

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-133-144

СТОЙКОСТЬ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАЗОАБРАЗИВНОЙ И ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ ЭРОЗИИ

В.А. Кузнецова¹, С.А. Марченко¹, В.Г. Железняк¹, Н.А. Коврижкина¹

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

Аннотация. Проанализированы результаты испытаний на устойчивость к газоабразивной эрозии систем лакокрасочных покрытий на основе эрозионностойкой дисперсно-армированной эмали ЭП-5236 на алюминиевом сплаве Д16-Т Ан.Окс.нхр и стеклопластике ВПС-20 при углах соударения 90 и 15 градусов. Стойкость покрытий оценивали по изменению массы образцов. Исследована стойкость лакокрасочных покрытий к газокapельной эрозии на сплаве Д16-Т Ан.Окс.нхр и стеклопластике ВПС-20. Показано, что применение эрозионностойкой системы лакокрасочных покрытий на основе дисперсно-армированного покрытия ЭП-5236 повышает стойкость к газоабразивной и газокapельной эрозии.

Ключевые слова: газоабразивная эрозия, газокapельная эрозия, глубина эрозии, адгезионная прочность, прочность при растяжении, эрозионная стойкость, системы лакокрасочных покрытий

Для цитирования: Кузнецова В.А., Марченко С.А., Железняк В.Г., Коврижкина Н.А. Стойкость лакокрасочных покрытий при воздействии газоабразивной и газокapельной эрозии // Труды ВИАМ. 2024. № 4 (134). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-133-144.

Scientific article

FIRMNESS OF PAINT COATINGS AT INFLUENCE OF GAS-ABRASIVE AND GAS-DROPLET EROSION

V.A. Kuznetsova¹, S.A. Marchenko¹, V.G. Zheleznyak¹, N.A. Kovrizhkina¹

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 analysis of test results on stability to gas-abrasive erosion for systems of paint coatings based on the erosion-resistant disperse-reinforced enamel EP-5236 applied on aluminum alloy D16-T and fibreglass VPS-20 at impact angles $\alpha = 90^\circ$ and 15° was carried out. Firmness of coatings was evaluated on changes of weight characteristics of samples. Resistance of paint coatings to gas-droplet erosion on samples from alloy D16-T and also from fibreglass VPS-20 was investigated. It is shown that using of erosion-resistant system of paint coatings based on disperse-reinforced enamel EP-5236 increases resistance to gas-abrasive and gas-droplet erosion.

Keywords: gas-abrasive erosion, gas-droplet erosion, erosion depth, adhesive durability, durability at stretching, erosion resistance, systems of paint coatings

For citation: Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kovrizhkina N.A. Firmness of paint coatings at influence of gas-abrasive and gas-droplet erosion. *Trudy VIAM*, 2024, no. 4 (134), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-133-144.

Введение

Создание эрозионностойких лакокрасочных покрытий (ЛПК) является актуальной задачей современного материаловедения. Такие покрытия находят широкое применение для защиты лопастей воздушных винтов самолетов и несущих винтов вертолетов, лобовых кромок крыла, лопаток компрессора газотурбинного двигателя и других агрегатов летательных аппаратов [1–5].

Эрозионное разрушение конструкционных материалов и защитных покрытий, применяемых в конструкциях летательных аппаратов, происходит в результате последовательных соударений твердых или жидких частиц, содержащихся в атмосферных образованиях. Таким образом, эрозия – это процесс поверхностного разрушения материала или покрытия под воздействием внешней среды (воздушный поток, содержащий твердые частицы или капли дождя). Характер взаимодействия и объем разрушения определяются физико-механическими свойствами, размером, формой и скоростью частиц, а также зависят от формы поверхности. Следует отметить, что влияние скорости соударения является определяющим фактором. На характер и величину эрозионного разрушения влияет угол соударения частиц с поверхностью. Установлено, что такое влияние зависит от физико-механических свойств материалов. Так, для пластичных материалов максимальный унос массы достигается при небольших углах соударения (15–30 градусов), для хрупких – при углах, близких к 90 градусам.

Газоабразивное разрушение характеризуется образованием и развитием трещин, появлением областей больших касательных напряжений. Газокапельное разрушение происходит под действием импульсной нагрузки при ударе капли и развивается как сложный динамический процесс, при котором в момент удара капли возникают волны напряжений [6–12].

Эрозионная стойкость полимерных ЛКП определяется способностью выдерживать воздействие твердых или жидких частиц без существенного снижения уровня физико-механических и защитных свойств. Эрозионная стойкость ЛКП зависит от величины адгезии покрытия к защищаемой поверхности и его толщины.

На эрозионный износ ЛКП влияют природа и надмолекулярная структура полимерного пленкообразующего, а также физико-механические свойства полученного на его основе покрытия.

Выбор эрозионностойкого полимерного покрытия регламентируется следующими требованиями:

- характеристика эрозионного воздействия;
- температурный диапазон эксплуатации покрытий;
- допустимый (по конструктивным особенностям) уровень толщины покрытия.

Для исследования эрозионной стойкости материалов и покрытий используются различные приборы, стенды и установки, с помощью которых оценивается устойчивость к газоабразивному и газокапельному износу. Для определения стойкости ЛКП к газоабразивной эрозии используют установки центробежного типа или скоростные установки аэродинамического типа. Стойкость покрытий к газоабразивной эрозии обычно оценивают по изменению массы или формы образцов [13–24].

В настоящее время разработан ряд методик для исследования характеристик эрозионного износа авиационных материалов при воздействии двухфазного потока на установках аэродинамического (ASTM G76-04, РТМ 1.2.046–84) и центробежного типа (РТМ 1.2.168–2001), а также с помощью центробежного ускорителя (ГОСТ 23.201–84).

Сущность методов заключается в изнашивании неподвижных образцов двухфазным воздушным потоком, содержащим твердые частицы, при фиксированных параметрах режимов испытаний: угле соударения, концентрации и скорости абразивных частиц.

Для оценки устойчивости покрытий к газокapельному износу чаще всего используют центробежные установки. Принцип их работы основан на том, что образец, вращающийся в рабочей зоне камеры, пересекает поток капель.

Однако результаты исследований эрозионной стойкости материалов, полученные на различных эрозионных установках согласно существующим методикам испытаний, значительно отличаются, что затрудняет интерпретацию данных. Это связано с конструктивными особенностями установок, используемых для определения эрозионной стойкости, а также применением абразивных частиц, отличающихся по геометрической форме, размеру и концентрации в воздушном потоке [25–35].

В данной статье представлены результаты испытаний различных систем ЛКП, разработанных для защиты алюминиевых сплавов и полимерных композиционных материалов на установках по определению стойкости к газоабразивной и газокapельной эрозии.

Исследования выполнены 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») [36].

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

Материалы и методы

Исследованы системы ЛКП, используемые для защиты алюминиевых сплавов и полимерных композиционных материалов.

Для оценки свойств систем ЛКП выбраны стандартные методы определения адгезии (ГОСТ 15140–78), прочности при растяжении (ГОСТ 29309–92), ударе (ГОСТ 4765–73) и изгибе (ГОСТ 31794–2012). Адгезионную прочность покрытий при нормальном отрыве на стеклопластике определяли в соответствии с ГОСТ 32299–2013 (ISO 4624:2002).

Свободные пленки шпатлевок толщиной ~200 мкм получали в соответствии с ГОСТ 14243–78. В табл. 1 приведены свойства изученных систем ЛКП.

Таблица 1

Свойства систем лакокрасочных покрытий (ЛКП)

Система ЛКП	Толщина, мкм	Адгезия к алюминиевому сплаву Д16-Г Ан.Окс.нхр, балл		Прочность, мм			Твердость, отн. ед.
		исходная	после 7 сут увлажнения	при ударе	при изгибе	при растяжении	
ЭП-0214 + ЭП-5236	105–110	1	1	500	1	6,9	0,35
ВГ-28 + ЭП-5236	110–115		1		1	6,8	0,35
ВЛ-02 + ЭП-141	110–115		1		1	5,0	0,3
АК-070 + АС-1115	105–110		2		3	4,0	0,2

Системы покрытий ЭП-0214 + ЭП-5236, ВГ-28 + ЭП-5236 и ВЛ-02 + ЭП-141 обладают высокими значениями адгезии к алюминиевому сплаву Д16-Г Ан.Окс.нхр, твердости, прочности при изгибе, ударе и растяжении. Система покрытий АК-070 + АС-1115 имеет более низкие уровни адгезии, твердости и прочности при растяжении.

Стойкость ЛКП к газоабразивной эрозии на подложке из алюминиевого сплава определяли на установке аэродинамического типа при скорости соударения 200 м/с,

углах соударения 15 и 90 градусов. Стойкость покрытий оценивали по изменению массы образцов. Унос массы образца рассчитывали по формуле

$$g_3 = g_{исх} - g_t,$$

где $g_{исх}$ и g_t – масса образца до и после испытания, г.

Для определения стойкости ЛКП к газокапельной эрозии использовали каплеударный стенд в соответствии с ГОСТ 23.219–84. Сущность метода заключается в изнашивании вращающихся образцов в результате соударения с потоком жидких частиц, создаваемых генератором частиц на роторной установке при фиксированных параметрах режимов испытаний. Испытания проводили при скорости соударения капли 240 м/с, угол соударения составил 90 градусов, удельный расход потока капель 0,72 кг/(м²·с), диаметр капли 1 мм.

Стойкость к газокапельной эрозии оценивали по глубине (l_3) и интенсивности эрозии (I_3). Глубина эрозии:

$$l_3 = h_{исх} - h_t,$$

где $h_{исх}$ и h_t – толщина образца до и после испытания.

Интенсивность эрозии, см/(кг/см²):

$$I_3 = l_3 / (t_3 \cdot Q_s),$$

где t_3 – продолжительность испытания, с; Q_s – удельный расход потока капель, кг/(м²·с).

Результаты и обсуждение

Основное внимание в данной работе уделено изучению стойкости систем ЛКП на основе дисперсно-армированного эрозионностойкого покрытия ЭП-5236, используемого для защиты алюминиевого сплава Д16-Т Ан.Окс.нхр и стеклопластика ВПС-20 при воздействии газоабразивной и газокапельной эрозии.

В качестве объектов исследований для защиты алюминиевых сплавов выбраны системы покрытий АК-070 + АС-1115, ВЛ-02 + ЭП-141, ЭП-0214 + ЭП-5236 и ВГ-28 + ЭП-5236, для защиты стеклопластика ВПС-20 – системы на основе эмали ЭП-5236 с применением шпатлевочных материалов ЭП-0065, ВШ-17М и ЭП-0061.

Результаты определения стойкости ЛКП на сплаве Д16-Т Ан.Окс.нхр к газоабразивной эрозии при углах соударения 90 и 15 градусов приведены на рис. 1.

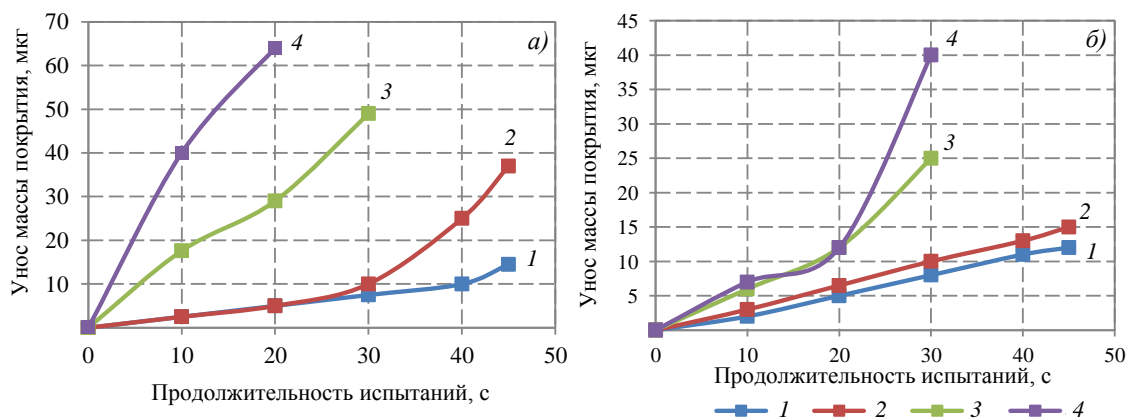


Рис. 1. Эрозионная стойкость систем покрытий ЭП-0214 + ЭП-5236 (1), ВГ-28 + ЭП-5236 (2), ВЛ-02 + ЭП-141 (3) и АК-070 + АС-1115 (4) к газоабразивной эрозии при угле соударения 90 (а) и 15 градусов (б)

Системы лакокрасочных покрытий ВЛ-02 + ЭП-141 и АК-070 + АС-1115 при газоабразивной эрозии изнашиваются с большей скоростью, чем системы покрытий на основе дисперсно-армированного покрытия ЭП-5236. Причем скорость эрозии систем покрытий ВЛ-02 + ЭП-141 и АК-070 + АС-1115 при угле соударения 90 градусов значительно выше, чем при 15 градусах. При газоабразивной эрозии наиболее интенсивно разрушается система покрытий АК-070 + АС-1115.

Следует отметить, что системы покрытий ЭП-0214 + ЭП-5236 и ВГ-28 + ЭП-5236 более устойчивы к газоабразивной эрозии и в меньшей степени зависят от угла соударения.

В табл. 2 приведены результаты определения устойчивости систем ЛКП на алюминиевом сплаве Д16-Т Ан.Окс.нхр к газочапельной эрозии.

Таблица 2

**Стойкость систем лакокрасочных покрытий (ЛКП)
на алюминиевом сплаве Д16-Т Ан.Окс.нхр к газочапельной эрозии**

Система ЛКП	Толщина ЛКП, мкм	Продолжительность испытания, с	Глубина эрозии, мкм	Интенсивность эрозии, см/(кг/см ²)
Без покрытия	0	15	130	0,3
ВЛ-02 + ЭП-141	130–140			0,3
ЭП-0214 + ЭП-5236	125–130	30		0,15

Практически при одинаковой толщине покрытия интенсивность эрозионного износа системы ЛКП на основе эмали ЭП-5236 в 2 раза меньше, чем у системы на основе эмали ЭП-141 и алюминиевого сплава Д16-Т Ан.Окс.нхр без покрытия.

Стойкость систем ЛКП на стеклопластике ВПС-20 к газоабразивной эрозии определяли на установке центробежного типа при углах соударения 90 и 15 градусов. Для выравнивания поверхности стеклопластика ВПС-20 использованы шпатлевочные составы с различными физико-механическими характеристиками (табл. 3).

Таблица 3

Физико-механические свойства шпатлевок

Шпатлевка	Адгезионная прочность, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Удлинение при растяжении, %
ЭП-0061	21,3	10,08	0,3
ЭП-0065	26,1	15,40	1,0
ВШ-17М	15,2	7,05	1,8

Адгезионная прочность шпатлевок к поверхности стеклопластика ВПС-20 находится на высоком уровне и превышает прочность при растяжении. Максимальной прочностью при растяжении характеризуется шпатлевка ЭП-0065, минимальной – шпатлевка ВШ-17М. При этом наиболее эластичной является шпатлевка ВШ-17М, а наиболее жесткой – шпатлевка ЭП-0061.

С применением изученных шпатлевок и эмали ЭП-5236 получены образцы стеклопластика ВПС-20 для испытаний. В табл. 4 приведены результаты определения стойкости покрытий на основе эмали ЭП-5236 на стеклопластике ВПС-20 к газоабразивной эрозии в сравнении со стеклопластиком без ЛКП.

При угле соударения 90 градусов стеклопластик ВПС-20 без ЛКП изнашивается гораздо интенсивнее, чем аналогичные образцы с покрытием на основе эмали

ЭП-5236. Интенсивность и глубина эрозии, а также унос массы стеклопластика ВПС-20 без ЛКП через 15 с испытаний составляет $6,34 \text{ см}/(\text{кг}/\text{см}^2)$, 740 мкм и 383 мг соответственно. Интенсивность эрозии ЛКП на основе эмали ЭП-5236 на стеклопластике ВПС-20 составляет $0,21\text{--}0,35 \text{ см}/(\text{кг}/\text{см}^2)$, глубина эрозии находится в диапазоне 25–41 мкм, унос массы достигает 111–128 мг в зависимости от применяемой в системе покрытий шпатлевки. Система ЛКП, состоящая из шпатлевки ЭП-0065 и эмали ЭП-5236, незначительно уступает по стойкости к газоабразивной эрозии системе покрытий со шпатлевкой ВШ-17М. При этом прочность при растяжении шпатлевки ВШ-17М существенно меньше значений данного показателя для шпатлевки ЭП-0065. Это может быть связано с тем, что волна напряжений, возникающая в момент удара абразивных частиц, передается на слой шпатлевки. В более эластичной шпатлевке ВШ-17М за счет вязкоупругой составляющей происходит релаксация возникающих напряжений.

Таблица 4

Стойкость систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) на стеклопластике ВПС-20 к газоабразивной эрозии при угле соударения 90 и 15 градусов

Система ЛКП	Толщина образца стеклопластика и ЛКП, мкм	Время изнашивания, с	Унос массы, мг	Глубина эрозии, мкм	Интенсивность эрозии, $\text{см}/(\text{кг}/\text{см}^2)$
При угле соударения 90 градусов					
Без покрытия	2640	15	383	740	6,34
ЭП-0065 + ЭП-5236	2980		111	30	0,26
ВШ-17М + ЭП-5236	2830		113	25	0,21
ЭП-0061 + ЭП-5236	2820		128	41	0,35
При угле соударения 15 градусов					
Без покрытия	2650	120	1489	1086	4,48
ЭП-0065 + ЭП-5236	2880	180	949	724	1,99
ВШ-17М + ЭП-5236	2830		1746	1349	3,69
ЭП-0061 + ЭП-5236	2840		1458	1060	2,92

При угле соударения 15 градусов система ЛКП на основе эмали ЭП-5236 со шпатлевкой ВШ-17М изнашивается интенсивнее, чем система покрытий со шпатлевкой ЭП-0065.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что система покрытий на основе эмали ЭП-5236 с применением шпатлевки ЭП-0065 обеспечивает высокую стойкость к газоабразивной эрозии при углах соударения 90 и 15 градусов.

В табл. 5 и на рис. 2 приведены результаты определения стойкости стеклопластика ВПС-20 к газокapельной эрозии. С увеличением продолжительности испытаний глубина эрозии и площадь эрозионного разрушения стеклопластика ВПС-20 возрастают.

Таблица 5

Стойкость стеклопластика ВПС-20 к газокapельной эрозии

Время изнашивания, с	Глубина эрозии, мкм	Интенсивность эрозии, $\text{см}/(\text{кг}/\text{см}^2)$	Площадь эрозионного разрушения, мм^2
24	0	0	0
42	137	4,67	98
54	158	3,90	142
72	303	5,88	168

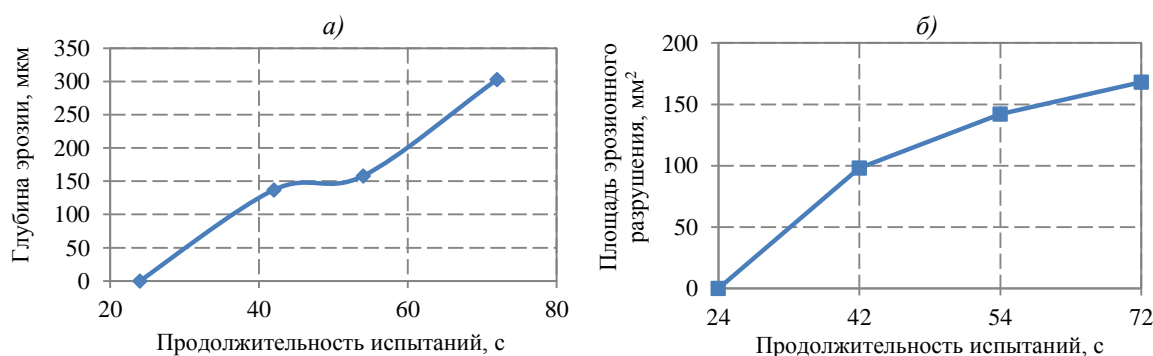


Рис. 2. Зависимость глубины эрозии (а) и площади эрозионного разрушения (б) стеклопластика ВПС-20 от продолжительности испытания

В табл. 6 и на рис. 3 приведены результаты испытаний систем ЛКП на основе эмали ЭП-5236, содержащих различные шпатлевки, на стеклопластике ВПС-20 на стойкость к газокapельной эрозии.

Таблица 6

Стойкость систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) на основе эмали ЭП-5236 на стеклопластике ВПС-20 к газокapельной эрозии

Система ЛКП	Толщина ЛКП, мкм	Время изнашивания, с	Глубина эрозии, мкм	Интенсивность эрозии, см/(кг/см²)	Площадь эрозионного разрушения, мм²
ЭП-0065 + ЭП-5236	190	780	191	0,34	10
ВШ-17М + ЭП-5236			942	1,66	188
ЭП-0061 + ЭП-5236	210		780	0,62	56

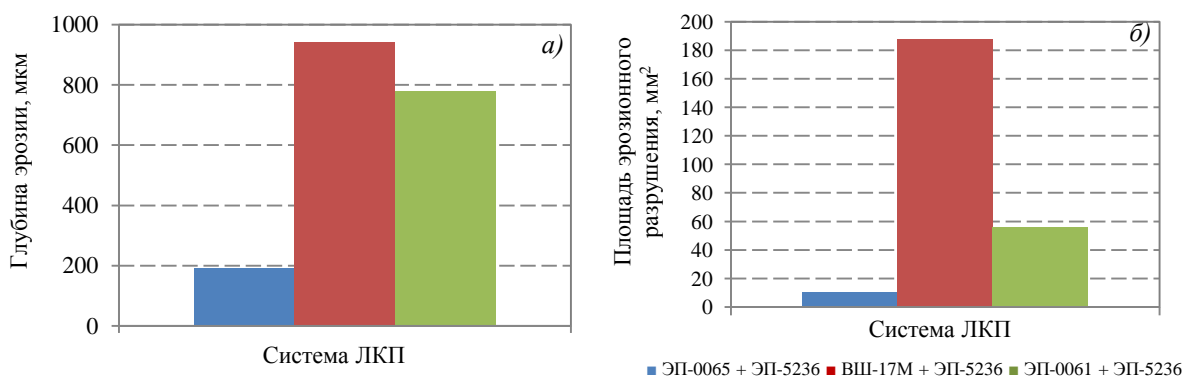


Рис. 3. Глубина эрозии (а) и площадь эрозионного разрушения (б) систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) на основе эмали ЭП-5236 с различными шпатлевками на стеклопластике ВПС-20

Применение систем ЛКП на основе эмали ЭП-5236 существенно повышает стойкость стеклопластика ВПС-20 к газокapельной эрозии. Через 72 с испытаний глубина эрозии стеклопластика ВПС-20 без ЛКП достигает 303 мкм, площадь эрозионного разрушения составляет 168 мм². При испытании стеклопластика ВПС-20 с покрытием на основе эмали ЭП-5236 со шпатлевкой ЭП-0065 через 780 с получены значения 191 мкм и 10 мм² соответственно.

Сопоставляя полученные результаты, можно сделать вывод, что на стойкость системы ЛКП на основе эмали ЭП-5236 существенно влияют свойства используемой

шпатлевки. Максимальное значение стойкости покрытия к газочапельной эрозии получено с применением шпатлевки ЭП-0065, которая обладает более высокой адгезионной (26,1 МПа) и механической (15,40 МПа) прочностью. Шпатлевка ЭП-0061 по адгезионной (21,3 МПа) и механической (10,08 МПа) прочности уступает шпатлевке ЭП-0065. При этом стойкость системы ЛПК на основе эмали ЭП-5236 с применением шпатлевки ЭП-0061 к газочапельной эрозии ниже, чем у покрытия с шпатлевкой ЭП-0065. Наименее эффективной при испытании систем покрытий на основе эмали ЭП-5236 на стойкость к газочапельной эрозии оказалась шпатлевка ВШ-17М, обладающая более низкой адгезионной (15,2 МПа) и недостаточно высокой механической (7,05 МПа) прочностью.

Визуальный осмотр разрушенной зоны после газочапельной эрозии показал, что при воздействии скоростного потока капель на поверхность образца происходит разрушение шпатлевого слоя, а затем отслаивание и унос покрытия.

Заключения

Системы покрытий на основе эмали ЭП-5236 на алюминиевом сплаве Д16-Т Ан.Окс.нхр более устойчивы к газочапельной эрозии и в меньшей степени зависят от угла соударения по сравнению с другими изученными ЛКП. При этом наиболее интенсивно разрушается система покрытий на основе эмали АС-1115. При исследовании стойкости к газочапельной эрозии установлено, что при практически одинаковой толщине покрытия интенсивность эрозионного износа системы ЛКП на основе эмали ЭП-5236 в 2 раза ниже, чем у системы ЛКП на основе эмали ЭП-141 и алюминиевого сплава Д16-Т Ан.Окс.нхр без покрытия.

С увеличением продолжительности испытаний на стойкость к газочапельной эрозии глубина эрозии и площадь эрозионного разрушения стеклопластика ВПС-20 возрастают. Применение систем ЛКП на основе эмали ЭП-5236 существенно повышает стойкость стеклопластика ВПС-20 к газочапельной эрозии. Использование шпатлевки ЭП-0065 обеспечивает высокую стойкость к газочапельной эрозии при углах соударения 90 и 15 градусов.

Использование систем ЛКП на основе эмали ЭП-5236 существенно повышает стойкость к газочапельной эрозии стеклопластика ВПС-20. Применение шпатлевки ЭП-0065, обладающей высокой адгезионной и механической прочностью при растяжении, обеспечивает максимальную стойкость к газочапельной эрозии покрытия на основе эмали ЭП-5236.

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. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 5 т. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. Т. 1: Фундаментальные проблемы химической науки. С. 25–26.
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: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области эрозионностойких покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 11 (71). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.

5. 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.
6. Эрозия / под ред. К. Прис, пер. с англ. под ред. Ю.В. Полежаева. М.: Мир, 1982. 464 с.
7. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 246 с.
8. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
9. Урванцов Л.А. Эрозия и защита металлов. М.: Машиностроение, 1966. 235 с.
10. Спринджер Дж. Эрозия при воздействии капель жидкости. М.: Машиностроение, 1981. 200 с.
11. Непомнящий Е.Ф. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.: Наука, 1971. 270 с.
12. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С., Шульдешова П.М. Исследование возможности повышения стойкости к удару тонколистовых углепластиков за счет плакирования арамидным органопластиком // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
13. Кондрашов Э.К., Лебедева Т.А. Эрозионностойкие покрытия для защиты полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 57–58.
14. Кондрашов Э.К., Найденов Н.Д. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия авиационного назначения. Часть 1. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия на основе эпоксидных и полиуретановых пленкообразователей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 2 (86). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90.
15. Кондрашов Э.К., Найденов Н.Д. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия авиационного назначения. Часть 2. Эластомерные эрозионностойкие радиопрозрачные лакокрасочные покрытия (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 3 (87). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-94-101.
16. Кузнецова В.А. Эрозионностойкая композиция на основе трехфазной системы «эпоксидный олигомер–каучук–армирующий наполнитель»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 24 с.
17. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
18. 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: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
19. Кузнецова В.А. Влияние эластомерного модификатора на механические и вязкоупругие свойства эпоксидно-каучуковых композиций для эрозионностойких покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.
20. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1969. 318 с.
21. 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.
22. Силаева А.А., Кузнецова В.А., Куршев Е.В., Тимошина Е.А. Влияние размеров армирующего наполнителя на технологические и функциональные свойства ЛКМ // *Материаловедение*. 2022. № 2. С. 32–38.

23. Железняк В.Г., Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Скивко П.В. Система лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали для защиты лобовых обогреваемых поверхностей изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
24. Гольдберг М.М., Корюкин А.В., Кондрашов Э.К. Покрытия для полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 287 с.
25. Владимирский В.Н., Денкер И.И., Чеботаревский В.В. Установка для определения эрозионной стойкости полимерных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1973. № 1. С. 54–56.
26. Кашеев В.Н. Абразивное изнашивание твердых тел. М.: Наука, 1970. 248 с.
27. Непомнящий Е.Ф. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.: Наука, 1971. 240 с.
28. Черноярлов С.А., Иванов А.В., Боркова А.Н., Помахаева Л.И., Помахаев В.П., Ковалев И.Е. Установка центробежного самобалансирующегося типа ЦС-871 и методика испытаний материалов на стойкость к каплеударной эрозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. № 3. С. 68–72.
29. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные материалы и покрытия на их основе в машиностроении. М.: Пейнт-Медиа, 2021. 255 с.
30. Черноярлов С.А., Иванов А.В., Боркова А.Н., Помахаева Л.И., Помахаев В.П., Аниховская Л.И., Кузнецова В.А. Исследование стойкости к каплеударной эрозии стеклотекстолита с полимерными защитными покрытиями // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. № 3. С. 73–75.
31. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 3. С. 30–36.
32. Крамченков Е.М. Исследование эрозионного изнашивания материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1996. 26 с.
33. Боркова А.Н. Эрозионная стойкость авиационных материалов при соударении с твердыми (пылевыми) частицами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 27 с.
34. Алексеев В.К., Бодрышев В.В., Ножницкий Ю.А. Некоторые особенности разрушения и износа материалов при взаимодействии с твердыми и жидкими частицами // *Трение и износ*. 1981. Т. 1. № 2. С. 239–246.
35. Клейс И.Р. Основы выбора материала при работе в условиях газоабразивного изнашивания // *Трение и износ*. 1980. Т. 1. № 2. С. 263–274.
36. 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. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Report XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 5 vols. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, vol. 1: Fundamental problems of chemical science, pp. 25–26.
3. 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: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Kuznetsova V.A., Shapovalov G.G. Tendencies of development of the erosion-resistant coatings (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 11 (71), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.

5. 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.
6. *Erosion*. Ed. K. Preece; trans. from Engl. Moscow: Mir, 1982, 464 p.
7. Perelman R.G. *Erosion strength of aircraft engine parts and power plants*. Moscow: Mashinostroyenie, 1980, 246 p.
8. Khrushchov M.M., Babichev M.A. *Abrasive wear*. Moscow: Nauka, 1970, 252 p.
9. Urvantsov L.A. *Erosion and protection of metals*. Moscow: Mashinostroyenie, 1966, 235 p.
10. Springer J. *Erosion under the influence of liquid drops*. Moscow: Mashinostroyenie, 1981, 200 p.
11. Nepomnyashchiy E.F. *Contact interaction of solids and calculation of friction and wear forces*. Moscow: Nauka, 1971, 270 p.
12. Zhelezina G.F., Solovieva N.A., Kulagina G.S., Shuldeshova P.M. Study of the possibility of increasing the impact resistance of thin-sheeted carbon fiber-reinforced plastics due to cladding with aramid organoplastics. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
13. Kondrashov E.K., Lebedeva T.A. Erosion-resistant coatings for the protection of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2003, is.: Paints and varnishes and coatings, pp. 57–58.
14. Kondrashov E.K., Naidenov N.D. Erosion resistant paint coverings of aviation purpose. Part 1. Erosion resistant paint coatings based on epoxy and polyurethane films forming (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90.
15. Kondrashov E.K., Naidenov N.D. Erosion-resistant paint and varnish coatings for aviation purposes. Part 2. Elastomeric erosion resistant radio-transparent coatings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-94-101.
16. Kuznetsova V.A. *Erosion-resistant composition based on the three-phase system «epoxy oligomer–rubber–reinforcing filler»*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 1999, 24 p.
17. 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: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
18. 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: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
19. Kuznetsova V.A. Influence of the elastomeric modifier on mechanical and viscoelastic properties of epoxy and rubber compositions for erosion resistant coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-56-62.
20. Berlin A.A., Basin V.E. *Basics of polymer adhesion*. Moscow: Khimiya, 1969, 318 p.
21. 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.
22. Silaeva A.A., Kuznetsova V.A., Kurshev E.V., Timoshina E.A. Influence of the dimensions of the reinforcing filler on the technological and functional properties of paints and varnishes. *Materialovedenie*, 2022, no. 2, pp. 32–38.
23. 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: February 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
24. Goldberg M.M., Koryukin A.V., Kondrashov E.K. *Coatings for polymer materials*. Moscow: Khimiya, 1980, 287 p.

25. Vladimirsky V.N., Denker I.I., Chebotarevsky V.V. Installation for determining the erosion resistance of polymer coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1973, no. 1, pp. 54–56.
26. Kashcheev V.N. *Abrasive wear of solids*. Moscow: Nauka, 1970, 248 p.
27. Nepomnyashchiy E.F. *Contact interaction of solids and calculation of friction and wear forces*. Moscow: Nauka, 1971, 240 p.
28. Chernoyarov S.A., Ivanov A.V., Borkova A.N., Pomakhaeva L.I., Pomakhaev V.P., Kovalev I.E. Installation of a centrifugal self-balancing type TsS-871 and methods of testing materials for resistance to droplet impact erosion. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2003, no. 3, pp. 68–72.
29. Kondrashov E.K. *Paints and varnishes and coatings based on them in mechanical engineering*. Moscow: Paint-Media, 2021, 255 p.
30. Chernoyarov S.A., Ivanov A.V., Borkova A.N., Pomakhaeva L.I., Pomakhaev V.P., Anikhovskaya L.I., Kuznetsova V.A. Study of resistance to drop impact erosion of fiberglass laminate with polymer protective coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2003, no. 3, pp. 73–75.
31. Erasov V.S., Kotova E.A. Erosion resistance of aviation materials to influence of solid (dust) particles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 30–36.
32. Kramchenkov E.M. *Study of erosive wear of materials*: thesis abstract, Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 1996, 26 p.
33. Borkova A.N. *Erosion resistance of aviation materials upon impact with solid (dust) particles*: thesis abstract, Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 2006, 27 p.
34. Alekseev V.K., Bodryshev V.V., Nozhnitsky Yu.A. Some features of destruction and wear of materials during interaction with solid and liquid particles. *Trenie i iznos*, 1981, vol. 1. no. 2, pp. 239–246.
35. Kleis I.R. Fundamentals of material selection when working under conditions of gas abrasive wear. *Trenie i iznos*, 1980, vol. 1, no. 2, pp. 263–274.
36. 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

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

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

Коврижкина Наталья Анатольевна, инженер 2 категории, 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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 19.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.03.2024.
The article was submitted 19.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 21.03.2024.