друг с другом. Чем дольше длится эта стадия, тем больше воды успевает испариться, обеспечивая оптимальные условия для формирования покрытия. Далее наступает следующая стадия формирования покрытия – частицы полимера сближаются и начинают взаимодействовать между собой, полимерная сетка становится плотнее, увеличивая прочность покрытия. Следует отметить, что высокая влажность воздуха замедляет испарение воды, увеличивая время отверждения. Это положительно сказывается на формировании прочной пленки, однако требует большего времени ожидания перед эксплуатацией поверхности. Таким образом, правильный выбор условий отверждения является важным фактором, определяющим долговечность и качество покрытий на основе водно-дисперсионной эмали.

Материалы и методы

Объект исследования – водоразбавляемая эмаль ВЭ-87 (ТУ 20.30.12-194-07545412–2024) для защитно-декоративной окраски элементов интерьера салона воздушного судна, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Эмаль марки ВЭ-87 представляет собой однокомпонентный пигментированный лакокрасочный материал на основе водной дисперсии стирол-акрилового сополимера. Исходными компонентами для получения декоративной эмали являлись стирол-акриловая дисперсия, пигменты и функциональные наполнители серийного производства.

Вода имеет решающее значение в формировании и свойствах лакокрасочных покрытий на основе водных дисперсий полимеров. Контроль влажности, температуры и степени чистоты воды необходим для получения качественного покрытия. При разработке рецептуры эмали и для доведения ее до необходимой рабочей вязкости использована дистиллированная вода (ГОСТ Р 58144–2018). Показатель удельной электрической проводимости не превышал $5,1 \cdot 10^{-4}$ См/м; pH воды составил 5,5; массовая концентрация примесей не превышала допустимых значений.

В качестве подложки использованы образцы из алюминиевого сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр и стеклопластика ВПС-39П (ТУ 1-595-10-1009–2009), применяемого в настоящее время для изготовления деталей и обшивок трехслойных сотовых панелей интерьера (в том числе изготовленных бесклеевым методом), который характеризуется низким значением тепловыделения и полностью соответствует требованиям Авиационных правил и Норм летной годности по пожаробезопасности [8–10]. Характеристики пожаробезопасности стеклопластика ВПС-39П представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства стеклопластика ВПС-39П [8, 10]

Показатель	Значения показателей
Дымообразование	Слабодымящий
Горючесть	Самозатухающий
Тепловыделение (толщина образца 0,3 мм):	
– максимальная скорость выделения тепла (пик), кВт/м ²	25
– общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, (кВт·мин)/м ²	23

Определение времени и степени высыхания проводили по ГОСТ 19007–2023, прочность при ударе определяли по ГОСТ 4765–2024, эластичность при изгибе – по ГОСТ 6806–2024, прочность при царапании – по ИСО 1518-1:2011, твердость – по ГОСТ 5233–2021 (маятник Б), адгезию к подложкам – по ГОСТ 31149–2014.

Испытания на воздействие плесневых грибов проводили в соответствии с ГОСТ 9.049–91 (метод 1), который устанавливает грибостойкость материалов при отсутствии минеральных и органических загрязнений. Сущность метода заключается в заражении лакокрасочного покрытия на основе эмали ВЭ-87 спорами плесневых грибов в воде. При этом плесневые грибы будут расти только на тех питательных веществах, которые содержатся в составе эмали. Продолжительность испытаний составила 28 сут.

Горючесть определяли по ГОСТ Р 57924–2017 (метод испытания с экспозицией в течение 60 с). Испытания по определению дымообразования конструкционных панелей пассажирской кабины с нанесенной эмалью ВЭ-87 проводили в режимах горения и пиролиза по ГОСТ 24632–81, тепловыделение – по методике, изложенной в АП-25 (Приложение F, Часть IV).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11–17].

Результаты и обсуждение

Для определения оптимального времени сушки покрытия на основе эмали ВЭ-87 исследовано влияние продолжительности формирования покрытия на его твердость и прочность при царапании по методу Клемана при одинаковых контролируемых температурно-влажностных условиях формирования покрытия.

Степень наполнения – один из важных показателей качества водоразбавляемых лакокрасочных материалов, влияющий на эксплуатационные характеристики покрытий, формируемых на их основе. Чем больше степень наполнения, тем более положительно это влияет на укрывистость эмали, уменьшая при этом количество наносимых слоев, что снижает расход материала и ускоряет процесс нанесения покрытий. Однако чрезмерно высокое отношение массы пигментной части к массе пленкообразующего может привести к ухудшению адгезии и снижению прочностных характеристик получаемого покрытия, а также к появлению различных дефектов. В табл. 2 представлены результаты определения твердости и прочности покрытия в зависимости от степени пигментирования: 0,5/1; 0,6/1; 0,7/1 (отношение пигментной части к пленкообразующему).

Таблица 2

Влияние продолжительности формирования покрытия на его твердость и прочность при царапании по методу Клемана

Степень пигментирования образца декоративной эмали на основе акриловой дисперсии	Продолжительность отверждения при температуре 23 °С и влажности 55 %, ч	Твердость покрытия, отн. ед.	Прочность при царапании по методу Клемана, г
0,5	1	0,08	500
	2	0,15	700
	8	0,19	1000
	12	0,20	1200
	24	0,21	1250
	48	0,23	1500
	120	0,25	1600
	168	0,25	1600
0,6	1	0,07	400
	2	0,12	500
	8	0,12	500
	12	0,15	700
	24	0,18	900
	48	0,19	1000
	120	0,20	1000
	168	0,20	1050
0,7	1	0,05	50
	2	0,08	100
	8	0,11	200
	12	0,13	350
	24	0,17	400
	48	0,18	400
	120	0,18	700
	168	0,18	700

Полученные результаты показали, что значения твердости и прочности при царапании по методу Клемана покрытия на основе экспериментальных образцов эмали на начальном периоде сушки у всех образцов невысоки и со временем возрастают неравномерно, что связано со степенью пигментирования. При степени пигментирования 0,7 получены более низкие показатели твердости и прочности при царапании. Максимальные значения показателей достигаются у образцов со степенью пигментирования 0,5 за 120 ч, поэтому данный состав выбран для дальнейших исследований. При содержании пигментов и наполнителей 0,6 и более нарушается устойчивость дисперсной системы из-за снижения концентрации полимера. При этом время высыхания покрытия до степени 3 составляет 1 ч для всех композиций.

Немаловажным фактором для лакокрасочных покрытий является их прочность сцепления с подложкой. В табл. 3 представлены адгезия и физико-механические свойства покрытия на основе эмали ВЭ-87 в сравнении с отечественным и зарубежными аналогами.

Таблица 3

Адгезия и физико-механические свойства покрытия на основе эмали ВЭ-87

Показатель	Значения показателей для эмалей			
	декоративной марки ВЭ-87	ВЭ-67	FR2-55 (фирма AkzoNobel)	Interplan 1065B (фирма HSH Aerospace Finishes)
Адгезия к алюминиевому сплаву Д16-АТ Ан.окс.нхр, балл	0	2	1	1
Адгезия к стеклопластику ВПС-39П, балл	0	1	1	1
Прочность при ударе, Дж	5	2	5	5
Прочность пленки при изгибе, мм	1	1	1	1

По результатам определения физико-механических свойств установлено, что покрытие на основе эмали ВЭ-87 соответствует уровню свойств интерьерных покрытий зарубежного производства и обеспечивает более высокий уровень адгезии, а по прочности при ударе и адгезии к металлической поверхности превосходит отечественный аналог – эмаль ВЭ-67.

Один из важнейших факторов для материалов пассажирских салонов или любых других обитаемых помещений – стойкость к микроорганизмам, которые являются непосредственными спутниками человека. Исследования стойкости покрытия на основе эмали ВЭ-87 к воздействию плесневых грибов показали, что нанесенные на покрытие споры плесневых грибов не получили развития. Лакокрасочное покрытие на основе эмали ВЭ-87 не является питательной средой для роста и развития плесневых грибов – оно является грибостойким.

Проведены также исследования горючести, дымообразования и тепловыделения покрытия на основе эмали ВЭ-87, результаты испытаний представлены в табл. 4–6.

Таблица 4

Характеристики горючести покрытий на основе декоративной эмали ВЭ-87 на подложке из алюминиевого сплава Д16-АТ Ан.окс.нхр

Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения (тления), с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация по ГОСТ Р 57924–2017
1,6–2,0	60	0	0	Нет	Трудногоряющий

Таблица 5

Характеристики дымообразования покрытий на основе декоративной эмали ВЭ-87 на подложке из стеклопластика ВПС-39П

Толщина образца, мм	Режим испытания	Показатель удельной оптической плотности дыма		
		D ₂	D ₄	D _{max}
1,80–1,92	Горение	7	13	17
1,90–1,93	Пиролиз	17	29	35
Допустимые значения по АП-25 п. 25.853 (d)		–	Не более 200	–

Таблица 6

Характеристики тепловыделения покрытий на основе декоративной эмали ВЭ-87 на подложке из стеклопластика ВПС-39П

Толщина образца, мм	Максимальная скорость выделения тепла (пик), кВт/м ²	Время достижения максимума, с	Общее количество тепла, выделившегося за первые 2 мин, (кВт·мин)/м ²
1,74–1,80	23–25	54	19
Допустимые значения по АП-25, п. 25.853 (d)		Не более 65	Не более 65

Результаты определения горючести показали, что при воздействии пламени испытательной горелки образцы покрытия на основе эмали ВЭ-87 сохраняют свою целостность, продолжительность остаточного горения отсутствует, средняя длина прогорания (обугливания) составляет 0 мм и относится к группе 1а – трудносгорающие.

Значение оптической плотности дыма испытанных образцов стеклопластика ВПС-39П с нанесенной эмалью ВЭ-87 в течение первых 4 мин испытания составляет 13 и 29 с при горении и пиролизе соответственно, что удовлетворяет требованиям Авиационных правил и считается допустимым для применения в конструкции пассажирской кабины воздушного судна.

Полученные данные, приведенные в табл. 6, при определении нормируемых показателей тепловыделения показали, что при одинаковой максимальной скорости выделения тепла окрашенного и неокрашенного образцов стеклопластика ВПС-39П общее количество тепла, выделившегося за первые 2 мин, у образцов ВПС-39П, окрашенных эмалью ВЭ-87, меньше на 21 % по сравнению с неокрашенными образцами ВПС-39П (табл. 1).

По результатам проведенных исследований характеристик пожаробезопасности установлено, что декоративная эмаль ВЭ-87 соответствует требованиям Норм летной годности и Авиационных правил по характеристикам пожаробезопасности. Значения показателей пожаробезопасности конструкционных панелей, изготовленных из стеклопластика ВПС-39П на основе фенолформальдегидного связующего, могут быть снижены путем окрашивания разработанной декоративной эмалью ВЭ-87.

Эмаль разработана на основе серийно выпускаемых недефицитных компонентах отечественного производства и может наноситься методом пневматического распыления или кистью.

Заключения

Результаты исследований показали, что выбранные исходные компоненты и подобранный режим изготовления водно-дисперсионной эмали позволили достичь высоких показателей качества покрытия на ее основе.

Показано, что покрытие на основе разработанной эмали ВЭ-87 обладает высокими физико-механическими характеристиками, адгезией к металлическим и неметаллическим подложкам.

Разработанный состав эмали ВЭ-87 позволяет получать лакокрасочные покрытия на интерьерных конструкциях вертолетной и самолетной техники, к которым предъявляются высокие требования по горючести, дымообразованию, тепловыделению, и соответствует требованиям Авиационных правил и Норм летной годности.

Выбранные исходные компоненты и подобранный режим изготовления водно-дисперсионной эмали позволили достичь высоких показателей качества покрытия на ее основе.

Список источников

1. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные материалы и покрытия на их основе в машиностроении. М.: Пэинт-Медиа, 2021. С. 141.
2. Водоразбавляемая композиция для лакокрасочного покрытия: пат. 2338766 Рос. Федерация; заявл. 27.08.07; опубл. 20.11.08.
3. Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Малова Н.Е., Лебедева Т.А. Развитие авиационных лакокрасочных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 5. С. 49–54.
4. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Лебедева Т.А., Семенова Л.В. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 1. С. 96–102.

5. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 408 с.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
7. Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Барботько С.Л. Исследование горючести, дымообразования и токсичности в процессе горения полимерных композиционных материалов и трехслойных сотовых конструкций на их основе // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.
8. Курносов А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
9. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 253–260.
10. 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). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. 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.
12. Гарашенко А.Н., Кульков А.А., Страхов В.Л. Влияние срока эксплуатации на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий и огнестойкость конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110.
13. Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Куршев Е.В., Емельянов В.В. Исследование топливо- и водостойкости покрытий на основе наполненных эпоксидно-тиоколовых полимерных композиций // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-93-102.
14. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым наполнителем в конструкциях пола и интерьера воздушных судов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
15. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
16. Барботько С.Л., Петрова А.П., Вольный О.С., Боченков М.М. Методы, используемые для оценки пожаробезопасности полимерных связующих (обзор) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 12. С. 21–29.
17. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.

References

1. Kondrashov E.K. *Paints and varnishes and coatings based on them in mechanical engineering*. Moscow: Paint-Media, 2021, p. 141.
2. *Water-based composition for paint and varnish coating*: pat. 2338766 Rus. Federation; appl. 27.08.07; publ. 20.11.08.
3. Kondrashov E.K., Semenova L.V., Kuznetsova V.A., Malova N.E., Lebedeva T.A. Development of aviation paints and varnishes. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 5, pp. 49–54.
4. Kondrashov E.K., Kuznetsova V.A., Lebedeva T.A., Semenova L.V. Main directions for improving the operational, technological and environmental characteristics of paint and varnish coatings for aviation equipment. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 96–102.

5. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyeenko O.A., Shurkova E.N. *Fire safety assessment of polymeric materials for aviation purposes: analysis of the state, testing methods, development prospects, methodological features*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 408 p.
6. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
7. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Barbotko S.L. Study of flammability, smoke formation and toxicity in the process of combustion of polymer composite materials and three-layer honeycomb structures based on them. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.
8. Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I. Structural glass-reinforced plastics purposed for aviation industry. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 08. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
9. Davydova I.F., Kavun N.S. Fibreglasses – multipurpose composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 253–260.
10. 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), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. 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.
12. Garashchenko A.N., Kulkov A.A., Strakhov V.L. The effect of the service life on the flame-retardant efficiency of the bulging coatings and the fire resistance of structures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110.
13. Kuznetsova V.A., Zheleznyak V.G., Kurshev E.V., Yemelyanov V.V. Research of fuel- and water resistance of coatings based on the filled epoxy-thiokol polymeric compositions. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-93-102.
14. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Shokin G.I., Kutsevich K.E., Popkova E.A. Evaluation method and factors influencing the bonding quality between face and honey-comb cores in floor and interior aircraft panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
15. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Report of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: UB of RAS, 2016, pp. 25–26.
16. Barbotko S.L., Petrova A.P., Volny O.S., Bochenkov M.M. Methods used to assess the fire safety of polymer binders (review). *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 12 pp. 21–29.
17. Barbotko S.L. Development of the fire safety test methods for aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.

Информация об авторах

Козлова Алеся Александровна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шунина Маргарита Александровна, техник I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козлов Илья Андреевич, заместитель начальника НИО, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alesya A. Kozlova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Ilya A. Kozlov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.08.2025.
The article was submitted 08.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.08.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-111-121

ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫЕ ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.Д. Кречетов¹, А.А. Козлова¹, В.Г. Железняк¹

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

Аннотация. Приведены результаты информационного поиска и рассмотрены основные тенденции в области создания электропроводных лакокрасочных материалов и покрытий на их основе для снятия статического электричества с внешних поверхностей изделий авиационной техники. Определены основные требования к выбору компонентов для получения электропроводных лакокрасочных материалов и покрытий. Выявлены наиболее перспективные направления в области разработки и исследований электропроводных лакокрасочных покрытий.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, электропроводные покрытия, покрытия для снятия статического электричества, удельное объемное электросопротивление, электропроводящие наполнители, углеродные нанотрубки, электропроводные эмали

Для цитирования: Кречетов Д.Д., Козлова А.А., Железняк В.Г. Электропроводные лакокрасочные материалы и покрытия авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-111-121.

Scientific article

ELECTRICALLY CONDUCTIVE PAINTS AND COATINGS FOR AVIATION PURPOSES

D.D. Krechetov¹, A.A. Kozlova¹, 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 article presents the results of an information search and examines the main trends in the creation of electrically conductive paints and varnishes and coatings based on them for removing static electricity from the external surfaces of aircraft components. The basic requirements for the selection of components for the production of electrically conductive paints and coatings have been defined. The most promising directions in the field of development and research of electrically conductive paint coatings have been identified.

Keywords: paint and varnishes, electrically conductive coatings, coatings for removing static electricity, specific volume resistance, electrically conductive fillers, carbon nanotubes, electrically conductive enamels

For citation: Krechetov D.D., Kozlova A.A., Zheleznyak V.G. Electrically conductive paints and coatings for aviation purposes. *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (151), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-111-121.

Введение

При эксплуатации воздушного судна его поверхность и отдельные конструкционные элементы подвергаются воздействию различных внешних факторов, в том числе климатических, которые отрицательно влияют на поверхность таких элементов [1, 2]. Последствие одного из таких негативных факторов – накопление электростатического заряда или электрических разрядов на поверхностях воздушного судна [3]. Эти электрические разряды вызывают термическое или ионное разрушение материала и при отсутствии их отвода могут приводить к повреждению электронных компонентов, созданию электронных помех, а также являться источником воспламенения.

Особенное внимание следует уделять защите деталей из полимерных композиционных материалов, которые все больше используются в авиастроении [4–8]. Условия эксплуатации изделий авиационной техники, корпуса которой изготовлены из полимерных композиционных материалов, могут быть разнообразными, поэтому нанесение многофункциональных лакокрасочных покрытий – наиболее эффективная мера защиты от внешних воздействующих факторов. При правильном выборе слоев лакокрасочных покрытий возможно достигнуть максимально высокого уровня защиты. Применение электропроводных лакокрасочных покрытий является одной из составляющих системы защиты самолета от статического электричества.

Согласно требованиям ГОСТ 35089–2024 «Материалы лакокрасочные. Эмали. Общие технические условия», удельное объемное электрическое сопротивление (ρ_v) электропроводного лакокрасочного покрытия не должно превышать значения 0,04 Ом·м. Получить покрытие с таким значением ρ_v возможно несколькими способами, применяя:

- в качестве пленкообразующих полимеры с большими значениями электронной или ионной проводимости;
- электропроводящие наполнители;
- поверхностно-активные вещества или в составе покрытий, или для обработки ими поверхности сформированного лакокрасочного покрытия.

Последний способ дает наименее стабильные результаты в связи с тем, что поверхностно-активные вещества могут испаряться с поверхности или мигрировать внутрь покрытия [9, 10].

Пленкообразующие полимеры для электропроводных лакокрасочных покрытий

В качестве пленкообразующих для получения лакокрасочных покрытий с различными свойствами могут использоваться эпоксидные, кремнийорганические, полиуретановые, полиамидные, полиакрилатные, фторопластовые и полиимидные полимеры, однако они обладают высокими значениями удельного объемного электросопротивления (табл. 1).

Исследованиями в области химии электропроводных полимеров активно начал заниматься в 70-х гг. прошлого столетия японский ученый Хидэки Сиракава с коллегами – Аланом Хигером и Аланом Макдиармидом [11, 12]. За свои исследования по повышению электропроводности полиацетилена легированием парами йода эти ученые в 2000 г. удостоены Нобелевской премии по химии.

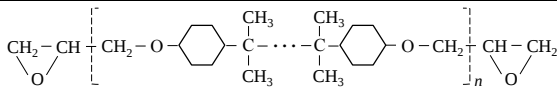
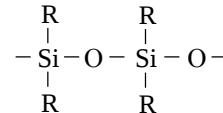
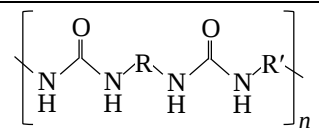
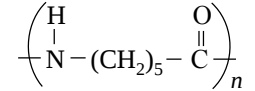
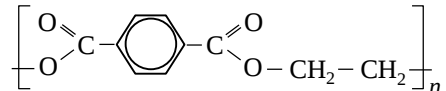
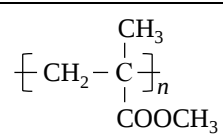
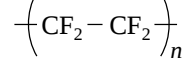
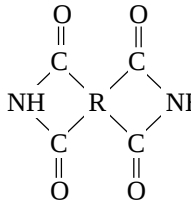
Удельное объемное электросопротивление электропроводных полимеров (таких как полианилин, полиацетилен, полипиррол, политиофен, полифенилен, полифениленвинилен) может достигать значений 10^{-5} – 10^{-6} Ом·м. В связи с тем, что электропроводные полимеры нерастворимы или плохо растворимы в органических растворителях, они не могут использоваться в качестве основного пленкообразователя, а традиционные методы нанесения лакокрасочных покрытий (распыление, погружение, нанесение

кстью) не применимы. Однако для повышения электропроводности пленкообразующих с высоким удельным объемным электросопротивлением некоторые электропроводные полимеры (полианилин, полиацетилен, политиофен и др.) могут служить модификаторами [13–15].

Следует отметить, что модификация пленкообразующих электропроводными полимерами придает получаемому покрытию способность отводить статическое электричество. Использование электропроводного полиэтилена создает равномерный электрический потенциал на поверхности покрытия, равный потенциалу самой конструкции. Это устраняет разницу потенциалов между покрытием и металлом, снижая риск появления очагов коррозии. Авторы некоторых изобретений [16–19] утверждают, что данный метод увеличивает срок эффективной защиты металла до 10–15 лет, значительно превосходя традиционные методы антикоррозионной защиты.

Таблица 1

Удельное объемное электросопротивление некоторых полимеров,
используемых для получения лакокрасочных покрытий

Полимеры	Химическая формула	Удельное объемное электросопротивление, Ом·м
Эпоксидно-диановые		$10^{11}-10^{14}$
Кремнийорганические		$10^{11}-10^{14}$
Полиуретан		$10^{11}-10^{14}$
Полиамид (ПА-6)		$10^{12}-10^{14}$
Полиэфирные ненасыщенные смолы (ПН-1)		$10^{13}-10^{14}$
Полиметилметакрилат (ПММА)		$10^{12}-10^{15}$
Фторопласт-4		$10^{14}-10^{16}$
Полиимиды		$10^{16}-10^{18}$

Применение в качестве основы полимеров различной природы позволяет получать лакокрасочные покрытия для различных условий эксплуатации.

Электропроводящие наполнители

Применение электропроводящих наполнителей в рецептурах электропроводных лакокрасочных покрытий позволяет снизить удельное сопротивление получаемых покрытий, основой которых является полимер-диэлектрик.

По данным научно-технического литературного анализа, большая часть исследований посвящена изучению свойств покрытий, наполненных углеродными материалами. Углеродные наполнители обеспечивают высокий уровень электропроводности и являются относительно недорогими. Основными углеродными наполнителями являются графит, отличающийся высокими показателями электропроводности и химической нейтральностью, углеродные волокна, наночастицы графита и углерода, сажа. В некоторых случаях также может быть использован шунгит [20–22], являющийся минеральным веществом, состоящим из аморфного углерода и дисперсного графита с примесями неорганических веществ. Введение шунгита в 15%-ный раствор частично омыленного сополимера винилхлорида с винилацетатом не только уменьшает значение удельного объемного электросопротивления до 10 Ом·м, но также способствует повышению твердости и износостойкости получаемых покрытий. Эти наполнители придают стабильные электрические характеристики по всей площади поверхности пленочного покрытия. Покрытия, в которых содержатся углерод и сажа, обладают высокой дисперсностью, химической стойкостью и относительной термостабильностью (окисление сажи и графита происходит при температурах 160 °С и более). Лучшими считаются ацетиленовая и печная сажи. Наилучшие значения электропроводности достигаются при использовании частиц сажи размером до 0,05 мкм, графита – до 2,0–2,5 мкм [23–25], сочетание сажи и графита в различных соотношениях позволяет получать покрытия с $\rho_v = 10^{-2} \div 10^{-4}$ Ом·м [26, 27].

В настоящее время для получения электропроводных лакокрасочных покрытий большой интерес представляет введение углеродных нанотрубок. Их особенностью является электропроводность, которая оказалась больше, чем у всех известных проводников. По электронным свойствам углеродные нанотрубки могут вести себя как металлы либо как полупроводники, что определяется ориентацией углеродных многоугольников относительно оси трубки. Кроме того, наночастицы обладают более развитой удельной поверхностью, чем частицы микронного размера, что обуславливает большую межфазовую область контакта с матрицей полимера и, как следствие, эпоксидные смолы, наполненные наночастицами, показывают превосходные механические свойства.

В патентной литературе чаще всего встречаются изобретения, где используемые в качестве наполнителей углеродные нанотрубки имеют следующие размеры: диаметр от 10 до 150 нм и длина от 2 до 30 мкм. Согласно экспериментальным исследованиям [28], добавление от 5 до 15 % (по массе) углеродных нанотрубок придает наилучший антистатический эффект покрытию – значение ρ_v может достигать 10^{-4} Ом·м. При этом, варьируя количество данного наполнителя, можно регулировать свойства системы покрытий.

В работе [29] исследованы частотные зависимости электропроводности эпоксидных композитов, наполненных нанотрубками в диапазоне концентраций от 0,1 до 10 % (по массе), и предложены различные механизмы электропроводимости в зависимости от содержания наноуглеродного наполнителя. В результате проведенных исследований показана эффективность функционализации (карбоксилирования) многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) окислением азотной кислотой с последующим

образованием карбоксильных групп на поверхности МУНТ. При этом ударная вязкость возрастает на 40 %, а разрушающее напряжение при изгибе – на 60 %. Установлены частотные зависимости электропроводности и показано, что введение углеродных нанотрубок позволяет повысить электропроводность покрытия на основе эпоксидно-диановой смолы, получая при этом из диэлектрика электропроводный материал.

Интерес также представляют углеродные нановолокна, их использование открывает новые возможности и перспективы. Наряду с такими свойствами, как высокий модуль упругости и прочность, а также малая плотность, высокая стойкость к атмосферным воздействиям и химическим реагентам, углеродные волокна отличаются высокой электропроводностью. Углеродно-волоконистая структура содержит трехмерную сеть углеродных волокон, каждое из которых имеет внешний диаметр 15–100 нм. Углеродно-волоконистые структуры вводят в количестве от 0,01 до 50 % (по массе) в расчете на общую массу материала. В результате пленка имеет высокую электропроводность и хорошие физико-механические свойства [30].

Учеными университета Battelle Memorial Institute разработана композиция электропроводного покрытия, предназначенного для использования на поверхности летательных аппаратов. Композиция проводного покрытия включает наноматериал – углеродные нанотрубки, диспергированные в растворителе, которые наносят на поверхность подложки с образованием тонкой пленки. Токопроводящее покрытие может также содержать наноматериал, сформированный из углеродных нанотрубок или фуллеренов, привитых к полимеру, содержащему активную функциональную группу, которая дополнительно придает поверхности подложки ледофобность [31]. При введении в пленкообразующее одностенных графеновых нанотрубок значение ρ_v можно снизить до $10^5 \div 10^9$ Ом·м за счет того, что при правильном распределении в полимерном слое нанотрубки создают трехмерную электропроводящую сеть.

В качестве антистатических добавок могут применяться порошки металлов и оксидов металлов, в том числе и наноразмерные [32–35]. Наименьшее значение удельного объемного электросопротивления дают серебро, никель и медь. Электропроводность покрытия напрямую будет зависеть от количества наполнителя и равномерности его распределения по объему. Как правило, оптимальная степень наполнения составов (в зависимости от типа наполнителя) находится в пределах 25–50 % (объемн.) или 45–85 мас. ч., при этом удельное объемное электросопротивление покрытия будет составлять не менее 10^2 Ом·м. Недостаточно низкое значение ρ_v покрытия объясняется тем, что, несмотря на большое содержание металлического порошка с $\rho_v \approx 10^{-6}$ Ом·м, не обеспечивается плотный контакт между металлическими частицами. В случае наполнения пленкообразующего металлическими порошками введение углеродных наполнителей (например, графита или шунгита) будет способствовать некоторому снижению значения ρ_v .

Недостатком металлических наполнителей является их быстрая седиментация, которая приводит к расслоению лакокрасочного материала, а также такие наполнители способствуют увеличению массы воздушного судна. В настоящее время проблема, связанная с быстрым образованием плотного осадка, устраняется путем применения в составе специальных добавок.

Возможно также использование керн-пигментов – частиц минерального наполнителя, покрытых проводящим слоем с содержанием благородных металлов от 2 до 10 %. Покрытия на основе этих пигментов обладают хорошей укрывистостью и высокой атмосферостойкостью [36].

При выборе электропроводящего наполнителя важно учитывать требуемый уровень электропроводности, условия эксплуатации покрытия и совместимость наполнителя с пленкообразующим.

Электропроводные лакокрасочные покрытия

Среди покрытий наибольшее распространение получили алкидно-акриловая эмаль АС-588 и акриламидная эмаль АК-526 с удельным объемным электросопротивлением не более 10^{-2} Ом·м. Наименьшими показателями ρ_v обладают эмали ХС-5141, ХС-928 и ХС-973 на основе частично омыленного сополимера винилацетата с винилхлоридом (табл. 2). В качестве электропроводящих наполнителей в серийно выпускаемых электропроводных лакокрасочных материалах чаще всего применяют углеродные компоненты (сажи, графит или их смесь).

Таблица 2

Свойства некоторых электропроводных лакокрасочных покрытий

Покрытие	Время высыхания до степени 3 при температуре 20 °С, ч	Удельное объемное электросопротивление, Ом·м (не более)	Полимерная основа
Эмаль ХС-5141	Не более 1	10^{-4} – 10^{-3}	Винилхлоридный сополимер
Эмаль ХС-928	Не более 1	10^{-3}	
Эмаль ХС-973	Не более 1	10^{-2}	
Эмаль АК-562	Не более 1	10^{-2}	Акриламидная
Эмаль АС-588	Не более 1	10^{-2}	Алкидно-акриловая
Эмаль КМ-211	Не более 1 (сушка при 80 °С)	10^{-1}	Перхлорвиниловая
Эмаль ХВ-5211	Не более 2	10^{-1}	
Эмаль ХП-5237	Не более 1	1	Хлорированный полиэтилен
Эмаль ХС-5132	Не более 2	1	Винилхлоридный сополимер
Грунтовка ЭП-0181	Не более 3 (сушка при 50 °С)	3	Эпоксидная
Грунтовка Pyroflex 7D713 (фирма AkzoNobel, Нидерланды)	6–8	5	Полиуретановая
Грунтовка Primer G Conductive (фирма MAPEI, Италия)	Не более 2	5	Водно-дисперсионная

Специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана электропроводящая грунтовка ЭП-0181 на эпоксидной основе [36–39], назначение которой заключается в создании прочного адгезионного слоя между окрашиваемой поверхностью

и финишным покрытием с обеспечением снижения вероятности возникновения статического напряжения и стекания образовавшихся зарядов с поверхности воздушного судна.

Для защиты корпусов самолетов от статического электричества и повышения безопасности полетов за рубежом разработаны и применяются электропроводные покрытия, обладающие высокой электропроводностью и устойчивостью к агрессивным внешним факторам. Зарубежные электропроводные лакокрасочные материалы разработаны на основе полиуретановых и эпоксидных полимеров. Двухкомпонентное катализируемое полиуретановое токопроводящее покрытие обеспечивает исключительную устойчивость к дождевой эрозии и проводимость для отвода статического электричества с поверхности. Покрытие можно формировать на противообледенительном оборудовании, лопастях воздушных винтов и других ответственных участках планера, подверженных разрушительному воздействию при высокоскоростном контакте с дождем, градом и пылью.

Основными преимуществами зарубежных полиуретановых электропроводных покрытий являются высокая устойчивость к воздействию внешних факторов, возможность использования в широком диапазоне климатических условий и длительный срок службы. Отвержденная пленка устойчива к химическим веществам, таким как смазочные материалы, гидравлические жидкости и авиационное топливо, а также хорошо выдерживает ударные нагрузки и устойчива к истиранию.

Для рассеяния зарядов с деталей из полимерных композиционных материалов за рубежом разработаны грунтовки на эпоксидной основе, наполненные тонкодисперсным порошком ацетиленовой сажи и углеродными наполнителями в качестве проводящего компонента. Покрытия на их основе отличаются контролируемыми токопроводящими свойствами, удельное объемное электросопротивление составляет от 10^6 до 10^8 Ом·м, они также обладают высокой устойчивостью к авиационным жидкостям и химическим веществам.

Заключения

По результатам анализа патентной научно-технической литературы установлено, что в настоящее время для получения электропроводных лакокрасочных покрытий наиболее оптимальным решением является наполнение пленкообразующего материалами с высокой электропроводностью.

Основные направления дальнейших исследований и разработок – повышение экономической эффективности, обеспечение оптимального баланса между стоимостью и эффективностью получаемых покрытий, улучшение технологичности электропроводных лакокрасочных материалов. К наиболее перспективным направлениям развития следует отнести адаптацию применения электропроводящих полимеров под традиционные методы нанесения лакокрасочных покрытий, разработку перспективных электропроводящих полимеров, а также получение новых эффективных наполнителей для электропроводных лакокрасочных покрытий. Правильный подбор наполнителя и оптимизация технологического процесса позволяют получать высококачественные покрытия, соответствующие современным техническим требованиям.

Постоянная разработка инновационных решений позволяет улучшать эксплуатационные характеристики покрытий, обеспечивая надежную защиту воздушного транспорта и повышая безопасность пассажиров и экипажа.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
3. Соколов О.А., Басыров Т.А. Защита самолетов от электростатического заряда и электрических разрядов // *Молодой ученый*. 2023. № 14 (461). С. 26–29.
4. Мишкин С.И., Клименко О.Н., Гуняева А.Г. Материалы для молниезащиты авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2023. № 7 (125). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.
5. Гуняева А.Г., Курносов А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
6. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
8. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. № 5–6. С. 40–44.
9. Zheng A., Xu X., Xiao H. et al. Antistatic modification of polypropylene by incorporating Tween / modified Tween // *Applied Surface Science*. 2012. No. 258 (22). P. 8861–8866.
10. Rahman M.B.A., Jumbri K., Basri M. et al. Synthesis and physico-chemical properties of new tetraethylammonium-based amino acid chiral ionic liquids // *Molecules*. 2010. No. 15. P. 2388–2397.
11. Shirakawa H., Louis E.J., Macdiarmid A.G. et al. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene (CH)_x // *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. 1977. No. 16. P. 578–580.
12. Chiang C.K., Park Y.W., Heeger A.J. et al. Conducting polymers: Halogen doped polyacetylene // *Journal of Chemical Physics*. 1978. No. 69 (11). P. 5098–5104.
13. Liang X., Deng Y., Li S. et al. Waterborne polyurethane-acrylate-polyaniline: Interfacial hydrogen bonding for enhancing the antistatic, damping, and mechanical properties // *Polymers for Advanced Technologies*. 2022. No. 33 (9). P. 2667–2681.
14. Zhu A., Wang H., Sun S., Zhang C. The synthesis and antistatic, anticorrosive properties of polyaniline composite coating // *Progress in Organic Coating*. 2018. No. 122. P. 270–279.
15. Gao X., Chu F. Fabrication of high conductivity polyurethane/polyaniline composite coating based on in-situ polymerization // *Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging*. 2019. Vol. 543. P. 958–963.
16. Лакокрасочный материал с электропроводным полиэтиленом для антикоррозионной защиты металлических конструкций: пат. 2320690 Рос. Федерация; заявл. 24.03.06; опубл. 27.03.08.
17. Электропроводный лакокрасочный материал для антикоррозионной защиты металлических конструкций: пат. 2318851 Рос. Федерация; заявл. 24.03.06; опубл. 10.03.08.
18. Conductive anticorrosive coating and preparation method thereof: pat. 103409033 CN; appl. 09.06.13; publ. 13.05.15.
19. Nano dispersed water-based conductive primer for vehicle bumper and preparation method thereof: pat. 102002314 CN; appl. 29.09.10; publ. 12.06.13.

20. Федорова Л.О., Каманина Н.В. Модификация прозрачного проводящего ИТО-покрытия наночастицами шунгита // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17. № 1. С. 5–12.
21. Голубев Е.А., Антонен И.В., Щеглов В.И. Модельные представления микроструктуры, электропроводящих и СВЧ-свойств шунгитов. Сыктывкар: СГУ им. Питирима Сорокина, 2017. 148 с.
22. Голубев Е.А., Антонен И.В. Влияние толщины пластин шунгита на его электрофизические свойства: технологический и геофизический аспекты // Вестник геонаук. 2024. № 10 (358). С. 40–45.
23. Эмаль (варианты): пат. 2368632 Рос. Федерация; заявл. 03.08.07; опубл. 27.09.09.
24. Conductive primer coating composition: pat. 2015196727 JP; appl. 31.03.14; publ. 09.11.15.
25. Conducting primer for electrostatic coating of plastic base material and preparation method thereof: pat. 102838909 CN. 201210389687; appl. 16.10.12; publ. 11.03.15.
26. Электропроводный лакокрасочный материал: пат. 2083619 Рос. Федерация; заявл. 23.08.95; опубл. 10.07.97.
27. Электропроводный лакокрасочный материал: пат. 2083622 Рос. Федерация; заявл. 24.08.95; опубл. 10.08.97.
28. Novel coating having electromagnetic radiation resistance and anti-static function: pat. 105399400 CN; appl. 08.12.15; publ. 19.12.17.
29. Яковлев Е.А., Яковлев Н.А., Ильиных И.А., Бурмистров И.Н., Горшков Н.В. Исследование влияния функционализированных многостенных углеродных нанотрубок на электропроводность и механические характеристики эпоксидных композитов // Вестник Томского государственного университета. Сер.: Химия. 2016. № 3 (5). С. 15–23.
30. Conductive coating material: pat. 20090152508 US; appl. 24.10.06; publ. 18.06.09.
31. Electrically conductive coating composition: pat. 2392623 EP; appl. 01.08.07; publ. 18.09.13.
32. Kuo Y.C., Lee C.H., Rajesh R. Iron oxide-entrapped solid lipid nanoparticles and poly (lactide-co-glycolide) nanoparticles with surfactant stabilization for antistatic application // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8 (1). P. 887–895.
33. El-Dessouky H.M., Lawrence C.A. Nanoparticles dispersion in processing functionalized PP/TiO₂ nanocomposites: distribution and properties // Journal of Nanoparticle Research. 2011. Vol. 13 (3). P. 1115–1124.
34. Nano dispersed water-based conductive primer for vehicle bumper and preparation method thereof: pat. 102002314 CN; appl. 29.09.10; publ. 12.06.13.
35. Электропроводный лакокрасочный материал для антикоррозионной защиты металлических конструкций: пат. 2318851 Рос. Федерация; заявл. 24.03.06; опубл. 10.03.08.
36. Пугачева Т.А., Курбатов В.Г. Использование керновых пигментов с оболочкой из проводящих полимеров в покрытиях для защиты металлов // Нефтехимия–2018: мат. I Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и по нефтепереработке (27–30 нояб. 2018 г., г. Минск): в 2 ч. Минск: БГТУ, 2018. Ч. 1. С. 213–216.
37. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
38. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные материалы и покрытия на их основе в машиностроении. М.: Пэйн-Медиа, 2021. С. 122.
39. 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.

References

1. 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.
2. Kablov E.N., Kutyrev 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), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 26, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

3. Sokolov O.A., Basyrov T.A. Protection of aircraft from electrostatic charge and electrical discharges. *Molodoy ucheny*, 2023, no. 14 (461), pp. 26–29.
4. Mishkin S.I., Klimenko O.N., Gunyaeva A.G. Materials for the lightnings protection of aviation engineering. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 26, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.
5. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 26, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
6. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
7. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
8. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft manufacturing and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
9. Zheng A., Xu X., Xiao H. et al. Antistatic modification of polypropylene by incorporating Tween / modified Tween. *Applied Surface Science*, 2012, no. 258 (22), pp. 8861–8866.
10. Rahman M.B.A., Jumbri K., Basri M. et al. Synthesis and physico-chemical properties of new tetraethylammonium-based amino acid chiral ionic liquids. *Molecules*, 2010, no. 15, p. 2388–2397.
11. Shirakawa H., Louis E.J., Macdiarmid A.G. et al. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene (CH)_x. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1977, no. 16, pp. 578–580.
12. Chiang C.K., Park Y.W., Heeger A.J. et al. Conducting polymers: Halogen doped polyacetylene. *Journal of Chemical Physics*, 1978, no. 69 (11), pp. 5098–5104.
13. Liang X., Deng Y., Li S. et al. Waterborne polyurethane-acrylate-polyaniline: Interfacial hydrogen bonding for enhancing the antistatic, damping, and mechanical properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, no. 33 (9), pp. 2667–2681.
14. Zhu A., Wang H., Sun S., Zhang C. The synthesis and antistatic, anticorrosive properties of polyaniline composite coating. *Progress in Organic Coating*, 2018, no. 122, pp. 270–279.
15. Gao X., Chu F. Fabrication of high conductivity polyurethane/polyaniline composite coating based on in-situ polymerization. *Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging*, 2019, vol. 543, pp. 958–963.
16. Paint and varnish material with conductive polyethylene for anti-corrosion protection of metal structures: pat. 2320690 Rus. Federation; appl. 24.03.06; publ. 27.03.08.
17. Electrically conductive paint and varnish material for anti-corrosion protection of metal structures: pat. 2318851 Rus. Federation; appl. 24.03.06; publ. 10.03.08.
18. Conductive anticorrosive coating and preparation method thereof: pat. 103409033 CN; appl. 09.06.13; publ. 13.05.15.
19. Nano dispersed water-based conductive primer for vehicle bumper and preparation method thereof: pat. 102002314 CN; appl. 29.09.10; publ. 12.06.13.
20. Fedorova L.O., Kamanina N.V. Modification of transparent conductive ITO coating with shungite nanoparticles. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2024, vol. 17, no. 1, pp. 5–12.
21. Goloubev E.A., Antonets I.V., Shcheglov V.I. Model representations of the microstructure, electrically conductive and microwave properties of shungites. Syktyvkar: Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin, 2017, 148 p.
22. Goloubev E.A., Antonets I.V. Influence of shungite plate thickness on its electrophysical properties: technological and geophysical aspects. *Vestnik geonauk*, 2024, no. 10 (358), pp. 40–45.
23. Enamel (options): pat. 2368632 Rus. Federation; appl. 03.08.07; publ. 27.09.09.
24. Conductive primer coating composition: pat. 2015196727 JP; appl. 31.03.14; publ. 09.11.15.
25. Conducting primer for electrostatic coating of plastic base material and preparation method thereof: pat. 102838909 CN. 201210389687; appl. 16.10.12; publ. 11.03.15.
26. Electrically conductive paint and varnish material: pat. 2083619 Rus. Federation; appl. 23.08.95; publ. 10.07.97.

27. *Electrically conductive paint and varnish material*: pat. 2083622 Rus. Federation; appl. 24.08.95; publ. 10.08.97
28. *Novel coating having electromagnetic radiation resistance and anti-static function*: pat. 105399400 CN; appl. 08.12.15; publ. 19.12.17.
29. Yakovlev E.A., Yakovlev N.A., Ilyinykh I.A., Burmistrov I.N., Gorshkov N.V. Study of the influence of functionalized multi-walled carbon nanotubes on the electrical conductivity and mechanical characteristics of epoxy composites. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Khimiya*, 2016, no. 3 (5), pp. 15–23.
30. *Conductive coating material*: pat. 20090152508 US; appl. 24.10.06; publ. 18.06.09.
31. *Electrically conductive coating composition*: pat. 2392623 EP; appl. 01.08.07; publ. 18.09.13.
32. Kuo Y.C., Lee C.H., Rajesh R. Iron oxide-entrapped solid lipid nanoparticles and poly (lactide-co-glycolide) nanoparticles with surfactant stabilization for antistatic application. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8 (1), pp. 887–895.
33. El-Dessouky H.M., Lawrence C.A. Nanoparticles dispersion in processing functionalized PP/TiO₂ nanocomposites: distribution and properties. *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, vol. 13 (3), pp. 1115–1124.
34. *Nano dispersed water-based conductive primer for vehicle bumper and preparation method thereof*: pat. 102002314 CN; appl. 29.09.10; publ. 12.06.13.
35. *Electrically conductive paint and varnish material for anti-corrosion protection of metal structures*: pat. 2318851 Rus. Federation; appl. 24.03.06; publ. 10.03.08.
36. Pugacheva T.A., Kurbatov V.G. Use of core pigments with a shell of conductive polymers in coatings for metal protection. *Petrochemistry–2018: Proc. I Int. scientific and technical. forum on chemical technologies and oil refining*: in 2 parts. Minsk: BSTU, 2018, part 1, pp. 213–216.
37. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
38. Kondrashov E.K. *Paints and varnishes and coatings based on them in mechanical engineering*. Moscow: Paint-Media, 2021, p. 122.
39. 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 aviation equipment. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 96–102.

Информация об авторах

Кречетов Данила Дмитриевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козлова Алеся Александровна, начальник сектора, 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

Danila D. Krechetov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alesya A. Kozlova, Head of Sector, 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 08.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.08.2025.
The article was submitted 08.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.08.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134

МОДИФИКАЦИЯ АКРИЛОВЫХ СОПОЛИМЕРОВ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Д.А. Измалков¹, К.Р. Ахмадиева¹, В.В. Боков¹, М.С. Кожухаров¹

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

Аннотация. Проведен анализ публикаций, посвященных различным способам модификации акриловых сополимеров на водной основе. Приведены достоинства и недостатки акриловых покрытий на водной основе. Рассмотрены физические и химические методы модификации, которые позволяют направленно изменять свойства акриловых сополимеров на водной основе. Показано практическое использование указанных методов модификации для повышения водостойкости, коррозионной стойкости, термических и физико-механических свойств акриловых покрытий на водной основе.

Ключевые слова: акриловый сополимер на водной основе, физическая модификация, химическая модификация, физико-механические свойства, термические свойства, коррозионная стойкость, водостойкость

Для цитирования: 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). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134.

Scientific article

MODIFICATION OF WATER-BASED ACRYLIC COPOLYMERS TO IMPROVE THE PERFORMANCE PROPERTIES OF PAINT COATINGS

D.A. Izmailkov¹, K.R. Akhmadieva¹, V.V. Bokov¹, M.S. Kozhukharov¹

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 analyzes publications on various methods of modification of water-based acrylic copolymers and provides the advantages and disadvantages of water-based acrylic coatings. The physical and chemical modification methods that make it possible to change the properties of water-based acrylic copolymers are considered. The paper shows the practical use of these modification methods for increasing water and corrosion resistance, as well as thermal and physical-mechanical properties of water-based acrylic coatings.

Keywords: water-based acrylic copolymer, physical modification, chemical modification, physical-mechanical properties, thermal properties, corrosion resistance, water resistance

For citation: 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), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-122-134.

Введение

В промышленности широко распространены лакокрасочные материалы (ЛКМ), в состав которых входят летучие органические соединения или их смеси для снижения вязкости, равномерного распределения всех компонентов и оптимального времени высыхания. Однако в последнее время важной проблемой является уменьшение вредного воздействия на атмосферу. В связи с этим постепенно растет спрос на производство пленкообразующих для покрытий на водной основе, что позволяет уменьшить выбросы летучих органических соединений. Среди таких продуктов можно выделить акриловые ЛКМ на водной основе, которые широко используются во многих областях – например, в авиа-, автомобиле- и кораблестроении, строительстве и др.

В качестве сырья для данных пленкообразующих используют акриловые кислоты, их эфиры и непредельные мономеры, которые сополимеризуют друг с другом под действием инициаторов радикальной полимеризации (рис. 1). Получают смолы на водной основе обычно в растворе, суспензии, эмульсии и массе. Регулируя соотношения мономеров между собой, молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение сополимеров, можно получить различные свойства готовых твердых пленок.

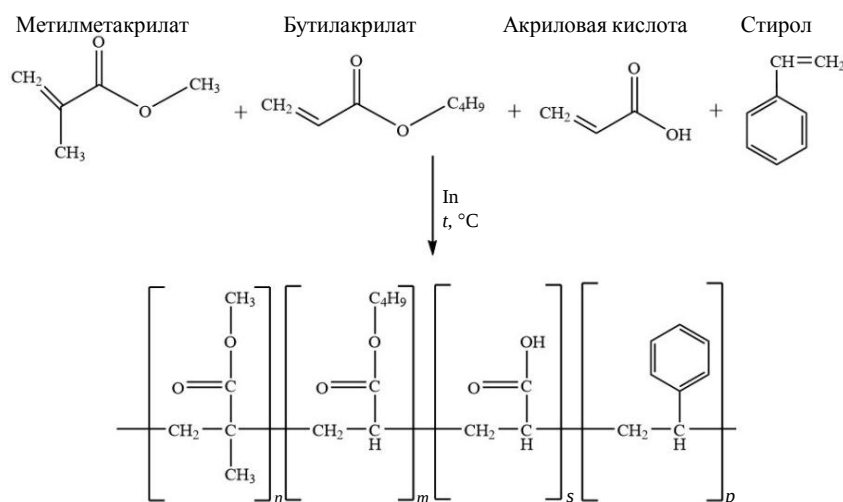


Рис. 1. Схема синтеза акрилового сополимера на водной основе

Среди достоинств покрытий на основе акриловых ЛКМ можно выделить высокую стойкость к ультрафиолету и теплу [1], химическую стойкость [2], низкую стоимость и атмосферостойкость, внешний вид и прозрачность пленки [3].

Однако благодаря наличию гидрофильных карбоксильных групп в составе сополимера и высокой поверхностной энергии указанные материалы склонны к поглощению воды. Таким образом, покрытия на основе акриловых смол имеют низкие водо- и коррозионную стойкость, недостаточные механическую прочность и стойкость к истиранию, высокую температуру пленкообразования и др. [4].

Для устранения указанных недостатков акриловых пленкообразующих применяют различные способы модификации для улучшения характеристик покрытий на их основе, которые будут рассмотрены далее (рис. 2). Основными методами улучшения свойств пленок являются физическая и химическая модификации. Первый способ заключается в физическом или механическом добавлении и распределении различных нанонаполнителей и добавок в полимерной матрице, тем самым повышаются эксплуатационные и технологические свойства материала [5]. При этом важным фактором является совместимость органических и неорганических веществ с полимерными

макромолекулами. Другой метод основан на химических реакциях сополимеризации и сшивания, а именно – модификации на молекулярном уровне [6]. При этом готовые покрытия обладают комплексом свойств ЛКМ, включающим преимущества пленкообразующих различной химической природы. Таким образом, физическая модификация – простой способ улучшения свойств акриловых пленкообразующих на водной основе, но далеко не достаточный, в то время как химическая модификация является надежной и долговечной.

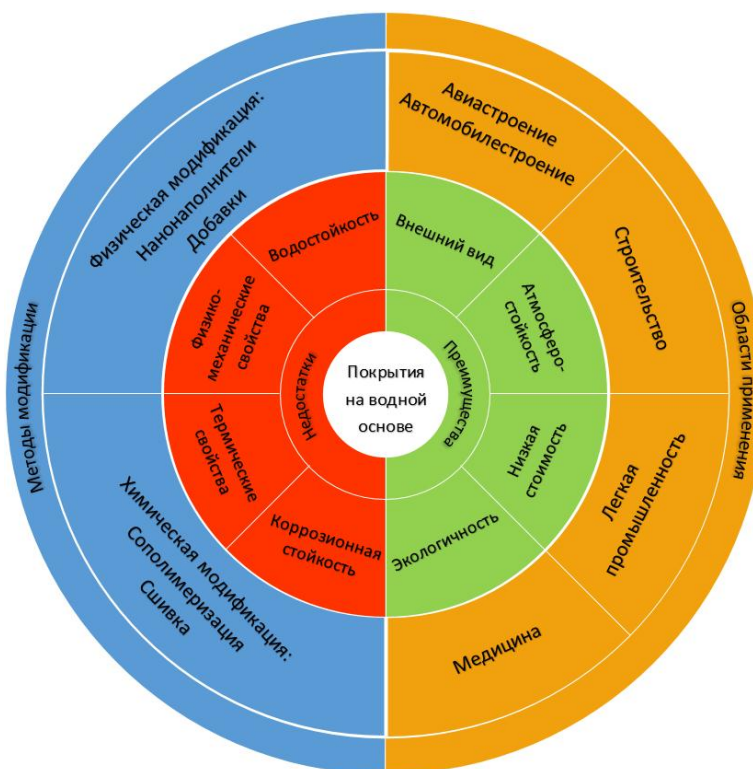


Рис. 2. Общие сведения об акриловых покрытиях на водной основе

В данной статье проведен анализ публикаций, касающихся различных способов модификации акриловых сополимеров на водной основе для повышения водостойкости, коррозионной стойкости, термических и физико-механических свойств.

Работа проведена в рамках реализации стратегического 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») [7].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Модификация акриловых сополимеров на водной основе

для повышения термических свойств лакокрасочных покрытий

Термические характеристики акриловых пленкообразующих (такие как термостойкость, теплоизоляция, термоокислительная стабильность и огнестойкость [8]) являются одними из важных эксплуатационных свойств, определяющих области применения ЛКМ на их основе. В первую очередь они заключаются в способности материала переносить различные температуры и изменять свою форму при этих условиях.

Термические свойства термореактивных акриловых сополимеров на водной основе проще всего регулировать с помощью изменения степени сшивки макромолекул [9]. Для получения покрытия выбирают необходимые отвердители и катализаторы. С целью повышения теплостойкости можно получать жесткие полимерные цепи в составе акриловых пленкообразующих [10]. Для улучшения огнестойкости существует метод модификации смол соединениями с высоким содержанием углерода, который выделяется при горении на поверхности ЛКМ в виде пленки и затрудняет дальнейшее распространение огня [11]. Например, добавление к смеси акриловых мономеров акрилонитрила повышает последующую термическую стабильность готового покрытия за счет нитрильных групп [12]. В работе [13] авторы получили нанокompозитный материал на основе акрилата бентонита. Готовое покрытие имело структуру наноглины, которая обладает повышенными термическими свойствами.

К способам физической модификации относят смешивание акриловых сополимеров с наполнителями, однако для достижения лучшего эффекта твердые частицы должны быть хорошо диспергированы в получаемом ЛКМ. Например, авторы работы [14] создали теплоизоляционный ЛКМ на основе данных смол с добавлением пустотелых стеклянных наполнителей или стеклянных микросфер, которые равномерно распределяли в композиции с помощью высокоскоростного перемешивания. Добавление же пигмента Al_2O_3 способно повысить барьерные характеристики и термостойкость акриловых пленок любой толщины [15]. В работе [1] показано, что добавление 5 % (по массе) аэрогеля на основе диоксида кремния к акриловым эмульсиям на водной основе привело к повышению температуры деструкции образцов на 20 °С. Причем такие покрытия толщиной 120 мкм обладали улучшенными теплоизоляционными свойствами и позволили снизить температуру металлической поверхности на 7–8 °С.

Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения водостойкости лакокрасочных покрытий

Другой важной эксплуатационной характеристикой является водостойкость покрытий, которая определяется главным образом гидрофобностью сополимеров, характером взаимодействия между полимерными цепями и наличием полярных групп в составе макромолекул. Особое значение имеют поверхностная энергия и шероховатость поверхности покрытия [16, 17].

Часто используют химическую модификацию фтором [18], который, будучи полярным атомом, придает покрытиям гидрофобность, или кремнием, повышающим шероховатость пленки. Авторы работы [19] использовали эти преимущества и прививали кремний на фторированную акриловую водную эмульсию с низкой поверхностной энергией. Благодаря такой модификации краевой угол смачивания увеличился с 83 до 110 градусов. Кремнийсодержащие соединения и связующие способны вступать в реакцию отверждения с акриловыми пленкообразующими на водной основе. При этом происходит образование трехмерной сетчатой структуры с низкой поверхностной энергией [20]. Например, в работе [21] получена гидроксилсодержащая акриловая смола, модифицированная ацетатом бутирата целлюлозы, которую впоследствии отверждали γ -аминопропилтриэтоксисиланом. Твердое покрытие обладало плотной сшитой структурой и низким поверхностным натяжением, что привело к увеличению краевого угла смачивания. В работе [22] получены блочные акриловые сополимеры с помощью RAFT-эмульсионной полимеризации (полимеризация с обратимой передачей цепи) в воде с использованием фторированных мономеров – 2,2,2-трифторэтилметакрилата и 2,2,3,4,4,4-гексафторбутилакрилата. Таким образом, при содержании фтора в конечных эмульсиях от 5 до 20 % (по массе) конечные покрытия имели угол контакта с водой

>100 градусов, что свидетельствует о повышенной гидрофобности. В работе [23] авторы получили фторированную акриловую эмульсию, которую затем смешивали с наночастицами диоксида кремния с поверхностью, модифицированной силановым связующим. Выявлено, что функционализированный SiO_2 изменяет поверхностную структуру готового покрытия, увеличивая шероховатость и гидрофобность.

Существуют также примеры модификации эпоксидными смолами. Авторы работы [24] синтезировали в несколько этапов водорастворимое пленкообразующее путем прививочной этерификации акриловой и эпоксидной смол. Твердые покрытия за счет внутренней структуры образовывали сшитую сеть, которая замедляла диффузию воды вглубь материала и повышала его прочность. В работе [25] для модификации акрилового латекса на водной основе использован 3,3',5,5'-тетраметил-4,4'-бифенилдиглицидиловый эфир (рис. 3). Благодаря такому решению водостойкость конечного покрытия увеличилась до 35 дней, при этом также увеличились физико-механические характеристики пленки. Полученный ЛКМ рекомендован для защиты деревянных изделий [26].

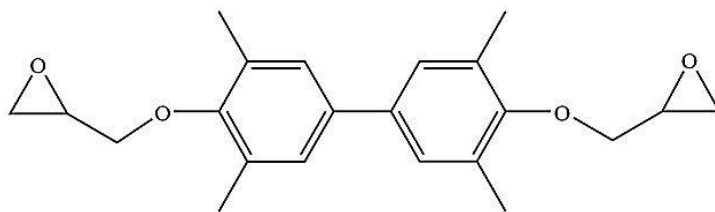


Рис. 3. Структурная формула 3,3',5,5'-тетраметил-4,4'-бифенилдиглицидилового эфира

В работе [27] представлен синтез сополимера алкидной и акриловой смол с использованием инициаторов радикальной полимеризации. Выявлено, что при содержании 10 % (по массе) гидрофобных алкидных цепей в пленкообразующем краевой угол смачивания пленок с водой составил 90 градусов. Наименьшие показатели водопоглощения и коэффициента диффузии воды достигнуты при содержании 25 % (по массе) алкидной смолы при угле смачивания ~95 градусов.

Авторами работы [28] представлен метод физической модификации акриловой дисперсии на водной основе, который заключается в смешении продукта с парафиновой дисперсией и последующим нанесением покрытия. Такой способ позволил получить материал с пониженными показателями паропроницаемости и влагопоглощения, а также способствовал увеличению краевого угла смачивания и гидрофобности.

Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения физико-механических свойств лакокрасочных покрытий

К физико-механическим свойствам покрытий на основе водоразбавляемых акриловых сополимеров относят прочность при ударе и изгибе, жесткость, твердость и др.

Одним из способов улучшения вышеуказанных характеристик является повышение плотности сшивки полимерной цепи. Наличие в пленкообразующем свободных функциональных групп может приводить к поглощению энергии извне или к обеспечению пластификации композиции с одной стороны, однако из-за этого могут снижаться механические параметры пленки. Плотная же система поперечных связей между макромолекулами повышает жесткость и прочность материала до определенного предела, после чего с повышением степени сшивки покрытие может стать хрупким. Авторы работы [29] выяснили, что при отверждении акрилового водного пленкообразующего на

основе глицидилметакрилата аминопропилтриэтоксисиланом образуется пленка с оптимально сшитой структурой и высокими механическими характеристиками.

Помимо химической модификации повышение свойств готовой композиции возможно с помощью добавления неорганических соединений. Для равномерного распределения наполнителя в полимерной матрице применяют пластификаторы, коалесцирующие агенты и другие добавки. Например, существуют методы введения в композицию частиц SiO_2 с модифицированной поверхностью, при этом происходит распределение нагрузки в конечном продукте и улучшение его прочностных характеристик. Для создания нанокомпозитов используют оксиды металлов (ZnO , Fe_2O_3 и др.) [30, 31], слоистые материалы [32], нанотрубки [33–35] и др.

На свойства ЛКМ на основе акриловых водоразбавляемых сополимеров также влияет соотношение жестких и мягких мономеров, основанное на их разных температурах стеклования, и молекулярно-массовое распределение. Температура стеклования возрастает с ростом молекулярной массы пленкообразующего до определенного значения, а именно – до образования статического сегмента макромолекулы [36]. Пленкообразующие с высокими молекулярными массами и узким интервалом молекулярно-массового распределения имеют высокую вязкость растворов и высокие механические характеристики, однако их переработка в готовое изделие имеет ряд трудностей, поэтому при производстве ЛКМ используют пленкообразующие, молекулярная масса которых находится в пределах от 1000 до 10000 г/моль. Температура стеклования сополимера и его физико-механические свойства определяются выбором соотношений различных мономеров при синтезе [37]. Например, авторы работы [38] выяснили, что повышение содержания бутилакрилата с температурой стеклования гомополимера, равной 32 °С, приводит к увеличению гибкости пленок, однако при этом происходит снижение прочности на растяжение и удлинение, а также показали способ получения гибридной дисперсии на основе полимочевины, модифицированной метилметакрилатом и бутилакрилатом, с последующим получением покрытия с повышенными твердостью по Кеннингу и модулем упругости. С другой стороны, добавление в состав сополимеров мономеров стирола и акрилонитрила с высокими температурами стеклования заметно улучшает ударопрочность, износостойкость и физико-механические свойства готового лакокрасочного покрытия.

Совмещение акриловых сополимеров с другими пленкообразующими позволяет получать материалы, обладающие преимуществами обоих полимеров. Например, авторы работы [39] сначала получили алкидную смолу, а затем радикальной полимеризацией модифицировали ее акриловым мономером. В результате готовая пленка обладала высокой твердостью, ударопрочностью и адгезией. Модификация соединениями с эпоксидными группами также приводит к повышению прочности при растяжении материала [25].

Модификация акриловых сополимеров на водной основе для повышения коррозионной стойкости лакокрасочных покрытий

Каждый год на защиту металлических изделий от коррозии тратится значительное количество ресурсов и рабочей силы [40]. Для предотвращения такого воздействия широко применяются водные акриловые смолы [41] благодаря таким свойствам, как атмосферостойкость, экологичность, устойчивость к кислотам, щелочам и другим веществам. Существует два метода защиты металла от коррозии.

Первый из них основан на внешней защите, который заключается в предотвращении проникновения электролитов с помощью введения в пленкообразующее фтор- и кремнийсодержащих мономеров для повышения гидрофобности, добавления

тонкодисперсных наполнителей, а также путем улучшения структуры полимерной матрицы и модификации другими смолами [6, 17]. Непроницаемые наночастицы, вводимые в пленкообразующее, позволяют повысить барьерные свойства материала против агрессивных сред. Авторы работы [42] показали возможность модификации алкидных смол акрилат-силоксаном с получением покрытия с низким водопоглощением и высокими краевыми углами смачивания, что привело к улучшению антикоррозионных характеристик. В работе [27] приведены синтез алкидных смол с последующей прививкой на них акриловых мономеров и получение пленкообразующего с разветвленной структурой (рис. 4).

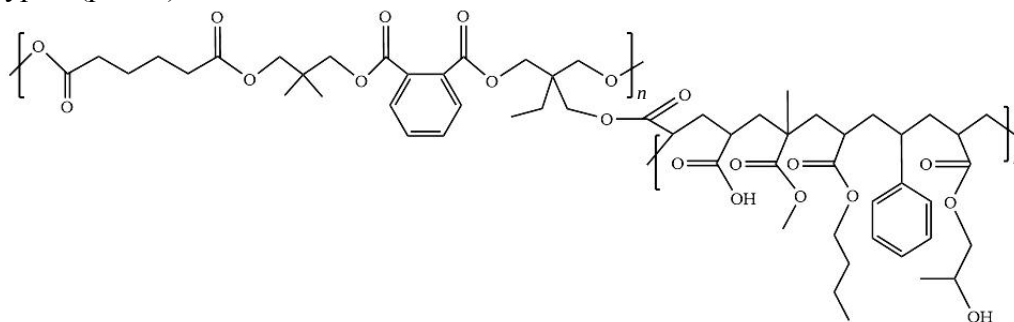


Рис. 4. Акрил-алкидный сополимер с разветвленной структурой

Сделан вывод, что разветвленная структура имеет более низкую температуру стеклования, а это позволяет получать покрытия с плотной упаковкой макромолекул, которая затрудняет внешнюю диффузию агрессивных сред. Наличие свободных полярных групп в пленкообразующем способствует повышению водопоглощения, что негативно влияет на антикоррозионные свойства материала. Поэтому целесообразно проводить химическую сшивку этих групп, что не только улучшает физико-механические характеристики, но и снижает набухание покрытий, содержание геля в пленке [43] и диффузию агрессивных сред [44]. Помимо этого, высокая молекулярная масса пленкообразующего приводит к повышению вязкости ЛКМ и последующему ухудшению окрашиваемости поверхностей и антикоррозионных свойств [45].

В то же время при нанесении и высыхании пленки на ее поверхности появляются различные дефекты, физические и химические изменения, из-за которых электролит может оказаться на границе «металл–покрытие», при этом ухудшая адгезию пленки и подвергая металлическое изделие коррозии. В связи с вышесказанным существует другой способ, а именно – внутренняя защита. Поверхность обрабатывают различными веществами или окисляют ее, создавая защитный слой. Например, широко известно применение фосфатов, которые обладают хорошей адгезией и к металлической подложке, и к ЛКМ. Благодаря этому замедляется горизонтальная диффузия агрессивных ионов и коррозия, происходит повышение адгезии и снижение отслоения пленок [46].

Заключения

Акриловые сополимеры на водной основе имеют большое практическое значение благодаря сочетанию ценных свойств акрилатов (атмосферостойкости, прозрачности, низкой стоимости и др.) с возможностью использования нетоксичных пожаробезопасных растворителей, не вызывающих загрязнения окружающей среды.

Для улучшения эксплуатационных и защитных характеристик акриловых сополимеров на водной основе и расширения сферы их применения используют физические и химические методы модификации, которые позволяют направленно изменять свойства полимеров – повышать устойчивость к термическим и механическим воздействиям, придавать гидрофобность и др.

Следует отметить, что изучение акриловых сополимеров на водной основе, с учетом их экологической значимости, продолжится в дальнейшем в области совершенствования составов и технологий синтеза, обеспечивающих получение материалов с высокими эксплуатационными и технологическими характеристиками [47].

Список источников

1. Karami S., Montahari S., Pishvaei M., Eskandari N. Improvement of thermal properties of pigmented acrylic resin using silica aerogel // *Journal of applied polymer science*. 2018. Vol. 135. No. 1. P. 1–9. DOI: 10.1002/app.45640.
2. Du B., Chen F., Luo R., Zhou S., Wu Z. Synthesis and Characterization of Nano-TiO₂/SiO₂-Acrylic Composite Resin // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 1–7. DOI: 10.1155/2019/6318623.
3. Yilmaz O. High performance nanocomposite coatings based on soft core-reactive shell polyacrylic latex/modified halloysite nanotubes // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 127. P. 266–275. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.026.
4. Zhong S., Li J., Cai Y., Yi L. Novel surfactant-free waterborne acrylic-silicone modified alkyd hybrid resin coatings containing nano-silica for the corrosion protection of carbon steel // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2019. Vol. 58. No. 8. P. 866–878. DOI: 10.1080/03602559.2018.1542711.
5. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Wei J., Oyang C., Shan X., Gao Q. Advances in water-resistant modification of aqueous acrylic resins: modification methods, mechanism of action // *MATEC Web of Conferences*. 2022. Vol. 363. P. 1–9. DOI: 10.1051/mateconf/202236301024.
7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ 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.
8. Yin Y., Jiang B., Zhu X. et al. Investigation of Thermostability of Modified Graphene Oxide/Methylsilicone Resin Nanocomposites // *Engineered Science*. 2019. Vol. 5. P. 73–78. DOI: 10.30919/es8d762.
9. Tang L.S., Zhang M., Zhang S.F., Yang J.Z. High performance waterborne aminoacrylic coatings from the blends of hydrosols and latexes // *Progress in Organic Coatings*. 2004. Vol. 49. No. 1. P. 54–61. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2003.08.007.
10. Yang K., Chen X., Zhang Z. et al. Introducing rigid pyrimidine ring to improve the mechanical properties and thermal-oxidative stabilities of phthalonitrile resin // *Polymers for Advanced Technologies*. 2019. Vol. 31. No. 2. P. 328–337. DOI: 10.1002/pat.4773.
11. Bai L., Zheng S., Bao R. et al. Effect of PLA Crystallization on the Thermal Conductivity and Breakdown Strength of PLA/BN Composites // *ES Materials & Manufacturing*. 2019. Vol. 3. P. 66–72. DOI: 10.30919/esmm5f195.
12. Xiong K., Wang L., Zhang A. The Mechanical Properties, Compatibility, and Thermal Stabilities of POE-Graft-Methyl Methacrylate and Acrylonitrile(POE-g-MAN)/ Styrene-Acrylonitrile Copolymer (SAN Resin) Blends // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2011. Vol. 50. No. 7. P. 1350–1363. DOI: 10.1080/00222348.2010.516178.
13. Romo-Urbe A., Santiago-Santiago K., Zavala-Padilla G. et al. Waterborne layered silicate/acrylate nanocomposites by in-situ emulsion polymerization: Thermal and mechanical reinforcement // *Progress in Organic Coatings*. 2016. Vol. 101. P. 59–70. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.07.014.
14. Insulating paint for interior and exterior of buildings and method of making same: pat. 4623390A US; appl. 04.11.85; publ. 18.11.86.
15. Comite A., Cozza E.S., Di Tanna G. et al. Influence of counter ions in electrochemical properties and kinetic parameters of poly tyramine electroactive film // *Progress in Organic Coatings*. 2015. Vol. 78. P. 124–132.

16. Jiao C., Sun L., Shao Q. et al. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. P. 2443–2449. DOI: 10.1021/acsomega.0c05593.
17. Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Применение и модификация частиц для создания супергидрофобных покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 5 (123). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
18. Timperley C.M., Arbon R.E., Bird M. et al. Bis(fluoroalkyl)acrylic and methacrylic phosphate monomers, their polymers and some of their properties // *Journal of Fluorine Chemistry*. 2003. Vol. 121. No. 1. P. 23–31. DOI: 10.1016/S0022-1139(02)00314-7.
19. Yang W., Zhu L., Chen Y. et al. Surface topography and hydrophobicity of waterborne fluorinated acrylic/silica hybrid coatings // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015. Vol. 484. P. 62–69. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.07.053.
20. Xu H., Qiu F., Wang Y. et al. Preparation, Mechanical Properties of Waterborne Polyurethane and Crosslinked Polyurethane-Acrylate Composite // *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 124. No. 2. P. 958–968. DOI: 10.1002/app.35127.
21. Zheng B., Ge S., Wang S. et al. Effect of γ -aminopropyltriethoxysilane on the properties of cellulose acetate butyrate modified acrylic waterborne coatings // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. Vol. 154. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104657.
22. Jiang Y., Li L., Liu J. et al. Hydrophobic films of acrylic emulsion by incorporation of fluorine-based copolymer prepared through the RAFT emulsion copolymerization // *Journal of Fluorine Chemistry*. 2016. Vol. 183. P. 82–91. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2016.01.010.
23. Li L., Li X., Shen Y. et al. Hydrophobicity and corrosion resistance of waterborne fluorinated acrylate/silica nanocomposite coatings // *e-Polymers*. 2021. Vol. 21. No. 1. P. 779–792. DOI: 10.1515/epoly-2021-0079.
24. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 75. P. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
25. Bi J., Liu Y., Gao F. et al. Improving water resistance and mechanical properties of waterborne acrylic resin modified by 3,3',5,5'-tetramethyl-4,4'-biphenyl diglycidyl ether // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Vol. 35. P. 1–34. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102426.
26. Liang C., Du Y., Wang Y. et al. Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2021. Vol. 4. P. 979–988. DOI: 10.1007/s42114-021-00274-5.
27. Ji S., Gui H., Guan G. et al. Molecular design and copolymerization to enhance the anti-corrosion performance of waterborne acrylic coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 153. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106140.
28. Терешко А.Е., Голиков И.В., Индейкин Е.А., Краснобаева В.С. Модификация акриловых водно-дисперсных лакокрасочных материалов нефтеуглеводородами // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2007. № 50 (4). С. 77–80.
29. Guo X., Ge S., Wang J. et al. Waterborne acrylic resin modified with glycidyl methacrylate (GMA): Formula optimization and property analysis // *Polymer*. 2018. Vol. 143. P. 155–163. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.04.020.
30. Nosrati R., Olad A., Maryami F. Visible-light induced anti-bacterial and self-cleaning waterborne polyacrylic coating modified with TiO₂/polypyrrole nanocomposite; preparation and characterization // *Journal of Molecular Structure*. 2018. Vol. 1163. P. 174–184. DOI: 10.1016/j.molstruc.2018.02.097.
31. Poddar M.K., Sharma S., Moholkar V.S. Investigations in two-step ultrasonic synthesis of PMMA/ZnO nanocomposites by in situ emulsion polymerization // *Polymer*. 2016. Vol. 99. P. 453–469. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.07.052.
32. Sharma S., Poddar M.K., Moholkar V.S. Enhancement of thermal and mechanical properties of poly(MMA-co-BA)/Cloisite 30B nanocomposites by ultrasound-assisted in-situ emulsion polymerization // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. Vol. 36. P. 212–225. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.029.

33. Zahedi F., Amraee I.A. Carboxylated multiwalled carbon nanotubes effect on dynamic mechanical behavior of soft films composed of multilayer polymer structure // *Polymer*. 2018. Vol. 151. P. 187–196. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.07.044.
34. Ткачук А.И., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Любимова А.С. Модификация эпоксидных связующих многостенными углеродными нанотрубками // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-63-76.
35. Соловьяничик Л.В., Кондрашов С.В. Перспективность использования углеродных нанотрубок для придания поверхности полимерных материалов функциональных свойств (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21.
36. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2003. 203 с.
37. Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Розенберг Б.А. Стеклование полимеров. Л.: Химия, 1987. 192 с.
38. Drake I., Cardoen G., Hughes A. et al. Polyurea-acrylic hybrid emulsions: Characterization and film properties // *Polymers*. 2019. Vol. 181. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121761.
39. Shim J.Y., Park D.M., Kim H.O. The Synthesis of Waterborne Acrylic – Modified Alkyd and its Application // *Proceedings of the 24th International Waterborne, High-Solids, and Powder Coatings Symposium*. 1997. P. 159–167.
40. 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.
41. Madhusudha A.M., Mohana K.N.S., Hegde M.B. et al. Functionalized graphene oxide-epoxy phenolic novolac nanocomposite: an efficient anticorrosion coating on mild steel in saline medium // *Advances Composites and Hybrid Materials*. 2020. Vol. 3. P. 141–155. DOI: 10.1007/s42114-020-00142-8.
42. Zhong S., Li J., Yi L. et al. Cross-linked waterborne alkyd hybrid resin coatings modified by fluorinated acrylate-siloxane with high waterproof and anticorrosive performance // *Polymers for Advanced Technologies*. 2018. Vol. 30. No. 2. P. 292–303. DOI: 10.1002/pat.4464.
43. Pham H.H., Winnik M.A. Polymer Interdiffusion vs Cross-Linking in Carboxylic Acid–Carbodiimide Latex Films. Effect of Annealing Temperature, Reactive Group Concentration, and Carbodiimide Substituent // *Macromolecules*. 2006. Vol. 39. No. 4. P. 1425–1435. DOI: 10.1021/ma051685w.
44. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 75. P. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
45. 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.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
46. Zhong Z., Yu Q., Yao H. et al. Study of the styrene–acrylic emulsion modified by hydroxyl-phosphate ester and its stoving varnish // *Progress in Organic Coatings*. 2013. Vol. 76. No. 5. P. 858–863. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2013.02.008.
47. 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. Karami S., Montahari S., Pishvaei M., Eskandari N. Improvement of thermal properties of pigmented acrylic resin using silica aerogel. *Journal of applied polymer science*, 2018, vol. 135, no. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1002/app.45640.

2. Du B., Chen F., Luo R., Zhou S., Wu Z. Synthesis and Characterization of Nano-TiO₂/SiO₂-Acrylic Composite Resin. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1155/2019/6318623.
3. Yilmaz O. High performance nanocomposite coatings based on soft core-reactive shell polyacrylic latex/modified halloysite nanotubes. *Progress in Organic Coatings*, 2019, vol. 127, pp. 266–275. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.11.026.
4. Zhong S., Li J., Cai Y., Yi L. Novel surfactant-free waterborne acrylic-silicone modified alkyd hybrid resin coatings containing nano-silica for the corrosion protection of carbon steel. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2019, vol. 58, no. 8, pp. 866–878. DOI: 10.1080/03602559.2018.1542711.
5. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Grigoreva K.N. Research of the influence of the modifying additives nature on the rheological and thermomechanical properties of a photopolymer composition based on epoxy vinyl ester resin. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Wei J., Oyang C., Shan X., Gao Q. Advances in water-resistant modification of aqueous acrylic resins: modification methods, mechanism of action. *MATEC Web of Conferences*, 2022, vol. 363, pp. 1–9. DOI: 10.1051/mateconf/202236301024.
7. 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.
8. Yin Y., Jiang B., Zhu X. et al. Investigation of Thermostability of Modified Graphene Oxide/Methylsilicone Resin Nanocomposites. *Engineered Science*, 2019, vol. 5, pp. 73–78. DOI: 10.30919/es8d762.
9. Tang L.S., Zhang M., Zhang S.F., Yang J.Z. High performance waterborne aminoacrylic coatings from the blends of hydrosols and latexes. *Progress in Organic Coatings*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2003.08.007.
10. Yang K., Chen X., Zhang Z. et al. Introducing rigid pyrimidine ring to improve the mechanical properties and thermal-oxidative stabilities of phthalonitrile resin. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, vol. 31, no. 2, pp. 328–337. DOI: 10.1002/pat.4773.
11. Bai L., Zheng S., Bao R. et al. Effect of PLA Crystallization on the Thermal Conductivity and Breakdown Strength of PLA/BN Composites. *ES Materials & Manufacturing*, 2019, vol. 3, pp. 66–72. DOI: 10.30919/esmm5f195.
12. Xiong K., Wang L., Zhang A. The Mechanical Properties, Compatibility, and Thermal Stabilities of POE-Graft-Methyl Methacrylate and Acrylonitrile(POE-g-MAN)/ Styrene-Acrylonitrile Copolymer (SAN Resin) Blends. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2011, vol. 50, no. 7, pp. 1350–1363. DOI: 10.1080/00222348.2010.516178.
13. Romo-Urbe A., Santiago-Santiago K., Zavala-Padilla G. et al. Waterborne layered silicate/acrylate nanocomposites by in-situ emulsion polymerization: Thermal and mechanical reinforcement. *Progress in Organic Coatings*, 2016, vol. 101, pp. 59–70. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.07.014.
14. *Insulating paint for interior and exterior of buildings and method of making same*: pat. 4623390A US; appl. 04.11.85; publ. 18.11.86.
15. Comite A., Cozza E.S., Di Tanna G. et al. Influence of counter ions in electrochemical properties and kinetic parameters of poly tyramine electroactive film. *Progress in Organic Coatings*, 2015, vol. 78, pp. 124–132.
16. Jiao C., Sun L., Shao Q. et al. Advances in Waterborne Acrylic Resins: Synthesis Principle, Modification Strategies, and Their Applications. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 2443–2449. DOI: 10.1021/acsomega.0c05593.
17. Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Application and modification of particles to create superhydrophobic coatings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
18. Timperley C.M., Arbon R.E., Bird M. et al. Bis(fluoroalkyl)acrylic and methacrylic phosphate monomers, their polymers and some of their properties. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2003, vol. 121, no. 1, pp. 23–31. DOI: 10.1016/S0022-1139(02)00314-7.

19. Yang W., Zhu L., Chen Y. et al. Surface topography and hydrophobicity of waterborne fluorinated acrylic/silica hybrid coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, vol. 484, pp. 62–69. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.07.053.
20. Xu H., Qiu F., Wang Y. et al. Preparation, Mechanical Properties of Waterborne Polyurethane and Crosslinked Polyurethane-Acrylate Composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, vol. 124, no. 2, pp. 958–968. DOI: 10.1002/app.35127.
21. Zheng B., Ge S., Wang S. et al. Effect of γ -aminopropyltriethoxysilane on the properties of cellulose acetate butyrate modified acrylic waterborne coatings. *Reactive and Functional Polymers*, 2020, vol. 154, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104657.
22. Jiang Y., Li L., Liu J. et al. Hydrophobic films of acrylic emulsion by incorporation of fluorine-based copolymer prepared through the RAFT emulsion copolymerization. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2016, vol. 183, pp. 82–91. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2016.01.010.
23. Li L., Li X., Shen Y. et al. Hydrophobicity and corrosion resistance of waterborne fluorinated acrylate/silica nanocomposite coatings. *e-Polymers*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 779–792. DOI: 10.1515/epoly-2021-0079.
24. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment. *Corrosion Science*, 2013, vol. 75, pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
25. Bi J., Liu Y., Gao F. et al. Improving water resistance and mechanical properties of waterborne acrylic resin modified by 3,3',5,5'-tetramethyl-4,4'-biphenyl diglycidyl ether. *Surfaces and Interfaces*, 2022, vol. 35, pp. 1–34. DOI: 10.1016/j.surf.2022.102426.
26. Liang C., Du Y., Wang Y. et al. Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, vol. 4, pp. 979–988. DOI: 10.1007/s42114-021-00274-5.
27. Ji S., Gui H., Guan G. et al. Molecular design and copolymerization to enhance the anti-corrosion performance of waterborne acrylic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 153, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106140.
28. Tereshko A.E., Golikov I.V., Indeikin E.A., Krasnobaeva V.S. Modification of acrylic water-dispersed paints and varnishes with petroleum hydrocarbons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2007, no. 50 (4), pp. 77–80.
29. Guo X., Ge S., Wang J. et al. Waterborne acrylic resin modified with glycidyl methacrylate (GMA): Formula optimization and property analysis. *Polymer*, 2018, vol. 143, pp. 155–163. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.04.020.
30. Nosrati R., Olad A., Maryami F. Visible-light induced anti-bacterial and self-cleaning waterborne polyacrylic coating modified with TiO₂/polypyrrole nanocomposite; preparation and characterization. *Journal of Molecular Structure*, 2018, vol. 1163, pp. 174–184. DOI: 10.1016/j.molstruc.2018.02.097.
31. Poddar M.K., Sharma S., Moholkar V.S. Investigations in two-step ultrasonic synthesis of PMMA/ZnO nanocomposites by in situ emulsion polymerization. *Polymer*, 2016, vol. 99, pp. 453–469. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.07.052.
32. Sharma S., Poddar M.K., Moholkar V.S. Enhancement of thermal and mechanical properties of poly(MMA-co-BA)/Cloisite 30B nanocomposites by ultrasound-assisted in-situ emulsion polymerization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 36, pp. 212–225. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.11.029.
33. Zahedi F., Amraee I.A. Carboxylated multiwalled carbon nanotubes effect on dynamic mechanical behavior of soft films composed of multilayer polymer structure. *Polymer*, 2018, vol. 151, pp. 187–196. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.07.044.
34. Tkachuk A.I., Kurshev E.V., Lonskii S.L., Lyubimova A.S. Modification of epoxy binders with multi-walled carbon nanotubes. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-63-76.
35. Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V. The prospects of using carbon nanotubes to impart functional properties to the surface of polymer materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 06, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21.

36. Kryzhanovsky V.K. *Technical properties of polymeric materials*. St. Petersburg: Professiya, 2003, 203 p.
37. Rostiasvili V.G., Irzhak V.I., Rosenberg B.A. *Glass transition of polymers*. Leningrad: Khimiya, 1987, 192 p.
38. Drake I., Cardoen G., Hughes A. et al. Polyurea-acrylic hybrid emulsions: Characterization and film properties. *Polymers*, 2019, vol. 181, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.121761.
39. Shim J.Y., Park D.M., Kim H.O. The Synthesis of Waterborne Acrylic – Modified Alkyd and its Application. *Proceedings of the 24th International Waterborne, High-Solids, and Powder Coatings Symposium*, 1997, pp. 159–167.
40. 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.
41. Madhusudha A.M., Mohana K.N.S., Hegde M.B. et al. Functionalized graphene oxide-epoxy phenolic novolac nanocomposite: an efficient anticorrosion coating on mild steel in saline medium. *Advances Composites and Hybrid Materials*, 2020, vol. 3, pp. 141–155. DOI: 10.1007/s42114-020-00142-8.
42. Zhong S., Li J., Yi L. et al. Cross-linked waterborne alkyd hybrid resin coatings modified by fluorinated acrylate-siloxane with high waterproof and anticorrosive performance. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, vol. 30, no. 2, pp. 292–303. DOI: 10.1002/pat.4464.
43. Pham H.H., Winnik M.A. Polymer Interdiffusion vs Cross-Linking in Carboxylic Acid–Carbodiimide Latex Films. Effect of Annealing Temperature, Reactive Group Concentration, and Carbodiimide Substituent. *Macromolecules*, 2006, vol. 39, no. 4, pp. 1425–1435. DOI: 10.1021/ma051685w.
44. Liu M., Mao X., Zhu H. et al. Water and corrosion resistance of epoxy–acrylic–amine waterborne coatings: Effects of resin molecular weight, polar group and hydrophobic segment. *Corrosion Science*, 2013, vol. 75, pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.05.020.
45. 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: May 06, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
46. Zhong Z., Yu Q., Yao H. et al. Study of the styrene–acrylic emulsion modified by hydroxyl-phosphate ester and its stoving varnish. *Progress in Organic Coatings*, 2013, vol. 76, no. 5, pp. 858–863. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2013.02.008.
47. 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, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Боков Виталий Викторович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кожухаров Максим Сергеевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Vitalij V. Bokov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.07.2025.
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 08.07.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-135-148

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИСТЕМ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ШПАТЛЕВКИ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФТОРОПЛАСТОВОЙ, ФТОРКАУЧУКОВОЙ И ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ЭМАЛЕЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИС.А. Марченко¹, П.В. Скивко¹, В.А. Кузнецова¹

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

Аннотация. Исследованы свойства лакокрасочных покрытий на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения в системах с фторопластовой, фторкаучуковой и полиуретановой эмалями в исходном состоянии и после воздействия различных эксплуатационных факторов. В результате исследований выявлено, что применение шпатлевки в системах с различными эмалями не влияет на внешний вид, степень развития грибов и адгезию лакокрасочных покрытий. Стойкость к удару систем лакокрасочных покрытий с входящей в состав шпатлевкой после испытаний не ухудшается (по сравнению с системами со шпатлевкой в исходном состоянии).

Ключевые слова: универсальная шпатлевка холодного отверждения, системы лакокрасочных покрытий, адгезия, прочность при ударе, водостойкость, искусственное старение, грибоустойчивость

Для цитирования: Марченко С.А., Скивко П.В., Кузнецова В.А. Исследование свойств систем покрытий на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения с применением фторопластовой, фторкаучуковой и полиуретановой эмалей после воздействия различных факторов эксплуатации // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-135-148.

Scientific article

PROPERTIES OF COATING SYSTEMS WITH A UNIVERSAL COLD-CURING PUTTY WITH FLUOROPLASTIC, FLUORO-RUBBER AND POLYURETHANE ENAMELS AFTER EXPOSURE TO VARIOUS PERFORMANCE FACTORSS.A. Marchenko¹, P.V. Skivko¹, V.A. Kuznetsova¹

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

Abstract. This study examines the properties of paint coatings based on a universal cold-curing putty with fluoroplastic, fluoro-rubber and polyurethane enamels in their initial state and after exposure to various operational factors. The results show that the use of putty in systems with different enamels does not affect the appearance, fungal growth and adhesion of paint coatings. The impact resistance of coating systems containing this putty shows no deterioration after testing (compared to systems with the putty in its initial state).

Keywords: universal cold-curing putty, coating systems, adhesion, impact strength, water absorption, artificial aging, fungus resistance

For citation: Marchenko S.A., Skivko P.V., Kuznetsova V.A. Properties of coating systems with a universal cold-curing putty with fluoroplastic, fluoro-rubber and polyurethane enamels after exposure to various performance factors. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-135-148.

Введение

Современное развитие авиационной техники характеризуется резким увеличением доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях воздушных судов. Их широкое внедрение обусловлено высокими удельными прочностными характеристиками, коррозионной стойкостью, а также хорошими эксплуатационными свойствами и сопротивлением усталости [1–4].

В условиях эксплуатации летательные аппараты подвергаются значительным температурным перепадам, климатическим воздействиям и механическим нагрузкам, особенно в фазах взлета и посадки. В связи с этим критически возрастает роль защитных покрытий, обеспечивающих долговечность и надежность конструкций из ПКМ. Эффективность лакокрасочных покрытий (ЛКП) напрямую влияет на срок службы и безопасность полетов авиационной техники. При этом важнейшими параметрами становятся адгезия покрытий к различным подложкам, механическая прочность и устойчивость к агрессивным внешним воздействиям [5, 6].

Одной из актуальных задач является ремонт, а также выравнивание перед окраской поверхности конструкций из ПКМ, в том числе крупногабаритных панелей, в условиях ограниченного доступа к промышленным условиям. Для таких случаев требуются быстросохнущие материалы холодного отверждения, которые обладают высокой адгезией к подложке, равномерным распределением по поверхности и минимальной усадкой при отверждении. В настоящее время наибольшее распространение получили полиэфирные шпатлевки, характеризующиеся малой усадкой даже при значительной толщине слоя и высокой скоростью полимеризации (по сравнению с акриловыми и нитроцеллюлозными аналогами). Применяются также отечественные системы на основе эпоксидных грунтовок и шпатлевок (например, ЭП-0104, ЭП-0026, ЭП-0080), содержащие до 40–70 % органических растворителей. Это приводит к значительным выбросам летучих органических соединений и увеличенной энергоемкости процесса. В связи с этим необходимо создание экологичных отечественных ЛКП холодного отверждения с пониженным в 1,5–2 раза содержанием растворителей, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками [7–13].

Шпатлевки используются в системах с грунтами, гарантирующими адгезию к подложке, а также с эмалями, обеспечивающими атмосферостойкость, устойчивость к перепадам температур, химическим реагентам, эрозии и декоративные свойства.

В современной авиационной промышленности широкое применение находят покрытия на основе фторопластовых, фторкаучуковых и полиуретановых эмалей. Внутренние поверхности защищаются эпоксидными грунтами и эмалями. Особое внимание уделяется фторкаучуковым покрытиям, демонстрирующим высокую гибкость, коррозионную стойкость и устойчивость к вибрациям и температурным циклам. Полиуретановые эмали ценятся за ударопрочность, стойкость к воздействию внешних факторов и декоративные качества, фторопластовые ЛКП – за исключительную химическую стойкость и высокую атмосферостойкость [14–19].

Таким образом, разработка и внедрение новых ЛКП холодного отверждения с улучшенными экологическими и эксплуатационными характеристиками являются актуальной научно-практической задачей в области авиационных покрытий.

Цель данного исследования – комплексная оценка влияния универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25 на физико-механические и защитные характеристики систем покрытий с различными типами эмалей (фторопластовых, фторкаучуковых, полиуретановых), а также исследование их свойств в условиях эксплуатации.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7 «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» в соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [20].

Материалы и методы

С целью изучения свойств покрытий на базе шпатлевки ВШ-25 выбраны следующие лакокрасочные материалы:

- эпоксидная грунтовка ЭП-0104 (ТУ 6-10-1124–75);
- эпоксидная грунтовка ЭП-0215 (ТУ 6-10-1966–84);
- эпоксидная грунтовка ВГ-28 (ТУ 1-595-15-582–2022);
- фторкаучуковая эмаль КЧ-5230 (ТУ 6-10-2034–85);
- фторопластовая эмаль ВЭ-46 (ТУ 1-595-9-273–2021);
- полиуретановая эмаль ВЭ-69 (ТУ 1-595-15-1057–2008).

Свойства лакокрасочных систем, содержащих универсальную шпатлевку холодного отверждения ВШ-25, определялись в сравнении с аналогичными системами в исходном состоянии, а также с системами без использования шпатлевки.

Выбраны следующие подложки – алюминиевый сплав Д16 с нанесенным покрытием Ан.Окс.нхр, углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200, стеклопластики ВПС-48/7781 и КМКС. Шпатлевку на подложки наносили с помощью пластикового шпателя. Остальные лакокрасочные материалы, такие как грунтовки и эмали, наносили методом пневматического распыления в соответствии с требованиями нормативной документации. Образцы с нанесенными покрытиями выдерживали в камере с постоянными значениями температуры и влажности. Для оценки прочности при ударе и адгезии покрытия образцы выдерживали в течение 5 сут при температуре 20 ± 2 °С.

Системы покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 испытаны на стойкость к воздействию следующих эксплуатационных факторов:

- термостарение при температурах 100 °С в течение 1000 ч и 80 °С в течение 2000 ч;
- ускоренные испытания на стойкость к ультрафиолетовому излучению;
- статическое воздействие воды в течение 7 сут;
- статическое воздействие рабочих жидкостей в течение 14 сут;
- грибостойкость;
- испытания в тропической камере;
- экспозиция на открытых площадках в г. Москве (12 мес.) и г. Геленджике (12 мес.).

Ускоренные испытания на стойкость к ультрафиолетовому излучению проводили в течение 1000 ч (1 цикл: 4 ч – облучение лампой UVB-340, температура 60 °С; 4 ч – конденсация влаги, температура 50 °С).

Грибостойкость систем покрытий определяли по ГОСТ 9.049–91 (метод 2, по шестибалльной шкале) при сроке испытания 28 и 84 сут.

Испытания в камере тропического климата проводили в течение 30 и 90 сут с влажностью 98 % при температурах 50 °С (в течение 8 ч) и 20 °С (в течение 12 ч), проветривание при комнатной температуре в течение 4 ч.

В качестве основных критериев оценки свойств систем ЛКП с применением шпатлевки ВШ-25 выбраны: внешний вид, адгезия покрытий по ГОСТ 31149–2014; прочность покрытия при ударе по ГОСТ 4765–2024. Толщину покрытий определяли с помощью прибора «Константа К6Ц» и микрометра МК-25 в соответствии с ГОСТ 31993–2024.

Результаты и обсуждение

Для проведения исследований на лабораторном оборудовании изготовлена шпатлевка ВШ-25 и определены ее технологические свойства. Время высыхания до степени 3 при температуре 20 ± 2 °С составляет 4 ч; жизнеспособность шпатлевки после смешения с отвердителем 2 ч. Преимуществом шпатлевки является увеличенная жизнеспособность, что удобно для работы на сложных объектах.

Проведены исследования покрытия на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25. Установлено, что шпатлевка обладает следующим уровнем свойств: адгезия к подложкам (алюминиевый сплав, углепластик, стеклопластики) составляет 1 балл; прочность при ударе 4,0 Дж, что является несомненным преимуществом перед аналогами, в большинстве случаев имеющими прочность при ударе от 1,0 до 2,0 Дж (например, у шпатлевок ЭП-0061: 1,5 Дж или ВШ-17М: 2,0 Дж).

Изготовлены контрольные образцы и образцы систем покрытий на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25 с фторопластовой, фторкаучуковой и полиуретановой эмалями на подложках из алюминиевого сплава Д16-АТ, углеродного и стеклопластиков. Для сравнения прочности при ударе и адгезии систем покрытий, включающих шпатлевку ВШ-25 и исключаяющих ее, изготовлены контрольные образцы. Системы покрытий подобраны исходя из химической природы каждого отдельного покрытия и взаимодействия их в системе. В табл. 1–3 приведены свойства образцов на основе шпатлевки ВШ-25 в системах с различными эмалями.

Таблица 1

Свойства образцов на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25 и фторопластовой эмали ВЭ-46 в исходном состоянии

Система покрытий	Подложка	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Грунтовка ЭП-0215 + эмаль ВЭ-46	Алюминиевый сплав Д16-АТ	5,0	0
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-46	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	3,0	0
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	–	0
	Стеклопластик ВПС-48/7781	–	1
	Стеклопластик КМКС	–	1

Таблица 2

Свойства образцов на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25 и фторкаучуковой эмали КЧ-5230 в исходном состоянии

Система покрытий	Подложка	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Грунтовка ЭП-0104 + эмаль КЧ-5230	Алюминиевый сплав Д16-АТ	4,0	0
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль КЧ-5230	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	3,0	1
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	–	1
	Стеклопластик ВПС-48/7781	–	0
	Стеклопластик КМКС	–	0

Таблица 3

Свойства образцов на основе универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25 и полиуретановой эмали ВЭ-69 в исходном состоянии

Система покрытий	Подложка	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Грунтовка ЭП-0215 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав Д16-АТ	5,0	1
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	3,0	0
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	–	0
	Стеклопластик ВПС-48/7781	–	0
	Стеклопластик КМКС	–	1
Шпатлевка ВШ-25 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	3,0	0
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	–	1
	Стеклопластик ВПС-48/7781	–	1
	Стеклопластик КМКС	–	1

Установлено, что покрытия, содержащие универсальную шпатлевку холодного отверждения ВШ-25 в сочетании с фторопластовой, фторкаучуковой и полиуретановой эмалями, в исходном состоянии характеризуются следующими свойствами: адгезия к подложкам составляет 0–1 балл, прочность при ударе 3,0 Дж. Показано, что адгезия многослойных систем, включающих шпатлевку ВШ-25, сопоставима с контрольными образцами (0–1 балл). Однако показатели ударной прочности несколько меньше – около 3,0 Дж (при толщине покрытия от 150 до 190 мкм), в то время как у покрытий без шпатлевки ВШ-25 они достигают 4,0–5,0 Дж. Различие в прочности при ударе объясняется, прежде всего, большей общей толщиной систем покрытий, включающих шпатлевку ВШ-25, – в среднем на 100–150 мкм больше по сравнению с контрольными образцами. По результатам испытаний увеличение толщины системы ЛКП значительно влияет на снижение показателей прочности при ударе.

Для устранения влияния толщины покрытия на интерпретацию результатов испытаний прочности при ударе, а также с учетом сложности обеспечения равномерного слоя шпатлевки при нанесении шпателем, проведены испытания систем покрытий в исходном состоянии. На основе полученных данных построены зависимости прочности при ударе от толщины покрытия (рис. 1). Это позволило более объективно оценить влияние универсальной шпатлевки холодного отверждения ВШ-25 на прочностные характеристики систем ЛКП.

Наблюдается обратная зависимость прочности при ударе от толщины покрытия. Это может быть связано с внутренними напряжениями, хрупкостью толстого слоя или его меньшей эластичностью. Более высокие значения прочности при ударе в системах с эмалью КЧ-5230 связаны с химической природой пленкообразующего эмали.

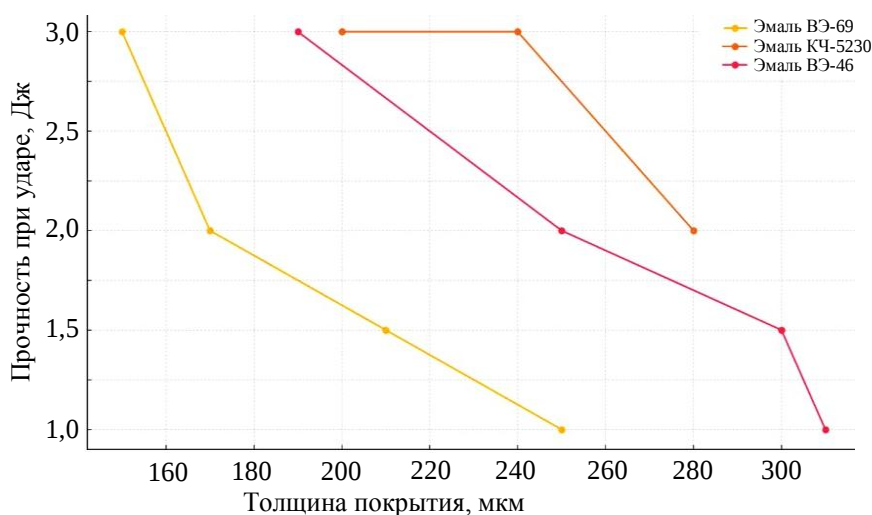


Рис. 1. Зависимость прочности при ударе от толщины покрытий

В табл. 4–6 приведены результаты исследований универсальной шпатлевки холодного отверждения в системах ЛКП после статического воздействия воды и рабочих жидкостей (масел АМГ-10 и Б-3В, топлива ТС-1). На рис. 2 показан результат исследования адгезии покрытия на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-46 после испытаний в масле АМГ-10.

Таблица 4

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-46 после статического воздействия воды и рабочих жидкостей

Система покрытий	Подложка	Воздействующая среда	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-46	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	Вода в течение, сут:		
		1	3,0	0
		3	2,0	0
		7	3,0	0
		Рабочие жидкости в течение 14 сут:		
		АМГ-10	2,0	0
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	Б-3В	3,0	0
		ТС-1	2,5	0
		Вода в течение, сут:		
		1	—	0
		3	—	0
		7	—	0
		Рабочие жидкости в течение 14 сут:		
		АМГ-10	—	0
		Б-3В	—	1
		ТС-1	—	0

Таблица 5

**Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-69
после статического воздействия воды и рабочих жидкостей**

Система покрытий	Подложка	Воздействующая среда	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	Вода в течение, сут:		
		1	3,0	1
		3	2,0	1
		7	2,0	1
		Рабочие жидкости в течение 14 сут:		
		АМГ-10	2,0	0
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	Б-3В	2,0	1
		ТС-1	2,0	1
		Вода в течение, сут:		
		1	—	0
		3	—	1
		7	—	1
		Рабочие жидкости в течение 14 сут:		
		АМГ-10	—	1
		Б-3В	—	0
		ТС-1	—	0

Таблица 6

**Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали КЧ-5230
после статического воздействия воды**

Система покрытий	Подложка	Воздействующая среда	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль КЧ-5230	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28	Вода в течение, сут:		
		1	2,0	1
		3	3,0	1
		7	2,0	1
	Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200	Вода в течение, сут:		
		1	—	1
		3	—	1
		7	—	1

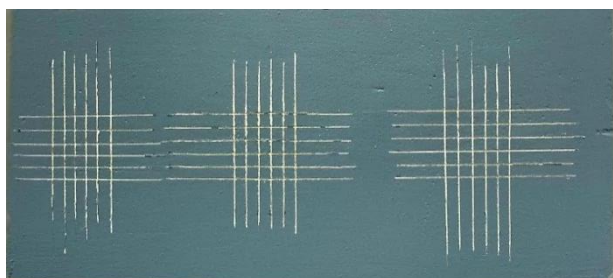


Рис. 2. Адгезия покрытия на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-46 после испытаний в масле АМГ-10

Покрытия показали высокую стойкость к воздействию всех исследуемых жидкостей. Адгезия к подложкам остается на исходном уровне. Прочность пленки при ударе системы с эмалью ВЭ-46 при толщине покрытия от 160 до 280 мкм – от 2,0 до 3,0 Дж. При увеличении толщины покрытия до ~(230–280) мкм наблюдается снижение прочности при ударе до 2,0 Дж. Прочность пленки при ударе системы с эмалью ВЭ-69 при толщине покрытия от 150 до 190 мкм – от 2,0 до 3,0 Дж. Прочность пленки при ударе системы с эмалью КЧ-5230 при толщине покрытия от 200 до 280 мкм – от 2,0 до 3,0 Дж.

Проведены исследования универсальной шпатлевки холодного отверждения в системах ЛКП после ускоренных климатических испытаний в камере тропического климата. По результатам климатических испытаний системы покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмалей ВЭ-46, ВЭ-69 и КЧ-5230 продемонстрировали сохранение высоких адгезионных характеристик и внешнего вида с оценкой адгезии в диапазоне от 0 до 1 балла (рис. 3). Для покрытия на основе эмали КЧ-5230 наблюдалось равномерное пожелтение, в том числе на контрольных образцах, что свидетельствует о том, что наличие в системе покрытия шпатлевки ВШ-25 не оказывает влияния на изменение цвета эмали.

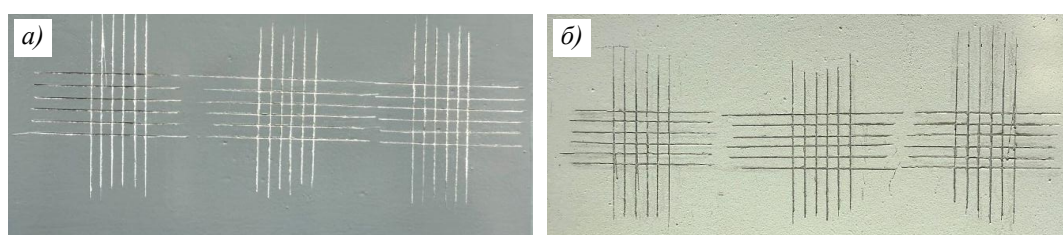


Рис. 3. Адгезия покрытия на основе шпатлевки ВШ-25, эмалей ВЭ-69 (а) и КЧ-5230 (б) после испытаний в камере тропического климата в течение 90 сут

Результаты исследований универсальной шпатлевки холодного отверждения в системах ЛКП после термического старения при температуре 100 °С в течение 1000 ч и при температуре 80 °С в течение 2000 ч приведены в табл. 7–9.

Проведенное исследование показало, что все исследуемые ЛКП на основе шпатлевки ВШ-25 после длительного воздействия повышенных температур (100 °С в течение 1000 ч и 80 °С в течение 2000 ч) сохраняют адгезию от 0 до 1 балла. Прочность пленки при ударе системы с эмалью ВЭ-46 при толщине покрытия от 230 до 250 мкм: 2,0 Дж; с эмалью ВЭ-69 при толщине покрытия от 160 до 180 мкм: 2,0 Дж; с эмалью КЧ-5230 при толщине покрытия от 200 до 270 мкм – от 2,0 до 3,0 Дж (рис. 4).

Таблица 7

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-46 после длительного воздействия повышенных температур

Система покрытий	Подложка	Условия термического старения (температура/продолжительность)	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-46	Алюминиевый сплав	100 °С/1000 ч	2,0	1
	Д16-АТ + ВГ-28	80 °С/2000 ч	2,0	1
	Углепластик	100 °С/1000 ч	–	1
	ВКУ-39/ВтКУ-2.200	80 °С/2000 ч	–	1
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	–	0
	ВПС-48/7781	80 °С/2000 ч	–	1
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	–	1
	КМКС	80 °С/2000 ч	–	1

Таблица 8

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-69 после длительного воздействия повышенных температур

Система покрытий	Подложка	Условия термического старения (температура/продолжительность)	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав	100 °С/1000 ч	2,0	1
	Д16-АТ + ВГ-28	80 °С/2000 ч	2,0	1
	Углепластик	100 °С/1000 ч	—	1
	ВКУ-39/ВтКУ-2.200	80 °С/2000 ч	—	0
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	—	1
	ВПС-48/7781	80 °С/2000 ч	—	1
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	—	0
	КМКС	80 °С/2000 ч	—	0
Шпатлевка ВШ-25 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав	100 °С/1000 ч	2,0	1
	Д16-АТ + ВГ-28	80 °С/2000 ч	2,0	1
	Углепластик	100 °С/1000 ч	—	1
	ВКУ-39/ВтКУ-2.200	80 °С/2000 ч	—	1
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	—	1
	ВПС-48/7781	80 °С/2000 ч	—	1
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	—	1
	КМКС	80 °С/2000 ч	—	1

Таблица 9

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали КЧ-5230 после длительного воздействия повышенных температур

Система покрытий	Подложка	Условия термического старения (температура/продолжительность)	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль КЧ-5230	Алюминиевый сплав	100 °С/1000 ч	3,0	0
	Д16-АТ + ВГ-28	80 °С/2000 ч	2,0	1
	Углепластик	100 °С/1000 ч	—	1
	ВКУ-39/ВтКУ-2.200	80 °С/2000 ч	—	1
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	—	1
	ВПС-48/7781	80 °С/2000 ч	—	0
	Стеклопластик	100 °С/1000 ч	—	1
	КМКС	80 °С/2000 ч	—	1

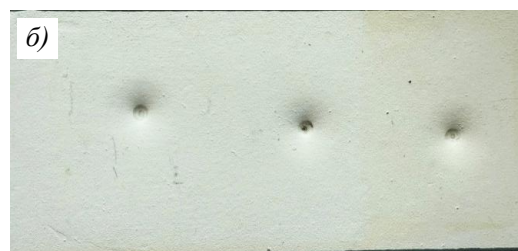
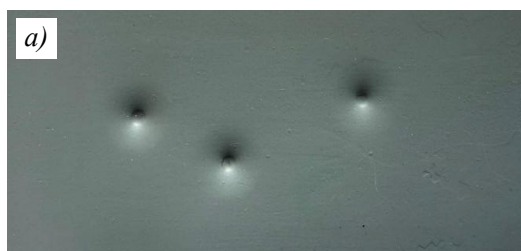


Рис. 4. Прочность при ударе покрытия на основе шпатлевки ВШ-25, эмалей ВЭ-69 (а) и КЧ-5230 (б) после длительного воздействия повышенных температур (100 °С в течение 1000 ч)

Проведенные исследования после воздействия ультрафиолетового излучения (атмосферостойкость) в аппарате искусственной погоды в течение 1000 ч показали, что все исследуемые системы покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмалей ВЭ-46, ВЭ-69 и КЧ-5230 сохраняют адгезию от 0 до 1 балла (рис. 5). Прочность пленки при ударе системы с эмалью ВЭ-46 при толщине покрытия от 160 до 200 мкм: 3,0 Дж; с эмалью ВЭ-69 при толщине покрытия от 160 до 180 мкм: 2,0 Дж; с эмалью КЧ-5230 при толщине покрытия от 200 до 270 мкм – от 2,0 до 3,0 Дж.

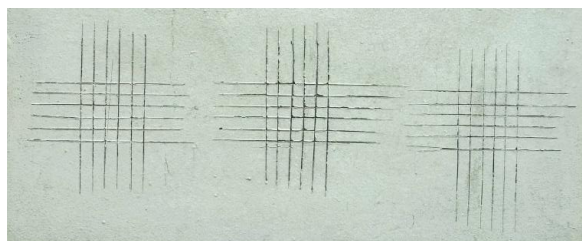


Рис. 5. Адгезия покрытия на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали КЧ-5230 после испытаний в аппарате искусственной погоды в течение 1000 ч

В результате проведенных исследований шпатлевки в системах ЛКП после испытаний на грибостойкость во влажной среде в соответствии с ГОСТ 9.049–91 (метод 2) в течение 28 и 84 сут установлено, что покрытия обладают следующим уровнем свойств: адгезия к подложкам составляет 0–1 балл, степень развития грибов 2 балла. У образцов систем покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 с фторопластовой и полиуретановой эмалями после испытаний не наблюдалось изменения внешнего вида. У образцов систем покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и фторкаучуковой эмали наблюдалось пожелтение и образование желтых капель на поверхности покрытия после испытаний, в которых образцы подвергали одновременному воздействию повышенной температуры и высокой влажности. Данный эффект также наблюдался при испытаниях контрольных образцов эмали КЧ-5230 без шпатлевки ВШ-25. Таким образом, изменение внешнего вида обусловлено свойствами фторкаучуковой эмали и не зависит от шпатлевки ВШ-25.

Результаты проведенных испытаний образцов на основе шпатлевки ВШ-25 в системах с эмалями после натурной экспозиции на открытых площадках г. Москвы и г. Геленджика приведены в табл. 10–12.

Таблица 10

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-46 после натурной экспозиции в г. Москве и г. Геленджике в течение 12 мес.

Система покрытий	Подложка	Место экспозиции (город)	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-46	Алюминиевый сплав	Москва	1,5	1
	Д16-АТ + ВГ-28	Геленджик	1,0	0
	Углепластик	Москва	–	1
	ВКУ-39/ВтКУ-2.200	Геленджик	–	0
	Стеклопластик	Москва	–	0
	ВПС-48/7781	Геленджик	–	1
	Стеклопластик	Москва	–	0
	КМКС	Геленджик	–	0

Таблица 11

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-69 после натурной экспозиции в г. Москве и г. Геленджике в течение 12 мес.

Система покрытий	Подложка	Место экспозиции (город)	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28 Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200 Стеклопластик ВПС-48/7781 Стеклопластик КМКС	Москва	1,5	0
		Геленджик	1,0	0
		Москва	—	1
		Геленджик	—	1
		Москва	—	1
		Геленджик	—	1
		Москва	—	1
		Геленджик	—	0
Шпатлевка ВШ-25 + эмаль ВЭ-69	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28 Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200 Стеклопластик ВПС-48/7781 Стеклопластик КМКС	Москва	1,0	1
		Геленджик	1,0	1
		Москва	—	1
		Геленджик	—	0
		Москва	—	1
		Геленджик	—	1
		Москва	—	1
		Геленджик	—	1

Таблица 12

Свойства систем лакокрасочных покрытий на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали КЧ-5230 после натурной экспозиции в г. Москве и г. Геленджике в течение 12 мес.

Система покрытий	Подложка	Место экспозиции (город)	Прочность пленки при ударе по прибору типа У-1А, Дж (ГОСТ 4765)	Адгезия, балл (ГОСТ 31149)
Шпатлевка ВШ-25 + грунтовка ЭП-0104 + эмаль КЧ-5230	Алюминиевый сплав Д16-АТ + ВГ-28 Углепластик ВКУ-39/ВтКУ-2.200 Стеклопластик ВПС-48/7781 Стеклопластик КМКС	Москва	2,0	0
		Геленджик	2,0	0
		Москва	—	1
		Геленджик	—	1
		Москва	—	0
		Геленджик	—	0
		Москва	—	0
		Геленджик	—	0

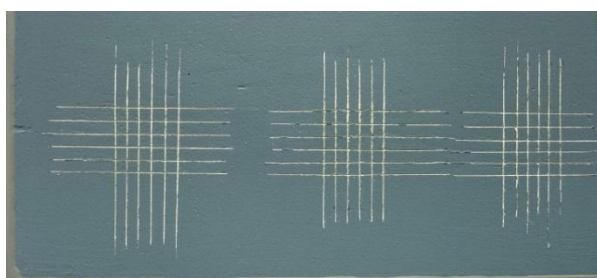


Рис. 6. Адгезия покрытия на основе шпатлевки ВШ-25 и эмали ВЭ-46 после натурной экспозиции на открытой площадке г. Москвы

Установлено, что покрытия на основе шпатлевки ВШ-25 в системах с фторопластовой, фторкаучуковой и полиуретановой эмалями после натурной экспозиции на открытых площадках г. Москвы и г. Геленджика обладают следующим уровнем свойств: адгезия к подложкам составляет 0–1 балл (рис. 6), прочность при ударе от 1,0 до 2,0 Дж. Прочность пленки при ударе систем покрытий после натурной экспозиции

на открытой площадке г. Москвы: с эмалью ВЭ-46 составляет 1,5 Дж при толщине покрытия от 290 до 305 мкм; с эмалью ВЭ-69 – от 1,0 до 1,5 Дж при толщине покрытия от 220 до 260 мкм; с эмалью КЧ-5230: 2,0 Дж при толщине покрытия от 250 до 280 мкм. Прочность пленки при ударе систем покрытий после натурной экспозиции на открытой площадке г. Геленджика: с эмалью ВЭ-46 составляет 1,0 Дж при толщине покрытия от 310 до 320 мкм; с эмалью ВЭ-69: 1,0 Дж при толщине покрытия от 240 до 270 мкм; с эмалью КЧ-5230: 2,0 Дж при толщине покрытия от 250 до 300 мкм.

Заключения

В работе исследованы показатели адгезии и прочности при ударе систем ЛКП, в состав которых входит универсальная шпатлевка холодного отверждения ВШ-25 в комбинации с эмалями ВЭ-69, ВЭ-46 и КЧ-5230. Для сравнения свойств использованы аналогичные системы без применения шпатлевки. Установлено, что применение шпатлевки ВШ-25 в составе систем ЛКП не оказывает отрицательного влияния на адгезионные характеристики: все исследованные образцы демонстрируют адгезию к подложке на уровне 0–1 балла (аналогично контрольным системам без шпатлевки).

Однако прочность при ударе у систем, содержащих шпатлевку ВШ-25, в среднем меньше по сравнению с контрольными образцами. Это снижение обусловлено увеличением общей толщины покрытия при применении шпатлевки – в среднем на 100–150 мкм.

Комплексные испытания ЛКП с подслоем шпатлевки ВШ-25 включали воздействие эксплуатационных факторов: статическое воздействие воды и рабочих жидкостей, термостойкость, климатические испытания в камерах тропической и искусственной погоды, оценку грибостойкости, а также натурные экспозиции в условиях городской и морской атмосферы (г. Москва и г. Геленджик). После всех видов испытаний не наблюдалось ухудшения адгезии или внешнего вида покрытий. Степень поражения грибами составила 2 балла.

Следует отметить, что значения прочности при ударе после испытаний остались на уровне, сопоставимом с исходным состоянием систем со шпатлевкой ВШ-25. Таким образом, снижение прочности при ударе не является следствием эксплуатационных воздействий, а связано преимущественно с большей толщиной покрытия. С целью исключения влияния толщины на интерпретацию результатов, дополнительно проведены испытания систем ЛКП в исходном состоянии с построением зависимости «прочность при ударе–толщина покрытия». Полученная обратная зависимость подтвердила, что основным фактором отклонения результатов в диапазоне значений 1,0–4,0 Дж является неконтролируемая толщина при ручном нанесении шпатлевочного слоя.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ».

Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 64–67.
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. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Судьин Ю.И., Мишунин Н.Н. Материалы, технологии и оборудование разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для проведения ремонта изделий из полимерных композиционных материалов различного назначения // Аэрокосмическая техника и технологии. 2025. Т. 3. № 1. С. 82–96.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
6. Пегов И.Л. Сравнительный анализ современных лакокрасочных материалов // Вестник НГИЭИ. 2014. № 10. С. 98–103.
7. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.

8. Семенова Л.В., Каримова С.А., Полякова А.В. Современные комплексные системы защиты конструкций из металлических, полимерных композиционных материалов и их соединений // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2014. № 3. Ст. 02. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 16.07.2025).
9. Андрюшкин А.Ю., Ведерников А.Ю., Хмелевской Н.Ю. Технологические особенности нанесения лакокрасочных покрытий на внешние поверхности самолетов и вертолетов // *Аэрокосмическая техника и технологии*. 2023. Т. 1. № 4. С. 103–115.
10. Кучеренко Е.В., Щербаков А.С., Арзамасцев С.В. Композиционные материалы на основе полиэфирной смолы // *Современные инновации*. 2016. № 3 (5). С. 5–7.
11. Шмойлов Е.Е., Федотов М.Ю., Шарутин И.А. и др. Полимерные композиты для внешнего армирования строительных конструкций // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Vol. 20 (1). Р. 21–34.
12. Брок Т. Ненасыщенные полиэфирные смолы // *Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям*. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. С. 73–78.
13. Марченко С.А., Скирко П.В. Влияние температуры на время высыхания и жизнеспособность шпатлевки на основе эпоксидвинилэфирной смолы // *Труды ВИАМ*. 2024. № 10 (140). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93.
14. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-388-392.
15. Железняк В.Г., Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Скирко 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: 16.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
16. Зубарев П.А., Лахно А.В. Износостойкие полиуретановые покрытия // *Молодой ученый*. 2014. № 20. С. 143–146.
17. Козлова А.А., Кондрашов Э.К. Влияние молекулярной массы и элементного состава изоцианатов на свойства фторполиуретановых эмалей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
18. 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, акриуретановых и фторполиуретановых эмалей // *Труды ВИАМ*. 2023. № 10 (128). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131.
19. Кочеткова Г.В., Логинов Б.А. Новые марки отечественных фторкаучуков // *Российский химический журнал*. 2008. Т. LII. № 3. С. 23–25.
20. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

References

1. Kablov E.N. Aviation Materials Science: Results and Prospects. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
2. Kablov E.N. Structural and Functional Materials – the Basis of Economic and Scientific-Technical Development of Russia. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1, pp. 64–67.
3. Kablov E.N. Aviation Materials Science in the 21st Century. Prospects and Tasks. *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISiS–VIAM, 2002, pp. 23–47.
4. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Sudyin Yu.I., Mishunin N.N. Materials, technologies and equipment developed by the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM for repairing products made of polymer composite materials for various purposes. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2025, vol. 3, no. 1, pp. 82–96.
5. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovations, technological leadership and national security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.

6. Pegov I.L. Comparative analysis of modern paints and varnishes. *Vestnik NGIEI*, 2014, no. 10, pp. 98–103.
7. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
8. Semenova L.V., Karimova S.A., Polyakova A.V. Modern integrated protection systems for structures made of metal, polymer composite materials and their compounds. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2014, no. 3, paper no. 02. Available at: <http://materialsnews.ru> (accessed: July 16, 2025).
9. Andryushkin A.Yu., Vedernikov A.Yu., Khmelevskoy N.Yu. Technological features of applying paint and varnish coatings to the external surfaces of aircraft and helicopters. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tehnologii*, 2023, vol. 1, no. 4, pp. 103–115.
10. Kucherenko E.V., Shcherbakov A.S., Arzamashev S.V. Composite materials based on polyester resin. *Sovremennye innovatsii*, 2016, no. 3 (5), pp. 5–7.
11. Shmoilov E.E., Fedotov M.Yu., Sharutin I.A. et al. Polymer composites for external reinforcement of building structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20 (1), pp. 21–34.
12. Brock T. Unsaturated polyesters. *European Guide to Paints and Coatings*. Moscow: Paint-Media, 2007, pp. 73–78.
13. Marchenko S.A., Skivko P.V. Effect of temperature on drying time and viability of epoxyvinyl ether resin putty. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-84-93.
14. 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.
15. 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: July 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
16. Zubarev P.A., Lakhno A.V. Wear-resistant polyurethane coatings. *Molodoy ucheny*, 2014, no. 20, pp. 143–146.
17. 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), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
18. 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> (accessed: July 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-119-131.
19. Kochetkova G.V., Loginov B.A. New brands of domestic fluororubbers. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 23–25.
20. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

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

Скирко Полина Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

Polina V. Skivko, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 07.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.08.2025.
The article was submitted 07.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.08.2025.

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-149-160

КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ*

Часть 5. Влияние продолжительности эрозионного воздействия

В.О. Старцев¹

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

Аннотация. Исследованы особенности изменения цветowych показателей модели CIE $L^*a^*b^*$ при воздействии песка и пыли на системы лакокрасочных покрытий в лабораторных условиях. Показано, что для различных систем лакокрасочных покрытий с добавлением пигментов красного и серого цвета зависимости изменения светлоты L и хроматических показателей a , b существенно различаются. Для всех исследованных систем количественно охарактеризован вклад показателей L , a , b в изменение цветового расстояния.

Ключевые слова: климатическое старение, лакокрасочное покрытие, цветовой расcстояние, эрозия, математическое моделирование, прогнозирование

Для цитирования: Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 5. Влияние продолжительности эрозионного воздействия // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-149-160.

Scientific article

CLIMATIC AGING OF PAINT COATING SYSTEMS

Part 5. Influence of duration of erosion effect

V.O. Startsev¹

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

Abstract. In the fifth part of the series of articles on the climatic aging of paint coating systems, the features of the change in the color indices of the CIE $L^*a^*b^*$ model under the influence of sand and dust in laboratory conditions are studied. It is shown that for different paint coating systems with the addition of red and gray pigments, the dependences of the change in lightness and chromatic indices differ significantly. For all the studied systems, the contribution of the L , a , b indices to the change in color distance is quantitatively characterized.

Keywords: climatic aging, paint coating, color distance, erosion, mathematical modeling, forecasting

For citation: Startsev V.O. Climatic aging of paint coating systems. Part 5. Influence of duration of erosion effect. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-149-160.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (148), 2025; часть 3 – см. «Труды ВИАМ», № 7 (149), 2025; часть 4 – см. «Труды ВИАМ», № 8 (150), 2025.

Введение

Лакокрасочные покрытия (ЛКП) авиационного назначения, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, способны длительное время сохранять свои декоративные показатели, защищать поверхность сплавов и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждений [1–3]. При эксплуатации ЛКП подвергаются деградации из-за воздействия таких факторов, как солнечное излучение, температура и термоциклы, влага, химически активные аэрозоли, абразивные частицы, что приводит к изменению механических и химических свойств. Эти изменения могут проявляться в виде растрескивания, обесцвечивания, охрупчивания и снижения адгезии. Понимание механизмов старения и разработка эффективных стратегий борьбы с ним имеют решающее значение для повышения прочности и срока службы авиационных полимерных покрытий.

Достоверные сведения о состоянии ЛКП в открытых климатических условиях получают с помощью колориметрических исследований, измеряя полное цветовое состояние ΔE в равноконтрастной системе CIE $L^*a^*b^*$ по ГОСТ Р 71216–2024 [4]. Особенно эффективны исследования, в которых изучают изменения не только полного цветового различия, но и его составляющих: светлоты L и хроматических показателей a , b . Анализируя кинетику изменения этих показателей, можно получить заключения о влиянии химического состава полимерной основы, наличия стабилизаторов, пластификаторов, концентрации и природы пигментов на стойкость покрытий к старению [5].

Ценность современных авиационных ЛКП определяется не только способностью противостоять агрессивным климатическим факторам, но и абразивной (эрозионной) стойкостью. В обзорной статье [6] рассмотрены различные типы абразивных покрытий, механизмы их износа, рекомендации по повышению стойкости и методам контроля.

Авторы работы [7] изучили влияние эрозии под действием песчаных частиц на материал лопасти вертолета, защищенный полиуретановым покрытием. Сопротивление эрозии и механизм разрушения полиуретановой пленки при различных углах удара проанализированы с помощью инфракрасного термометра, инфракрасного спектрометра с преобразованием Фурье, дифференциального сканирующего калориметра, сканирующего электронного микроскопа с полевой эмиссией и лазерного конфокального микроскопа. Показано, что прямой метод измерения потери объема может лучше охарактеризовать сопротивление эрозии полиуретановой пленки по сравнению с традиционными методами определения потери массы, что позволяет избежать влияния частиц песка, вкрапленных в полиуретановую пленку. Сопротивление эрозии полиуретановой пленки снижается при уменьшении угла удара. Потеря объема в результате эрозии в течение 15 мин при скорости удара 220 м/с и угле удара 30 градусов составляет 57,8 мм³, а при 90 градусах не превышает 2,6 мм³. При малом угле удара повреждение пленки происходило из-за песчаной резки, вызывающей образование складок и накопление поверхностных дефектов, быстрое увеличение шероховатости и образование длинных трещин. При большом угле повреждения покрытия вызваны ударами частиц. При этом изменение шероховатости пленки не столь значительно, как при малом угле.

Эрозионный механизм разрушения ЛКП, заключающийся в растрескивании полимерной основы вследствие резания и ударов песка, учтен при модификации полиуретанового покрытия наночастицами лигнина [8]. Для этого приготовленные покрытия наносили на поверхности из древесины и подвергали искусственному выветриванию. Определяли цвет и блеск покрытий до и после испытания на выветривание. Микрофотографии покрытий, полученные с помощью полевой эмиссионной сканирующей

электронной микроскопии, показали, что средний размер наночастиц в полиуретановой подложке составлял ~500 нм. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса подтвердила, что в полиуретане на основе нанолигнина образовались прочные уретановые связи. Методом дифференциального калориметрического анализа установлено, что температура стеклования полиуретановой пленки, модифицированной диэтилентриамином, составила 113 °С, а при наличии частиц лигнина повысилась до 127 °С. Блеск покрытий, модифицированных наночастицами лигнина, изменялся в большей степени. Наночастицы лигнина в модифицированном покрытии захватывают гидроксильные радикалы, что снижает фотоактивность и пожелтение полиуретана в ~3 раза по сравнению с немодифицированными полиуретановыми покрытиями. После испытания на атмосферостойкость покрытие на основе нанолигнина имело более шероховатую поверхность.

В аналогичной работе [9] представлены результаты исследования кинетики эрозионного износа эпоксидно-полиуретановых покрытий, модифицированных наночастицами оксида алюминия или кремния, при экспонировании в климатических условиях в течение 3 лет. Разрушение поверхностных слоев покрытия вследствие естественного выветривания привело к снижению эрозионной износостойкости. Модификация состава полиуретанового (поверхностного) слоя нанонаполнителем обеспечила значительное повышение эрозионной стойкости. Эпоксидно-полиуретановые покрытия с поверхностным слоем, модифицированным нанокремнием, показали самую высокую эрозионную износостойкость по сравнению со всеми исследованными покрытиями.

Перспективы наномодифицирования авиационных ЛКП для повышения их стойкости к коррозии и старению рассмотрены в обзоре [10], сведения о полиуретановых покрытиях с повышенной износостойкостью приведены в работе [11].

Механизмы абразивной эрозии для полимеров, включая полиуретан, стирол-бутадиеновый каучук, полиамид-6 и политетрафторэтилен, исследованы в работе [12]. По результатам исследования истертых поверхностей образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии выявлен следующий механизм абразивной эрозии: микрорежущее действие абразивов с определенной кинетической энергией, микрорасслоение поверхностного слоя материалов в результате зарождения и распространения микротрещин, механохимическое и термическое разложение материалов, отслаивание поверхности в результате пластического разрушения, усиленного за счет локальной пластической деформации. Изучено влияние этих факторов на скорость износа при абразивной эрозии, представлены соответствующие уравнения.

В работе [13] изучены механизмы и стойкость эрозионного износа реальных автомобильных ЛКП до и после ускоренного выветривания. Стальные панели подложки с выбранными покрытиями подвергали деградации под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения и искусственного кислотного дождя. Химические изменения проанализированы с помощью инфракрасной спектроскопии. Затем проведены эрозионные испытания с использованием частиц кварцевого песка при различных углах падения (30 и 90 градусов) и температурах (25 и 60 °С) для исходных и экспонированных образцов. Скорость эрозии определяли путем оценки потери массы с использованием аналитических весов, механизмы износа подробно проанализированы с помощью интроскопии. Результаты показали снижение сопротивления эрозии, вызванное химическими изменениями в образцах, подвергшихся обоим видам воздействия.

По данным работы [14], в состав ЛКП, используемых для защиты от коррозии, включают различные типы пигментов как для эстетики, так и для повышения эксплуатационной стойкости. Авторы показали, что тип пигмента оказывает фундаментальное влияние как на локализованные, так и на глобальные процессы деградации в исследованных

покрытиях. Образцы с белым пигментом TiO_2 имели несущественную химическую деградацию, но значительное изменение поверхности. Микроскопия выявила, что вокруг частиц пигмента TiO_2 образуются кратеры размером несколько микрометров. Эта локальная эрозия не вызвана реакциями, наблюдаемыми в покрытиях с другими типами пигментов. Однако инфракрасная спектроскопия подтвердила, что пигмент TiO_2 также защищает материал под покрытием, что вызывает менее глубокую химическую деградацию по сравнению с другими системами. Более темные покрытия, содержащие технический углерод, продемонстрировали умеренную или сильную химическую деградацию по всей поверхности, кроме того, деградация распространилась глубоко в покрытие.

Можно ожидать, что абразивы существенно влияют на цветовые показатели ЛКП, вызывая изменение шероховатости поверхности, удаление материала и потенциально варьируя оптические свойства покрытия. Степень изменения цвета должна зависеть от свойств абразива (например, размера, твердости), состава и толщины полимерного покрытия, а также приложенной нагрузки и продолжительности воздействия.

Твердые частицы должны существенно влиять на цвет органических покрытий, воздействуя на процессы рассеивания и поглощения света, что является причиной изменения внешнего вида. Осколки частиц могут вызвать загрязнение, делая покрытие более темным или тусклым. Кроме того, химические реакции между частицами и покрытием могут привести к изменению цвета, например потемнению.

Когда ЛКП подвергаются воздействию песка, то вероятны следующие превращения:

- потеря блеска и прозрачности, возникновение шероховатости. Это может рассеивать свет, делая покрытие менее глянцевым, более мутным или белесым;
- загрязнение (частицы песка могут внедряться в поверхность ЛКП, потенциально внося загрязняющие вещества или влагу). Это может привести к обесцвечиванию или появлению пятен с течением времени, особенно если покрытие подвергается воздействию других веществ;
- химические реакции между ЛКП и песком (или веществами, переносимыми песком), вызывающие изменение цвета. Их протекание более вероятно, если песок нечистый или покрытие подвергается воздействию агрессивных химикатов;
- УФ-деградация (если ЛКП подвергается воздействию солнечного света после воздействия потока частиц, УФ-излучение может ускорить пожелтение, особенно в прозрачных покрытиях);
- общий износ (повторное воздействие абразивных материалов, таких как песок, может способствовать общей деградации ЛКП, привести к изменению цвета и другим повреждениям поверхности).

К сожалению, перечисленные эрозионные эффекты при климатических воздействиях изучены недостаточно [15–22]. В предыдущей части данной работы [23] установлено, что наибольшие изменения цветового расстояния фторполиуретанового и эпоксидного покрытий происходят после эрозионного воздействия. Поэтому целью пятой части комплексного исследования является углубленный количественный анализ влияния эрозии на кинетику изменения цветового расстояния ΔE и его составляющих (светлоты L и хроматических показателей a , b).

Материалы и методы

Для испытаний использовали четыре группы образцов из алюминиевого деформируемого сплава с нанесенными системами ЛКП, состоящими из двух грунтовых слоев холодной и горячей сушки, а также фторполиуретанового (ВЭ-69) и эпоксидного

(ЭП-140) покрытия с добавлением пигментов красного и серого цвета. Подробная информация об объектах испытаний приведена в предыдущей части статьи [24].

Для проведения лабораторных испытаний, имитирующих воздействие пыли, использовали камеру статической и динамической пыли. Исследование воздействия пыли проводили при скорости обдува образцов 15 м/с, температуре пылевоздушной смеси 30 °С, концентрации пыли в пылевоздушной смеси 5 г/м³. Пылевая смесь имела следующий состав, % (по массе): 70 – кварцевый песок, 15 – мел, 15 – каолин. Размер частиц не превышал 200 мкм (перед началом испытаний компоненты пылевой смеси просеивали через сито с соответствующим размером ячейки). Концентрацию пыли в рабочем объеме камеры контролировали каждые 2 ч путем фильтрации запыленного воздуха с последующим определением изменения массы фильтра. Образцы во время испытаний располагали вертикально, перпендикулярно потоку пылевоздушной смеси. Образцы размещали на сетчатой полке, обеспечивающей свободное прохождение потока запыленного воздуха через рабочий объем испытательной камеры. Продолжительность испытаний составила 56 ч.

При проведении испытаний на воздействие песка и пыли цветовые показатели измеряли каждые 4 ч после тщательного промывания поверхности образцов с помощью мягкой ткани.

С помощью спектрофотометра со сферической геометрией измерения определяли значения светлоты L и хроматических показателей a , b систем ЛКП на экспонируемых образцах, рассчитывали значение полного цветового различия (цветового расстояния) ΔE в системе CIE $L^*a^*b^*$ [25, 26] по соотношению [27]

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}, \quad (1)$$

где L , a , b – значения в процессе испытаний; L_0 , a_0 , b_0 – начальные значения.

Получено 15 экспериментальных значений.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 показано изменение показателей L , a , b для всех исследованных систем ЛКП. Отмечено, что изменение цветового расстояния после воздействия песка и пыли в данном исследовании на 11–16 % меньше, чем в предыдущем [23], что объясняется различными способами подготовки поверхности образцов перед проведением измерения с помощью спектрофотометра. В исследовании [23] образцы промывали перед проведением испытаний, в данной работе образцы после тщательной промывки дополнительно протирали мягкой тканью, чтобы удалить остатки песка и пыли с поверхности. Кроме того, наблюдается нелинейный характер изменения цветового расстояния: для системы на основе эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета экспериментальная зависимость аппроксимируется полиномом 3-й степени ($R^2 > 0,99$), для остальных исследованных систем – полиномом 2-й степени ($R^2 > 0,99$). Увеличение степени полинома не повышает значение коэффициента детерминации.

Изменение цветового расстояния системы ЛКП на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета (рис. 1, II) составляет 15,78 усл. ед. Основной вклад вносят изменения хроматических показателей (97,7 %), при этом на долю показателя a (изменение цвета в диапазоне от зеленого до красного) приходится 75,5 %. Вклад

изменения светлоты в изменение цветового расстояния не превышает 2,3 %. Изменение светлоты L имеет линейный характер, а изменение показателей a , b – нелинейный (данные аппроксимируются полиномом 2-й степени ($R^2 > 0,99$)).

Для покрытия на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигмента серого цвета (рис. 1, IV) изменение цветового расстояния составляет 10,02 усл. ед. Однако характер изменения показателей L , a , b и их вклад в изменение цветового расстояния для систем с красным и серым пигментом существенно различаются.

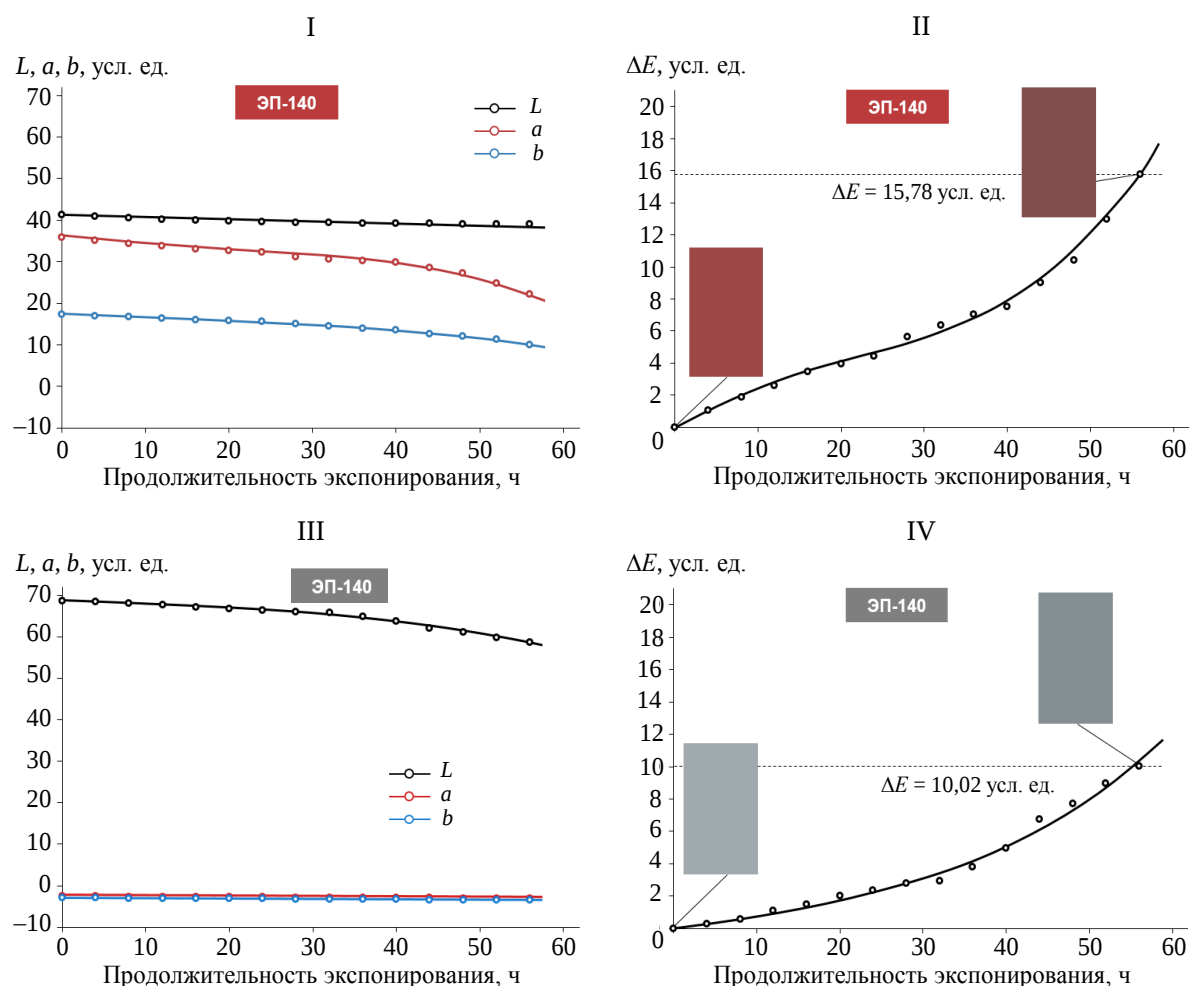


Рис. 1. Изменение светлоты L и хроматических показателей a , b (I, III), цветового расстояния ΔE и визуального отображения изменения цвета (II, IV) образцов с системой лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с добавлением пигмента красного (I, II) и серого (III, IV) цвета при воздействии песка и пыли

Изменение хроматических показателей a , b линейно, не превышает 0,63 усл. ед., а их вклад в изменение цветового расстояния < 1 %. Основной вклад в изменение цветового расстояния вносит изменение светлоты L (99,3 %), которая изменяется нелинейно (аппроксимация полиномом 2-й степени ($R^2 > 0,99$)).

Для системы на основе эмали ВЭ-69 наблюдаются аналогичные различия при добавлении пигментов разных цветов. При добавлении пигмента красного цвета основной вклад в изменение ΔE вносят хроматические показатели a , b (94 %), а при добавлении пигмента серого цвета – светлота L (99,3 %).

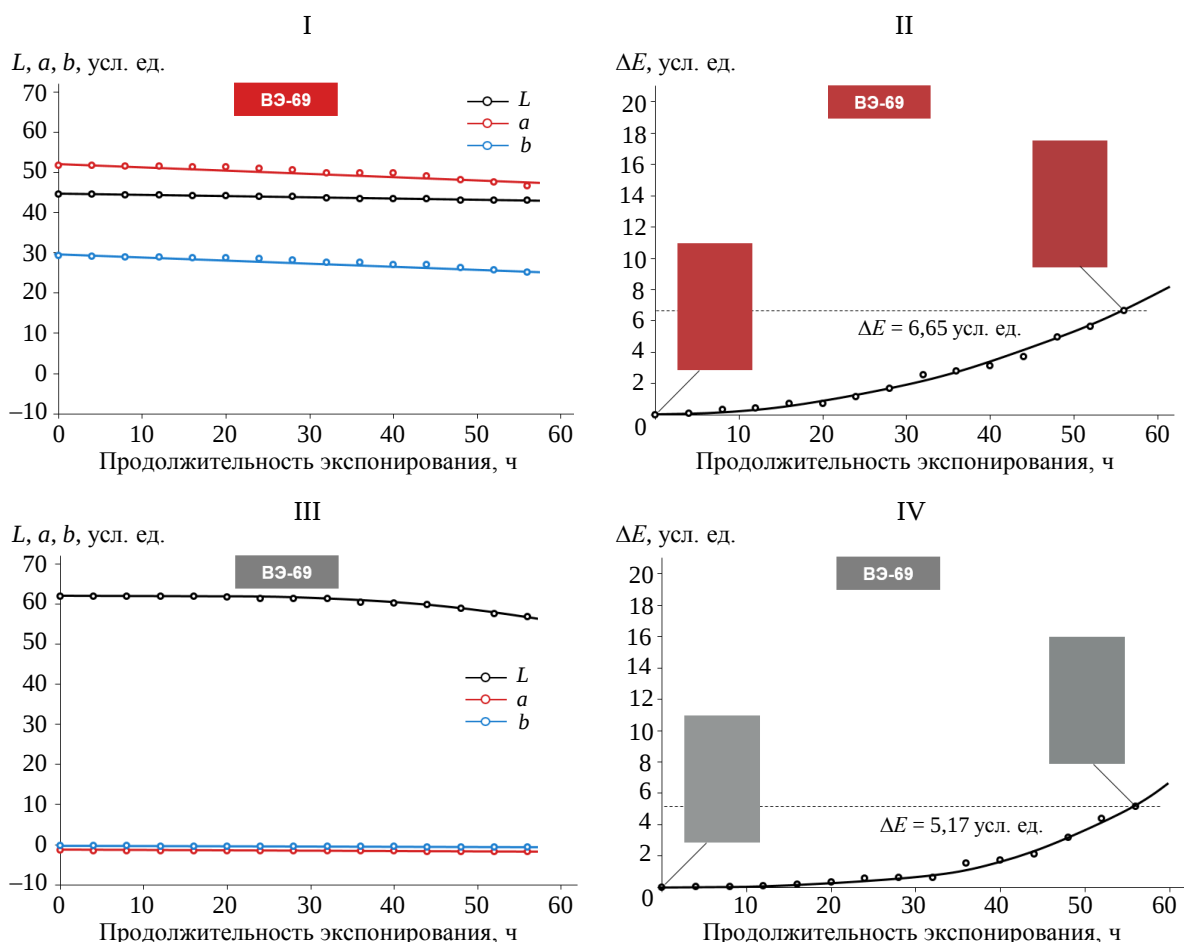


Рис. 2. Изменение светлоты L и хроматических показателей a, b (I, III), цветового расстояния ΔE и визуального отображения изменения цвета (II, IV) образцов с системой лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ВЭ-69 с добавлением пигмента красного (I, II) и серого (III, IV) цвета при воздействии песка и пыли

При добавлении красного пигмента изменение показателей L, a, b этой системы ЛКП носит линейный характер, а при добавлении серого пигмента – аналогично изменениям в системе на основе эмали ЭП-140: линейный характер изменения показателей a и b , нелинейный – показателя L . Значения показателей L, a, b и их вклад в изменение цветового расстояния для всех исследованных систем приведены в таблице.

Аналитические подходы, представленные в работах [28, 29], позволяют выявлять сущность физико-химических превращений и значимость факторов внешней среды в условиях различных климатических зон [30, 31]. Полученные в данной работе результаты демонстрируют чувствительность к эрозионному воздействию цветового расстояния ΔE и его составляющих: светлоты L и хроматических показателей a, b . Открывается перспектива количественного анализа влияния режимов эрозии, рецептуры покрытия, природы пигментов на разных этапах реальной работы ЛКП, защищающих элементы внешнего контура самолетов и вертолетов.

Очевидна также необходимость дальнейшего развития пробоотбора в практической колориметрии. Единообразная и обоснованная подготовка поверхности ЛКП может существенно снизить влияние влаги, загрязнений, проникших эрозионных частиц на результаты спектрофотометрических измерений и повысить достоверность полученных показателей.

Изменение светлоты L и хроматических показателей a , b
исследованных систем при эрозионном воздействии

Показатель	Значение показателей для эмали			
	ЭП-140		ВЭ-69	
	красной	серой	красной	серой
L , усл. ед.	<u>41,36</u> 38,98	<u>68,71</u> 58,73	<u>44,59</u> 42,96	<u>61,92</u> 56,77
ΔL^* , усл. ед.	2,38	9,98	1,63	5,15
a , усл. ед.	<u>35,93</u> 22,22	<u>-2,57</u> -3,16	<u>51,68</u> 46,67	<u>-1,49</u> -1,78
Δa^* , усл. ед.	13,71	0,59	5,01	0,29
b , усл. ед.	<u>17,36</u> 9,92	<u>-2,91</u> -3,54	<u>29,21</u> 25,15	<u>-0,31</u> -0,66
Δb^* , усл. ед.	7,44	0,63	4,06	0,35
Цветовое расстояние ΔE , усл. ед.	15,78	10,02	6,65	5,17
Вклад в изменение ΔE^{**} , %, изменения показателя:				
L	2,3	99,3	6,0	99,3
a	75,5	0,3	56,7	0,3
b	22,2	0,4	37,3	0,4

* Абсолютное значение изменения показателя.

** Процентное отношение относительно суммы квадратов различий показателей L , a , b в соотношении (1).

Примечание. В числителе и знаменателе указаны значения показателей до и после эрозионного воздействия соответственно.

Например, при дальнейшем развитии методик исследований изменения цветowych показателей систем ЛКП дополнительно следует учитывать обнаруженный эффект «естественного старения», который заключается в следующем.

Перед началом исследований часть подготовленных образцов после измерения исходных параметров L , a , b плотно оборачивали непрозрачным упаковочным материалом и хранили в темном месте в нормальных условиях (температура 23 ± 2 °С, относительная влажность 50 ± 10 %). Через 36 мес. хранения измерены параметры L , a , b и рассчитано значение цветового расстояния. Выявлено, что при отсутствии прямых воздействий цветовое расстояние исследованных систем покрытий изменяется, причем вклад показателей L , a , b также различается для разных систем и пигментов (рис. 3).

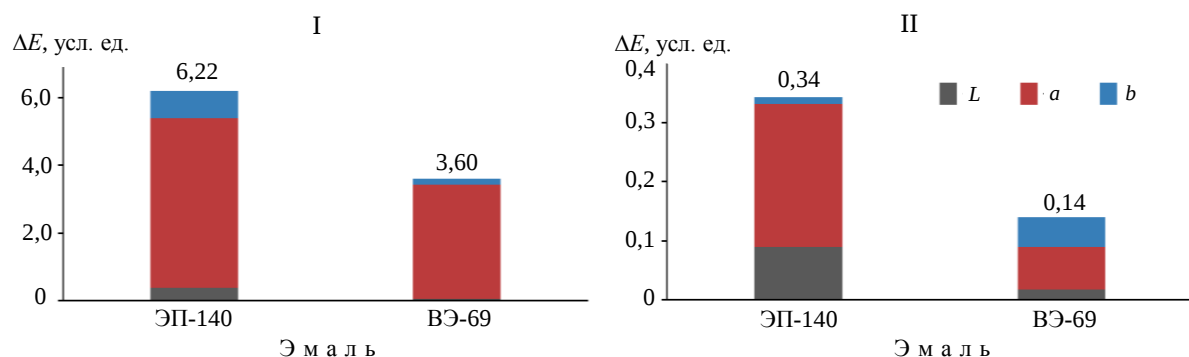


Рис. 3. Изменение цветового расстояния ΔE и вклад светлоты L , хроматических показателей a , b для систем лакокрасочных покрытий на основе эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 с добавлением пигмента красного (I) и серого (II) цвета

Видно, что для систем покрытий с добавлением пигмента красного цвета эффект «естественного старения» существенный – значения цветового расстояния составляют 6,22 и 3,60 усл. ед. для систем покрытий на основе эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 соответственно. Изменения цвета этих систем наблюдаются невооруженным глазом. При добавлении пигмента серого цвета изменения цветового расстояния незначительны: 0,34 и 0,14 усл. ед. для систем на основе эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 соответственно. Важно отметить, что основной вклад в изменение цветового расстояния (при нормировании на сумму квадратов различий в выражении (1)) при «естественном старении» вносит изменение хроматических показателей a , b : 94–98 и 75–87 % для систем покрытий с пигментом красного и серого цвета соответственно.

Заключения

Полученные результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

При эрозионном воздействии на образцы с системами ЛКП изменение показателей L , a , b неравнозначно и может иметь линейный или нелинейный характер в зависимости от типа эмали и цвета пигмента.

Для систем ЛКП с пигментом красного цвета основной вклад в изменение цветового расстояния вносит изменение хроматических показателей a , b (94,0–97,7 %), а для систем с пигментом серого цвета – изменение светлоты L (99,3 %).

Обнаруженный эффект «естественного старения» необходимо учитывать при разработке программ исследования климатического старения систем ЛКП.

Список источников

1. 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.
2. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
3. 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: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
4. 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). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.
5. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2015. № 3. С. 16–18.
6. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review // Lubricants. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 66–89.
7. Zheng L., Fan J., Gong Q. et al. Sand Erosion Resistance and Failure Mechanism of Polyurethane Film on Helicopter Rotor Blades // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 22. P. 4386.
8. Khorshidi F.H., Najafi S.K., Najafi F. et al. Color and Gloss Changes of a Lignin-Based Polyurethane Coating under Accelerated Weathering // Journal of Renewable Materials. 2023. Vol. 12. No. 2. P. 1–10.
9. Kotnarowska D., Przerwa M., Szumiata T. Resistance to Erosive Wear of Epoxy-Polyurethane Coating Modified With Nanofillers // Journal of Materials Science Research. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 52–58.

10. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36. No. 4. P. 1–35.
11. 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: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Zhang S.W., Deguo W., Weihua Y. Investigation of abrasive erosion of polymers // Journal of Materials Science. 1995. Vol. 30. No. 18. P. 4561–4566.
13. Hernández-Peña A., Gallardo-Hernández E.A., Farfan-Cabrera L.I. et al. Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering // Wear. 2023. Vol. 532–533. Art. 205105.
14. Wärmheim A., Saarimaa V., Heydari G. et al. Multiscale analysis of pigment effects on weathering of polyester coatings: from nanoscale chemistry to macroscale performance // Materials Degradation. 2025. Vol. 9. No. 1. Art. 66.
15. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
16. Cai G., Zhang D., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part II: Molecular structures and depth profile // Progress in Organic Coatings. 2018. Vol. 124. P. 25–32.
17. Molina M.T., Cano E., Ramírez-Barat B. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method // Heritage Science. 2023. Vol. 11. No. 1. Art. 94.
18. Chen J., Li B., Zeng X. et al. Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-Pollution Flashover Coating // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 3. Art. 751.
19. Pánek M., Reinprecht L. Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest // Journal of Coatings Technology and Research. 2019. Vol. 16. No. 2. P. 339–352.
20. 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: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
21. Dao P.H., Nguyen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment // Vietnam Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 56. No. 3B. Art. 126.
22. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 4. Art. 476.
23. Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 4. Аддитивность воздействия климатических факторов // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 13. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-8-152-162.
24. Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 3. Сопоставление результатов натуральных и ускоренных испытаний с учетом эффекта сезонности // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-7-105-118.
25. Fairchild M.D. Color Appearance Models. Wiley, 2013. 480 p.
26. Schanda J. Colorimetry: Understanding the CIE System. Wiley, 2007. 398 p.
27. Ibraheem N.A., Hasan M.M., Khan R.Z., Mishra P.K. Understanding Color Models : A Review // ARPN Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 265–275.
28. Исупов В.В., Старцев О.В. Численные методы в динамической механической спектроскопии полимеров // Тез. докл. Междунар. конф. «Математические модели и численные методы механики сплошных сред», посвященной 75-летию выдающегося математика и механика, организатора науки, академика Николая Николаевича Яненко / под ред. Ю.И. Шокина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. С. 293–294.

29. Старцев О.В., Перепечко И.И. Молекулярная подвижность и релаксационные процессы в эпоксидной матрице композита. 1. Влияние типа армирующего наполнителя // *Механика композитных материалов*. 1984. № 3. С. 387–391.
30. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // *Тр. VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013*. Якутск, 2013. С. 5–7.
31. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // *Известия Алтайского государственного университета*. 2020. № 1 (111). С. 41–51.

References

1. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex systems of paint and varnish coatings 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.
2. Nefedov N.I., Semenova L.V., Kuznecova V.A., Vereninova N.P. Paint coatings for protection of metallic and polymer composite materials against aging, corrosion and biodeterioration. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
3. 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: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
4. 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), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 08, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.
5. Startsev V.O., Frolov A.S. Influence of climatic influence on color characteristics of paint and varnish coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
6. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. *Lubricants*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 66–89.
7. Zheng L., Fan J., Gong Q. et al. Sand Erosion Resistance and Failure Mechanism of Polyurethane Film on Helicopter Rotor Blades. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 22, p. 4386.
8. Khorshidi F.H., Najafi S.K., Najafi F. et al. Color and Gloss Changes of a Lignin-Based Polyurethane Coating under Accelerated Weathering. *Journal of Renewable Materials*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 1–10.
9. Kotnarowska D., Przerwa M., Szumiata T. Resistance to Erosive Wear of Epoxy-Polyurethane Coating Modified With Nanofillers. *Journal of Materials Science Research*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 52–58.
10. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 1–35.
11. 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: July 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Zhang S.W., Deguo W., Weihua Y. Investigation of abrasive erosion of polymers. *Journal of Materials Science*, 1995, vol. 30, no. 18, pp. 4561–4566.
13. Hernández-Peña A., Gallardo-Hernández E.A., Farfan-Cabrera L.I. et al. Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering. *Wear*, 2023, vol. 532–533, art. 205105.
14. Wärmheim A., Saarimaa V., Heydari G. et al. Multiscale analysis of pigment effects on weathering of polyester coatings: from nanoscale chemistry to macroscale performance. *Materials Degradation*, 2025, vol. 9, no. 1, art. 66.

15. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
16. Cai G., Zhang D., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part II: Molecular structures and depth profile. *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 124, pp. 25–32.
17. Molina M.T., Cano E., Ramírez-Barat B. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method. *Heritage Science*, 2023, vol. 11, no. 1, art. 94.
18. Chen J., Li B., Zeng X. et al. Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-Pollution Flashover Coating. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 3, art. 751.
19. Pánek M., Reinprecht L. Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 339–352.
20. 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: July 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
21. Dao P.H., Nguyen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 56, no. 3B, art. 126.
22. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 476.
23. Startsev V.O. Climatic aging of paint coating systems. Part 4. Additivity of the impact of climate factors. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 13. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-8-152-162.
24. Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 3. Comparison of results of natural and accelerated climatic tests taking into account the effect of seasonality. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-7-105-118.
25. Fairchild M.D. *Color Appearance Models*. Wiley, 2013, 480 p.
26. Schanda J. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007, 398 p.
27. Ibraheem N.A., Hasan M.M., Khan R.Z., Mishra P.K. Understanding Color Models : A Review. *ARPJ Journal of Science and Technology*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 265–275.
28. Isupov V.V., Startsev O.V. Numerical methods in dynamic mechanical spectroscopy of polymers. Abstract of reports. *Int. Conf. «Mathematical models and numerical methods of continuous media mechanics» dedicated to the 75th anniversary of the outstanding mathematician and mechanic, organizer of science, academician Nikolai Nikolaevich Yanenko*. Ed. Yu.I. Shokin. Novosibirsk: Publ. house of the SB of RAS, 1996, pp. 293–294.
29. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation processes in the epoxy matrix of the composite. 1. Effect of the type of reinforcing filler. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1984, no. 3, pp. 387–391.
30. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic tests of materials, structural elements, machinery and equipment in conditions of extremely low temperatures. *Proc. of the VI Eurasian Symposium on the Problems of Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD–2013*. Yakutsk, 2013, pp. 5–7.
31. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composite materials in conditions of extremely cold climate. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (111), pp. 41–51.

Информация об авторах

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.08.2025.
The article was submitted 24.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.08.2025.

ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ

1. Рукопись предоставляется в Редакционно-издательский отдел НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на бумажном и электронном носителях (программное обеспечение не ниже Windows'2003).

2. На рукопись должно быть оформлено Экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

3. Рукопись должна быть подписана всеми авторами статьи.

4. К каждой рукописи на отдельной странице на русском и английском языках предоставляется реферат (объемом 500–600 знаков, включая пробелы), в котором кратко излагается основное содержание работы, и ключевые слова.

5. Фамилии авторов и название статьи должны иметь перевод на английский язык.

6. К рукописи должен быть приложен список авторов с указанием фамилии, имени, отчества (полностью), должности, номера телефона и адреса электронной почты.

7. Рекомендуются следующая структура рукописи:

- заголовок статьи;
- сведения об авторах;
- реферат;
- ключевые слова;
- введение;
- материалы и методы;
- результаты;
- обсуждение и заключения;
- благодарности (при необходимости);
- список литературы.

8. Рекомендуемый объем рукописи от – 15 000 до 30 000 знаков, включая пробелы.

9. Основные технические параметры рукописи:

- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 12;
- интервал – 1,5;
- поля: верхнее – 2; нижнее – 2,5; левое – 2,5; правое – 2,5;
- автоматическая расстановка переносов;
- набор формул в Microsoft Equation 3.0;
- штриховые рисунки должны быть выполнены в программе Microsoft Power Point или Microsoft Excel. На каждый рисунок должна быть ссылка в тексте;
- микроструктуры, фотографии приборов, оборудования должны быть представлены в электронном виде в программе Photoshop JPEG;
- размер иллюстраций не должен превышать формат А4;
- таблицы должны быть выполнены в программе Microsoft Word, пронумерованы и иметь тематические заголовки. На каждую таблицу должна быть ссылка в тексте;
- единицы измерения физических величин должны быть приведены в системе СИ.

10. Форма подачи рукописи:

- текст на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом;
- пронумерованные рисунки на бумажном носителе и в электронном виде отдельными файлами;
- пронумерованные подписи к рисункам на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом.

11. Список литературы, завершающий рукопись, должен быть тщательно выверен и унифицирован в соответствии с ГОСТ 7.0.5–2008.

Список литературы должен включать не менее 15 источников.

Последовательность ссылок в тексте должна строго соответствовать последовательности приведенного списка литературы.

Ссылки на неопубликованные работы (отчеты научно-исследовательских учреждений и заводов, стандарты предприятия и т. п.) не допускаются.

Допускается не более одной ссылки на работы, принятые к печати, с указанием номера издания, в котором планируется публикация.

Соблюдение данных правил облегчает работу научного редактора, рецензента и редактора, ускоряет подготовку статьи к печати.

По рекомендации научного редактора или рецензента статья может быть направлена авторам на доработку. После доработки авторы должны представить в редакцию первоначальный и доработанный варианты статьи с ответами на все вопросы и замечания научного редактора или рецензента.

Статья, находящаяся на доработке у авторов более одного месяца, рассматривается и принимается к публикации как вновь поступившая.

ТРУДЫ ВИАМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09
E-mail: admin@viam.ru
www.ВИАМ.РФ; www.viam.ru