

УДК 629.7.023.222

Э.К. Кондрашов¹, Н.Д. Найденов¹**ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ
АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ****Часть 1. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия
на основе эпоксидных и полиуретановых пленкообразователей
(обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90

В работе обобщены результаты исследований по разработке эрозионностойких покрытий на основе эпоксидных, полиуретановых и полиимидных пленкообразователей с теплостойкостью до 350 °С. Установлено, что эрозионная стойкость покрытий зависит не только от их прочности и относительного удлинения, но и от их динамических параметров и структуры наполнителей. Приведены сравнительные данные по технологическим и физико-механическим свойствам эпоксидно-полиамидных, эпоксикаучуковой и полиуретановой эмалей, предназначенных для защиты от ударно-абразивного изнашивания.

Ключевые слова: эрозионная стойкость, циклы, термостойкость, пленкообразователи: эпоксидный, полиуретановый, полиимидный.

E.K. Kondrashov¹, N.D. Naidenov¹**EROSION RESISTANT PAINT COVERINGS
OF AVIATION PURPOSE****Part 1. Erosion resistant paint coatings based
on epoxy and polyurethane films forming
(review)**

This paper summarizes the research results on the development of erosion-resistant coatings based on epoxy, polyurethane and polyimide film formers with heat resistance up to 350 °C. It was found that the erosion resistance of coatings depends not only on their strength and elongation, but also on their dynamic parameters and structure of fillers. Comparative data on the technological and physico-mechanical properties of epoxy-polyamide, epoxy-rubber and polyurethane enamels intended for protection against impact-abrasive wear are given.

Keywords: erosion resistance, cycles, heat resistance, film formers: epoxy, polyurethane, polyimide.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Проблема повышения эрозионной стойкости лакокрасочных покрытий, применяющихся для защиты различных элементов конструкций летательных аппаратов [1], является актуальной.

В данной статье обобщен опыт работы лаборатории лакокрасочных материалов и покрытий ФГУП «ВИАМ» в области разработки эрозионностойких лакокрасочных покрытий, предназначенных для защиты элементов конструкций из металлических

и полимерных композиционных материалов от газэрозионного и газоабразивного разрушений.

К началу работ в этом направлении уже было известно, что при полете самолета со скоростью 800 км/ч неопределенное покрытие толщиной 4,3 мм на носовом обтекателе полностью разрушалось за 40 мин при прохождении через дождевую завесу с интенсивностью дождя 25 мм/ч [1]. Для защиты отечественной авиационной техники требовались эрозионностойкие лакокрасочные покрытия толщиной не более 0,2 мм. Например, для защиты лопаток из алюминиевого сплава для компрессора двигателя самолета Ил-76 допускалось применение покрытия толщиной не более 100 мкм.

Исследования по созданию эрозионностойких полимерных покрытий 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») [2–4].

В настоящее время по результатам эксплуатации техники различного назначения выявлено шесть видов эрозионного износа: газэрозионный, газоабразивный, газокпельный, гидроэрозионный, гидроабразивный и кавитационный. В данной статье представлены результаты исследований по созданию покрытий для защиты от газоабразивного (ударно-абразивного) изнашивания [5].

Процессы эрозионного разрушения материалов и покрытий исследуют на установках в режимах, имитирующих реальные условия эксплуатации: пневматических [6, 7], аэродинамических [8, с. 215], гравитационных [9], механических [10] и центробежных [11].

В результате изучения процессов эрозии предложен ряд уравнений, в которых рассмотрены основные параметры, влияющие на процесс эрозионного разрушения.

Скорость ударной волны $V_{у.в}$ связана со скоростью частицы $V_ч$ уравнением [12]

$$V_{у.в} \approx V_ч + S \cdot \Delta V,$$

где S – константа ($0 < S < 2$); ΔV – скачок скорости частицы.

В результате давление $P_{у.в}$ за ударной волной составит [12]

$$P_{у.в} \approx \rho_0 V_ч \cdot \Delta V + \rho_0 S \cdot \Delta V^2,$$

где ρ_0 – начальная плотность материала.

Скорость частицы в момент удара в самом общем случае связана с интенсивностью износа уравнением [9]

$$K = a V_ч^m,$$

где K – потеря массы (объема) образца, соответствующая воздействию 1 кг абразива, попавшего на образец; a – коэффициент, зависящий от свойств изнашиваемого и абразивного материалов, а также угла атаки; m – показатель степени.

Применительно к пластичным металлам, для которых характерна пластическая деформация при ударе быстролетящей частицей и локальный температурный скачок в зоне деформации, приводящей к расплавлению материала в этой зоне, введено понятие порогового размера частицы [13]:

$$r_{п} \approx D(\rho/P)^{1/2},$$

где D – коэффициент термической диффузии, мм²/с; ρ – плотность частицы, мл/мм³; P – твердость по алмазу, МПа.

Для хрупких материалов предложено уравнение скорости эрозии, учитывающее форму частиц [12]:

$$W = kr^a V_{\text{ч}}^b,$$

где k – постоянная, учитывающая модуль упругости преграды и плотность частицы; r – размер частицы; $V_{\text{ч}}$ – скорость частиц (для круглых частиц: $a = \frac{3(m-0,67)}{m-2}$; для угловатых частиц: $a = \frac{3,6(m-0,67)}{m-2}$; для частиц любой формы: $b = \frac{2,4(m-0,67)}{m-2}$; m – постоянная Вейбулла).

Применительно к газоабразивному износу эрозионную стойкость покрытия можно оценить по продолжительности износа τ :

$$\tau = \frac{\delta \cdot \varepsilon_V}{3,6 \cdot 10^{-2} \cdot \Psi \cdot K_{\Psi} \cdot d_0 \cdot V_{\text{ч}}^{m_0}} \text{ [с]},$$

где δ – толщина покрытия, мм; ε_V – относительный объемный износ материала при скорости $V_{\text{ч}}$; Ψ – концентрация абразивной струи, г/(см²·с); K_{Ψ} – коэффициент, учитывающий различие в концентрации струи при лабораторных и натуральных испытаниях; d_0 и m_0 – соответственно коэффициент и показатель степени, зависящие от свойств абразива и угла атаки α .

Однако приведенное уравнение не дает возможности установить зависимость эрозионной стойкости покрытия от его физико-механических свойств.

Материалы и методы

Комплексное исследование свойств полимерных пленкообразователей, покрытий на их основе и защищаемых материалов дало возможность разработать покрытия на основе эпоксидных пленкообразователей с достаточно высокой эрозионной стойкостью.

Из большой номенклатуры немодифицированных эпоксидных покрытий наиболее высокой стойкостью к газоабразивному износу обладают покрытия на основе эпоксидных смол с молекулярной массой 2500 а.е.м. (табл. 1), отверждаемые полиамидными смолами [14].

Таблица 1

Эрозионная стойкость диановой эпоксидной смолы с различной молекулярной массой

Средняя молекулярная масса диановой эпоксидной смолы	Износ покрытия при газоабразивном изнашивании, кг абразива, при температуре, °С			
	20	60	100	120
400	3/3,3	3,2/3,3	6,2/4,5	4/2,5
950	4,2/4,5	6/4,5	9,5/7,5	7/6
2500	5/5,3	5/5,4	11/9,5	8/7,5

Примечание. Испытания проводили на установке «Гайфун» (покрытия разрушали до подложки); данные в числителе – при использовании в качестве отвердителя гексаметилендиамина, в знаменателе – полиамида ПО-300.

На основе эпоксидной смолы Э-49 разработана эпоксидно-полиамидная эмаль ЭП-586 (табл. 2) для защиты от эрозионно-коррозионных поражений алюминиевых лопаток первых ступеней компрессора ГТД [15].

Для обеспечения достаточно высоких показателей эрозионной стойкости необходимо получение покрытия с толщиной ~(90–110) мкм, достижимой при нанесении 4–6 слоев эмали ЭП-586. В последующих работах ФГУП «ВИАМ» показано, что при нанесении на один слой эмали ЭП-586 двух слоев эмали на основе пленкообразователя

этой эмали со сверхтвердым наполнителем эрозионная стойкость такого трехслойного покрытия увеличивается в несколько раз.

Таблица 2

Основные показатели, контролируемые при производстве и применении эмали ЭП-586

Показатели	Значение показателя
Цвет пленки эмали	Кремово-желтый
Внешний вид пленки	Однородная поверхность без посторонних включений (допускается незначительная шагрень)
Условная вязкость эмали по вискозиметру ВЗ-4 при 20±0,5 °С, с	17–24
Массовая доля нелетучих веществ эмали, %	47–52
Степень перетира эмали, мкм (не более)	20
Время высыхания до степени 3, ч (не более): при 20±2 °С при 155±5 °С	5 1
Твердость пленки по маятниковому прибору, усл. ед. (не менее)	0,9
Изгиб покрытия, мм (не более)	1
Прочность пленки при ударе, Дж (не менее)	5
Жизнеспособность эмали при 20±2 °С, ч (не менее)	72

Для эпоксидно-полиамидной эмали ЭП-586 впервые предложено эмпирическое выражение, в котором износ Θ , характеризующий количество абразива, израсходованного для разрушения покрытия, представлен в виде функции величин предела прочности σ_p и относительного удлинения при разрыве ε_p пленок покрытия [16]:

$$\Theta = \sigma_p \varepsilon_p^{0,5} nk \text{ [кг]}, \quad (1)$$

где n – постоянная установки; $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$; $k_1 = 1$ при $1 < \varepsilon_p < 7$; $k_2 = 1$, если адгезионная прочность больше или равна когезионной прочности покрытия; $k_3 = 1$ при толщине покрытия $90 < \delta < 105$ мкм; $k_4 = 1$ при твердости покрытия, не превышающей твердость эпоксидного покрытия (без добавления сверхтвердых наполнителей).

Это уравнение получено с использованием установки «Тайфун» (рис. 1) при следующих параметрах:

Интенсивность подачи абразива на образец, г/с	0,37
Угол атаки, градус	40–45
Скорость вращения вала, об/мин	2100
Скорость абразива, м/с	60
Размер частиц абразива, мм	0,5–0,8
Площадь образца, подвергающаяся эрозии, мм	10×33

Изменяя скорость вращения вала (об/мин), можно регулировать величину кинетической энергии абразивных частиц E_k , которую рассчитывают по формуле [14, с. 34]

$$E_k = mr^2 \omega^2 / 2,$$

где m – средняя масса частиц; ω – угловая скорость; r – радиус, описываемый трубкой.

Возможность применения этого уравнения подтверждена экспериментально. При использовании в качестве абразива сплава рэлит (с плотностью в 4 раза больше, чем у песка, и с той же дисперсностью, что и песок) скорость эрозии увеличилась в 5–6 раз.

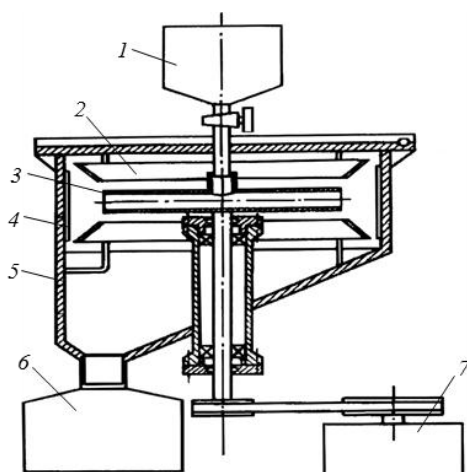


Рис. 1. Установка «Тайфун» для испытания стойкости лакокрасочных покрытий к газоабразивному износу:

1 – бункер для абразива; 2 – терморадияционный нагреватель; 3 – вращающаяся трубка; 4 – испытываемый образец; 5 – цилиндрическая камера; 6 – бункер для отработанного абразива; 7 – электродвигатель

В дальнейшем показано [16], что и с использованием более низкомолекулярной эпоксидной смолы Э-41 (молекулярная масса 900–1100) за счет модификации каучуком и применения нитевидных кристаллов оксида цинка вместо оксида цинка сферической формы могут быть получены покрытия с более высокой эрозионной стойкостью, чем у эмали ЭП-586, но с меньшей теплостойкостью. Исследование влияния концентрации нитевидных кристаллов оксида цинка (ZnO) на прочностные и деформационные свойства пленок покрытий (рис. 2) позволило определить оптимальную концентрацию нитевидных кристаллов в покрытии (табл. 3) [17].

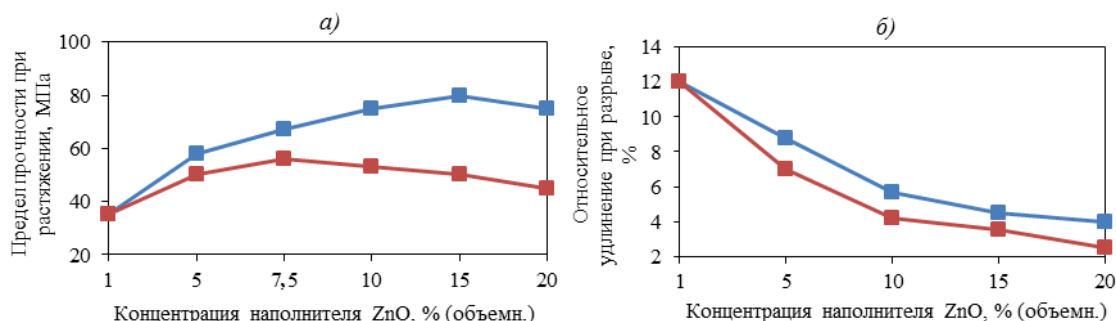


Рис. 2. Влияние формы и концентрации наполнителя ZnO в виде нитевидных кристаллов (■) и сферических частиц (■) на предел прочности при растяжении (а) и относительное удлинение при разрыве (б) пленок покрытий

Таблица 3

Эрозионная стойкость наполненных ZnO эпоксикаучуковых композиций		
Концентрация наполнителя, % (объемн.)	Эрозионная стойкость, кг, с использованием ZnO в виде	
	нитевидных кристаллов	сферических частиц
5,0	9,3±0,5	5,8±0,4
7,5	10,3±0,5	5,7±0,4
10,0	10,7±0,6	5,6±0,4
12,5	9,9±0,5	5,0±0,3
15,0	8,0±0,5	4,3±0,3
17,5	7,9±0,5	3,9±0,3
20,0	7,5±0,5	3,2±0,3

Результаты и обсуждение

Полученные результаты показывают, что ZnO в виде нитевидных кристаллов существенно повышает эрозионную стойкость эпоксикаучуковых композиций. Оптимальное содержание наполнителя ZnO в виде нитевидных кристаллов в эпоксикаучуковой композиции составляет 10%.

Однако эрозионная стойкость покрытия должна зависеть не только от величины его предела прочности (σ_p) и относительного удлинения при разрыве (ϵ_p), но и от стойкости к динамическим воздействиям, которую можно оценить динамическим модулем сдвига G и тангенсом угла механических потерь $\text{tg}\delta'$. В результате проведенных исследований по оценке этих параметров предложено уточненное уравнение [18]

$$\mathcal{E}_p = \sigma_p \epsilon_p^{0,5} Kn + \alpha \cdot \text{tg}\delta' / G, \quad (2)$$

где $K=1$, $n=3,83 \cdot 10^{-2}$ кг/МПа; α – коэффициент, учитывающий структуру наполнителя, кг·МПа.

Расчетные \mathcal{E}_1 (1) и уточненные \mathcal{E}_2 (2) значения эрозионной стойкости в сравнении с экспериментальными значениями \mathcal{E}_3 для эпоксикаучуковых покрытий приведены в табл. 4.

Таблица 4

Эрозионная стойкость наполненных ZnO эпоксикаучуковых композиций (экспериментальные и расчетные значения) [18]

Наполнитель ZnO		σ_p , МПа	ϵ_p , %	$\text{tg}\delta' \cdot 10^2$	$G \cdot 10^{-6}$, МПа	$\alpha \cdot 10^8$, кг·МПа	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	\mathcal{E}_3
форма	содержание, %								
Нитевидные кристаллы	5	62	7,8	7,15	5,20	1,96	6,6	9,3	9,3±0,5
	10	77	5,2	10,0	5,69		6,7	10,2	10,7±0,6
	15	79	4,1	7,10	6,57		6,1	8,2	8,0±0,5
	20	74	3,4	7,02	6,73		5,2	7,3	7,5±0,5
Сферические частицы	5	50	5,6	7,57	7,05	1,33	4,5	6,0	5,8±0,4
	10	54	4,1	7,95	8,27		4,2	5,5	5,6±0,4
	15	50	3,2	6,41	10,40		3,4	4,2	4,3±0,3
	20	43	2,2	5,92	13,40		2,4	3,0	3,2±0,3

В результате исследований разработана эмаль ЭП-5236, основные свойства которой представлены в табл. 5 [19].

Таблица 5

Основные показатели, контролируемые при производстве и применении эмали ЭП-5236

Показатели	Значение показателя
Цвет пленки эмали	Черный, серый, красный, желтый, табачный, синий; оттенок не нормируется
Внешний вид пленки эмали	После высыхания пленка эмали должна быть однородной, без посторонних включений
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката эмали, %	38–49 (в зависимости от цвета)
Условная вязкость полуфабриката эмали по вискозиметру типа ВЗ с диаметром сопла 4,000±0,015 мм при температуре 20,0±0,5 °С, с	14–50
Степень перетира полуфабриката эмали, мкм (не более)	30–35
Время высыхания до степени 3 при температуре 80±2 °С, ч (не более)	3
Твердость пленки эмали по маятниковому прибору типа М-3, усл. ед. (не менее)	0,8
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	1
Прочность пленки эмали при ударе по прибору типа У-1, см (не менее)	50
Жизнеспособность эмали при температуре 20±5 °С, ч (не менее)	8
Эрозионная стойкость покрытия при толщине от 100 до 120 мкм при температуре 20±5 °С, цикл (не менее)	5

Для оценки изменения химического состава полимерного покрытия в результате газоабразивной эрозии впервые использован метод электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА), который позволяет послойно рассмотреть структурные изменения в исследуемом покрытии на алюминиевой подложке, а также получить информацию по количественному изменению элементного состава и типу химических связей, присутствующих в поверхностном слое [20, с. 142].

Результаты количественного анализа поверхностного слоя образцов покрытий, полученных на основе наполненных эпоксикаучуковых композиций, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Элементный состав поверхностного слоя покрытия при оценке методом ЭСХА

Состояние покрытия	Содержание элементов, % (по массе)					
	C	O	N	Si	Al	Zn
Исходное	56,6	32,4	2,1	10,2	–	0,02
После эрозионного воздействия	56,4	27,1	2,8	7,4	6,1	0,2

На основании полученных результатов испытаний можно сделать вывод, что при эрозионном воздействии абразивных частиц в поверхностном слое покрытия происходит разрушение полимерной матрицы покрытия с образованием новых химических структур, которые не были обнаружены в поверхностном слое до воздействия абразива [21], что, вероятно, обусловлено протеканием механохимического процесса.

Исследования, проведенные в 2018 г. авторами статьи (магистерская работа Н.Д. Найденова «Исследование эрозионной стойкости систем покрытий на основе фторсополимерных и эпоксикаучуковых композиций»), показали, что при нанесении на систему покрытий с одним слоем эмали ЭП-5236 дополнительных слоев покрытия на основе пленкообразователя эмали ЭП-5236, но с введением синтетических сверхтвердых наполнителей, эрозионная стойкость такой системы с грунтовкой ЭП-0214 возрастает не менее чем в 2 раза.

Первые летные испытания лопастей авиационных винтовентиляторных двигателей с эпоксиполиамидной системой покрытий на основе эмали ЭП-140 выявили недостаточную эрозионную стойкость и низкую атмосферостойкость.

Недостаточную атмосферостойкость эпоксидно-полиамидной эмали ЭП-140 выявили и в процессе эксплуатации вертолетов. Значительно более высокую атмосферостойкость показали полиуретановые эмали, которые впервые применили на самолетах Ил-18 (импортные эмали) и Ил-86 (отечественная эмаль УР-1161). Использование полиуретанового пленкообразователя и нитевидных кристаллов оксида цинка обеспечило разработку атмосферостойкой эрозионностойкой полиуретановой эмали ВЭ-62 и системы покрытий с этой эмалью для защиты воздушных винтов авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов. Как показали результаты сравнительных испытаний систем покрытий с эмалями ВЭ-62 и ЭП-140 (одинаковой толщины 140–170 мкм), система покрытий с эмалью ВЭ-62 имеет значительно бóльшие значения стойкости к УФ-излучению в процессе ускоренных атмосферных испытаний в аппарате «Атлас» (рис. 3, а) и эрозионной стойкости (рис. 3, б), чем система покрытий на основе эмали ЭП-140 [22]. Однако при этом следует учитывать, что и сама шпатлевка ЭП-0065 имеет значительно более высокую эрозионную стойкость, чем шпатлевка ЭП-0080.

В табл. 7 приведены основные свойства эмали ВЭ-62, на которую оформлены технические условия. На систему покрытий на основе эмали ВЭ-62, предназначенную для защиты лопастей из полимерных композиционных материалов винтовентиляторных двигателей, оформлена технологическая рекомендация.

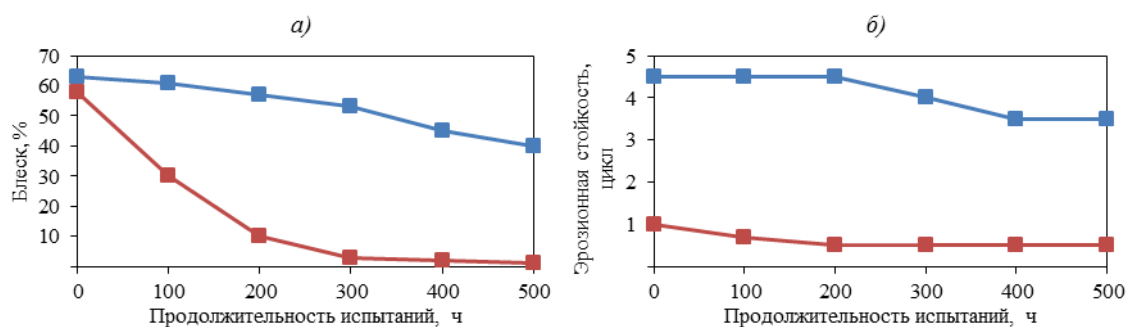


Рис. 3. Кинетика изменения блеска (а) и эрозионной стойкости (1 цикл – воздействие 800 г песка дисперсностью 0,5–0,8 мм) (б) после испытаний в аппарате «Атлас» систем покрытий ЭП-0065+ВЭ-62 (■) и ЭП-0080+ЭП-140 (■)

Таблица 7

Основные показатели, контролируемые при производстве и применении эмали ВЭ-62

Показатели	Значение показателя
Цвет полуфабриката эмали	Синий, желтый, серый, оттенок не нормируется
Внешний вид пленки эмали	После высыхания пленка эмали должна быть однородной, без посторонних включений
Массовая доля нелетучих веществ в полуфабрикате эмали, %	50±5
Степень перетира, мкм (не более)	15
Условная вязкость полуфабриката эмали по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при температуре 20,0±0,5 °С, с	20–70
Время высыхания до степени 3 при температуре 20±2 °С, ч (не более)	24
Твердость покрытия по маятниковому прибору (не менее): типа ТМЛ, отн. ед. типа М-3, усл. ед.	0,33 0,6
Прочность пленки покрытия при изгибе, мм (не более)	1
Прочность пленки покрытия при ударе по прибору типа У-1А, см (не менее)	50
Срок годности эмали после смешения компонентов, ч (не менее)	6
Блеск покрытия по блескометру Picogloss 560, отн. ед. (не более)	15

Завершая анализ свойств эрозионностойких покрытий с относительным удлинением от 1 до 7%, необходимо отметить достигнутый уровень термостойкости. Так, если эмаль ЭП-586 (кремово-желтая) рекомендуется для эксплуатации до температуры 200 °С, а эта же эмаль зеленого цвета – до 250 °С, то эмаль ЭП-5236 предлагается для эксплуатации до температуры 135 °С. Необходимо также отметить, что достаточно высокую эрозионную стойкость (порядка 8 циклов) имеют полиимидные покрытия с теплостойкостью до 350 °С.

В последние годы нашли применение новые элементы конструкций [23], которые требуют защиты от ударно-абразивного износа и использование которых определено тенденциями развития авиационной техники и материалов для их создания [24, 25]. Однако это может потребовать и разработки новых технологий ремонта [26].

Оценить достигнутый уровень разработанных эпоксидных, полиуретановых и полиимидных эрозионностойких покрытий авиационного назначения не представляется возможным, так как зарубежные фирмы не предлагают к поставке покрытия такого типа, а в обзоре [27] не приведены конкретные данные по эрозионной стойкости, толщине и теплостойкости зарубежных эрозионностойких покрытий на основе термоактивных пленкообразователей.

Заключения

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» эрозионностойкие эпоксидные покрытия обеспечили эксплуатацию авиационной техники различного назначения.

Определены направления дальнейшего повышения эрозионной стойкости эпоксидных покрытий.

Максимальную термостойкость (350 °С) имеют покрытия на основе полиимидных пленкообразователей, синтезированных в Институте элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН.

Эпоксидно-полиамидные эрозионностойкие эмали не имеют аналогов по достигнутому уровню термостойкости.

Библиографический список

1. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 296 с.
2. 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.
3. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
4. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
5. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.
6. Ратнер А.В., Зелинский В.Г. Эрозия материалов теплоэнергетического оборудования. М.; Л.: Энергия, 1966. 271 с.
7. Урванцев Л.А. Эрозия и защита металлов. М.: Машиностроение, 1966. 235 с.
8. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М.: Высшая школа, 1970. 424 с.
9. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. М.: Наука, 1970. 248 с.
10. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1964. 139 с.
11. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 246 с.
12. Эрозия / пер. с англ. под ред. Ю.В. Полежаева. М.: Мир, 1982. 464 с.
13. Клейс И.Р. Теория трения, износа и проблемы стандартизации. Брянск, 1978. 387 с.
14. Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н., Бейдер Э.Я. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1989. 135 с.
15. Владимирский В.Н. Разработка и исследование покрытий для защиты лопаток ГТД от эрозионно-коррозионных поражений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1977. 34 с.
16. Кузнецова В.А., Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Кузнецов Г.В. О влиянии формы частиц оксида цинка на эксплуатационные свойства полимерных покрытий // Материаловедение. 2012. №12. С. 12–14.
17. Кузнецова В.А., Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н., Кузнецов Г.В. Дисперсно-армированные эрозионностойкие покрытия // Авиационные материалы и технологии. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 53–56.

18. Кузнецова В.А., Владимирский В.Н., Кондрашов Э.К. Прогнозирование эрозионной стойкости лакокрасочных покрытий с учетом динамических параметров // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 50–53.
19. Кузнецова В.А. Эрозионностойкая композиция на основе трехфазной системы эпоксидный олигомер–каучук–армирующий наполнитель: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 24 с.
20. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров: в 2 ч. / пер. с англ. М.: Мир, 1983. 480 с.
21. Солянкин И.Н., Кузнецова В.А., Кондрашов Э.К., Мягков М.В., Болонин А.Б., Дроздов М.А., Пенский Н.В. Изменение химического состава полимерной матрицы эрозионностойкого покрытия при газообразивном изнашивании // *Лакокрасочные материалы*. 1994. №5. С. 34–38.
22. Кузнецова В.А., Владимирский В.Н., Кондрашов Э.К. Атмосферостойкая эрозионностойкая эмаль ВЭ-62 для защиты лопастей винтовентиляторных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 58–60.
23. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
24. 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.
25. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
26. Семенова Л.В., Новикова Т.А., Нефедов Н.И. Изучение смывающей способности смывок для удаления систем лакокрасочных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 32–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-32-37.
27. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области эрозионностойких покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2018. №11 (71). Ст. 09. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.