

УДК 629.7.023.222

Э.К. Кондрашов¹, Н.Д. Найденов¹

ЭРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЛАКОКРАСОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Часть 2. Эластомерные эрозионностойкие радиопрозрачные лакокрасочные покрытия (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-94-101

В первой части обзора обобщены результаты исследований эрозионной стойкости покрытий на основе эпоксидных, полиуретановых и полиимидных пленкообразователей с теплостойкостью до 350 °С. Установлено, что эрозионная стойкость покрытий зависит не только от прочности и относительного удлинения, но также и от их динамических параметров и свойств наполнителей.

Во второй части обобщены результаты разработки эластомерных эрозионностойких покрытий на основе хлорсульфированного полиэтилена и фторкаучука с теплостойкостью до 250 °С, а также систем покрытий с эрозионностойкими эмалями на основе этих эластомеров, предназначенных для защиты от эрозии радиопрозрачных антенных обтекателей из стеклопластиков.

Ключевые слова: эрозионная стойкость, циклы, термостойкость, хлорсульфированный полиэтилен, фторкаучук.

E.K. Kondrashov¹, N.D. Naydenov¹

EROSION-RESISTANT PAINT AND VARNISH COATINGS FOR AVIATION PURPOSES

Part 2. Elastomeric erosion resistant radio-transparent coatings (review)

This paper summarizes the results of research on the development of erosion-resistant coatings based on epoxy, polyurethane and polyimide film formers with heat resistance up to 350 °C. It is established that the erosion resistance of coatings depends not only on their strength and elongation, but also on their dynamic parameters and the properties of fillers.

The second part of the article summarizes the results of research on the development of elastomeric erosion-resistant coatings based on chlorosulfated polyethylene and fluoro-rubber with heat resistance up to 250 °C, as well as coating systems with erosion-resistant enamels based on these elastomers designed to protect against erosion of radio-transparent antenna fairings made of fiberglass.

Keywords: erosion resistance, cycles, temperature resistance, chlorosulfonated polyethylene, fluorinated rubber.

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

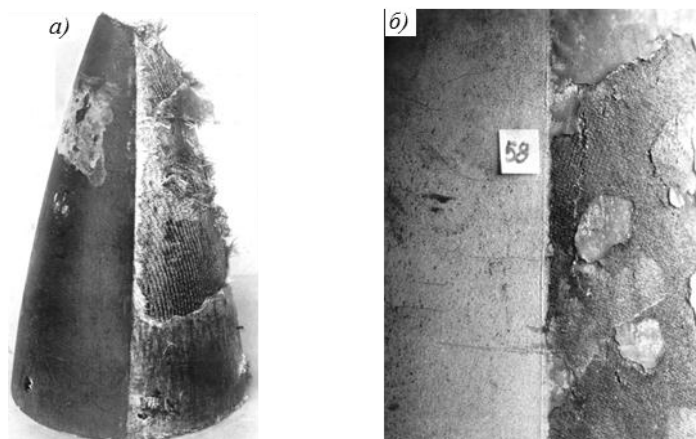
Введение

В первой части статьи [1] показана актуальность проблемы повышения эрозионной стойкости покрытий [2–5], приведены основные уравнения, характеризующие влияние параметров двухфазного потока на скорость эрозии [6–8], рассмотрены типы установок для испытания материалов и покрытий на стойкость к газообразному изнашиванию [9–13].

Показаны зависимость эрозионной стойкости от прочности, относительного удлинения и вязкоупругих свойств покрытия, а также влияние формы и твердости дисперсных наполнителей, входящих в состав покрытий, на их эрозионную стойкость.

Приведены данные по эрозионной стойкости, теплостойкости, технологическим и физико-механическим свойствам эпоксиполиамидного, эпоксикаучукового, полиуретанового и полиимидного покрытий.

Во второй части статьи будут рассмотрены проблемы, связанные с разработкой эластомерных покрытий и систем покрытий на основе хлорсульфированного полиэтилена и фторкаучука для защиты радиопрозрачных антенных обтекателей с теплостойкостью до 250 °С.



Внешний вид части поверхности стеклопластиковых конусов после газодинамических испытаний:

a – при температуре 450 °С в течение 2,5 ч на фенольнофурфурольном стеклотекстолите ФН (правая часть покрыта шпатлевкой на основе смолы ВИАМ-БЗ с молотой слюдой, левая – шпатлевкой КО-0066); *б* – при температуре 800 °С в течение 1 мин на кремнийорганическом стеклотекстолите СК-9МР (смола К-9) (правая часть покрыта шпатлевкой КО-0066, левая – шпатлевкой КО-0067М)

Задачи, которые решены при разработке покрытий для защиты радиопрозрачных антенных обтекателей из стеклопластиков от газозерозионного изнашивания в интервале температур 400–1200 °С, рассмотрены ранее в статье [14], где показана эффективность применения кремнийорганических шпатлевок при воздействии высокотемпературного газового потока (см. рисунок).

Материалы и методы

В настоящее время в изделиях авиационной техники большое значение имеют детали из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые в ряде случаев требуют защиты от эрозионного разрушения в процессе эксплуатации.

Опыт эксплуатации самолетов (Ту-154, Ил-76 и др.) показал, что эрозионная стойкость покрытий на основе перхлорвиниловых, эпоксидных и акриловых связующих, применявшихся для окраски носовых антенных обтекателей, явно недостаточна (в ряде случаев – всего несколько десятков взлетов и посадок).

Ранее используемое эрозионностойкое покрытие на основе хлоропрена имело только один цвет – черный, а для самолетов (например, Ту-154 и Ил-76) требовались эмали белого и серого цветов. Из опыта эксплуатации зарубежных самолетов известно, что эластомерные покрытия обтекателей обладают наиболее высокой эрозионной стойкостью.

Разрушения эластомерных покрытий можно оценить по уравнению из работы [15], которое учитывает ударную упругость. Среди полимерных материалов наибольшей ударной упругостью отличаются именно эластомеры. Однако на основе хлоропрена и полиуретанового каучука в настоящее время не удалось получить покрытия белого цвета, стабильно сохраняющего его при ультрафиолетовом облучении.

Впервые разработаны рецептуры эрозионностойкой радиопрозрачной эмали белого и серого цветов ХП-5184, грунта ХП-0206 и шпатлевки ХП-0064 на основе хлорсульфированного полиэтилена [15]. В качестве вулканизирующего агента для хлорсульфированного полиэтилена в рецептурах эмали и шпатлевки использовали метилсилазан общей формулы $\{(CH_3)_2Si-NH[CH_3-Si(NH)_{1,5}]_m\}_n$, где $m=1-3$; $n>5$.

Испытания эмали ХП-5184 проводили в сравнении с другими композициями [16, 17] на основе хлорсульфированного полиэтилена (табл. 1).

Таблица 1

Рецептуры композиций на основе хлорсульфированного полиэтилена

Компоненты	Состав пленкообразующей композиции, % (по массе)	
	1	2
Хлорсульфированный полиэтилен с молекулярной массой 25000 (2% серы и 28% хлора)	100	100
Оксид магния	5	5
Диоксид титана	50	50
Эпоксидная смола Э-41	5	5
Канифоль	5	5
Каптакс	1	1
Гуанидин	1	1
Оксид сурьмы	–	10

Как показали сравнительные результаты испытаний эмали ХП-5184, композиций 1 и 2 и покрытия с эмалями ХВ-16 и АС-131 (табл. 2), при использовании метилсилазана светостойкость эмали ХП-5184 существенно увеличивается по сравнению со светостойкостью композиций 1 и 2.

Таблица 2

Свойства эмалей на основе хлорсульфированного полиэтилена

Свойства	Значения свойств			
	композиции 1	композиции 2	эмали ХП-5184	покрытия с эмалью ХВ-16 и АС-131
Эрозионная стойкость на установке «Тайфун» при толщине 180–220 мкм, циклы	18	18	15	1,2–2
Ударная упругость, число ударов (с энергией 5 кгс·м) до разрушения покрытия	10	10	10	1
Светостойкость покрытия белого цвета (испытания под кварцевой лампой в течение 100 ч)	Изменение цвета до коричневого		Практически без изменения цвета	Без изменения цвета
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц	4,5–5	4,5–5	4,0–4,5	3,2–3,5
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц	0,05–0,07	0,05–0,07	0,045–0,065	0,02–0,03
Твердость по маятниковому прибору типа М-3, усл. ед.	0,15–0,17	0,15–0,17	0,36–0,4	0,4–0,45
Стабильность композиции при хранении (жизнеспособность)	Менее 10 сут		Более 6 мес	

Для повышения радиопрозрачности в рецептуру шпатлевки ХП-0064 вместо диоксида титана вводили в том же количестве пустотелые микросферы из оксида алюминия [15]. В табл. 3 и 4 представлены основные свойства эмали ХП-5184 и шпатлевки ХП-0064.

Таблица 3

Основные технические характеристики эмали ХП-5184

Свойства	Значения свойств
Цвет пленки эмали	Белый, серый
Внешний вид пленки эмали	Однородная
Условная вязкость полуфабриката эмали по вискозиметру типа ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм при 20±0,5 °С, с	90–150
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката эмали, %	30±3
Время высыхания до степени 3, ч (не более), при температуре, °С: 20±2 70±2	24 3
Твердость пленки по маятниковому прибору типа М-3, усл. ед. (не менее)	0,22
Прочность пленки при ударе, см (не менее)	50
Стойкость покрытия к статическому действию воды при температуре 20±2 °С, ч (не менее)	3
Тангенс угла диэлектрических потерь покрытия при частоте 1–5 МГц (не более)	0,065
Диэлектрическая проницаемость покрытия при частоте 1–5 МГц (не более)	5,2
Эрозионная стойкость, цикл (не менее)	10

Таблица 4

Основные технические характеристики шпатлевки ХП-0064

Свойства	Значения свойств по ТУ6-10-1937–84
Цвет пленки шпатлевки	Белый
Внешний вид пленки шпатлевки	Однородная
Условная вязкость полуфабриката шпатлевки по вискозиметру типа ВЗ-246 (ВЗ-4) с диаметром сопла 4 мм при температуре 20±0,5 °С, с	30–120
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката шпатлевки, %	26±3
Время высыхания до степени 3 при температуре 80±2 °С, ч (не более)	3
Жизнеспособность после смешения компонентов, ч (не менее)	6
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	3
Твердость покрытия по маятниковому прибору М-3, усл. ед. (не менее)	0,13
Способность шпатлевки к нанесению на поверхность	Должна хорошо наноситься на окрашиваемую поверхность краскораспылителем при рабочей вязкости

Недостаточная адгезия к стеклопластикам эмалей ХП-5184 и шпатлевки ХП-0064 потребовала разработки специальной грунтовки ХП-0206. Основная проблема при этом заключалась в том, что в стандартные смеси можно ввести только 5% (по массе) эпоксидной смолы. Введения 30% (по массе) эпоксидной смолы удалось добиться только благодаря использованию в качестве растворителя циклогексанона в смеси с толуолом.

Основные свойства грунтовки ХП-0206 представлены в табл. 5.

Для повышения влагозащитных свойств и радиопрозрачности систем покрытий с эмалью ХП-5184 разработана эпоксидная шпатлевка ЭП-0065 (табл. 6), в состав которой, так же как и в состав шпатлевки ХП-0064, входят пустотелые микросферы из оксида алюминия.

Эмаль ХП-5184 в системах с грунтовкой ХП-0206 и шпатлевками ХП-0064 и ЭП-0065 применяли для защиты антенных обтекателей самолетов Ту-154 и Ил-76.

Особенностью систем покрытий с эмалью ХП-5184 является применение грунтовки ХП-0206 и шпатлевок (ХП-0064, ЭП-0065), которые (помимо основного своего назначения как выравнивающего слоя) обладают эрозионной стойкостью, поэтому их наносят сплошным слоем на всю поверхность детали.

Таблица 5

Основные технические характеристики грунтовки ХП-0206

Свойства	Значения свойств
Цвет пленки грунтовки	Зеленый
Внешний вид пленки грунтовки	Однородная
Условная вязкость полуфабриката грунтовки по вискозиметру типа ВЗ-246 (ВЗ-4) с диаметром сопла 4 мм при температуре 20±0,5 °С, с	100–160
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката грунтовки, %	26±3
Время высыхания до степени 3, ч (не более), при температуре, °С:	
20±2	24
70±2	3
Жизнеспособность после смешения компонентов, ч (не менее)	6
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	1
Адгезия, балл (не более)	1
Адгезия эмали ХП-5184 к грунтовке, балл (не более)	1

Таблица 6

Основные технические характеристики шпатлевки ЭП-0065

Свойства	Значения свойств
Цвет шпатлевочного слоя	Красный, оттенок не нормируется
Внешний вид шпатлевочного слоя	После высыхания шпатлевка должна образовывать однородную, без пузырей и посторонних включений поверхность
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката шпатлевки, %	85–90
Время высыхания до степени 3 при температуре 80±2 °С, ч (не более)	3
Срок годности шпатлевки после смешения компонентов, ч	6
Твердость шпатлевочного слоя по маятниковому прибору типа ТМЛ (маятник А), усл. ед. (не менее)	0,12
Эластичность шпатлевочного слоя при изгибе, мм (не более)	15,0
Способность шпатлевки к нанесению на поверхность	Должна хорошо наноситься на окрашиваемую поверхность краскораспылителем при рабочей вязкости

Высокой термостойкостью (до 175 °С) обладает эмаль ERC-5, которая при толщине 300 мкм в системе с грунтовкой PR-143 выдерживает 30 циклов воздействия абразивом на установке «Тайфун» и имеет $\epsilon=3,5$ и $\text{tg}\delta=0,06$ при частоте 10^6 Гц.

Однако эмаль ERC-5 является негрибостойкой, а после воздействия температуры ≥ 135 °С у покрытия начинается изменение цвета – и тем более заметное, чем выше температура.

Указанных недостатков лишена эмаль КЧ-5185 (табл. 7) с термостойкостью 250 °С, впервые созданная на основе фторкаучука и γ -аминопропилтриэтоксисилана в качестве вулканизирующего агента, а также разработанные фторопластовая эмаль ФП-5105 (табл. 8) и эпоксидно-полиамидная грунтовка ЭП-0104 (табл. 9), которые обязательно применяют в системах с эмалью КЧ-5185 [16, 18].

Эрозионная стойкость эмали КЧ-5185 при толщине покрытия 120 мкм составляет 15 циклов. Характерной особенностью материалов на основе эластомеров является зависимость интенсивности эрозионного износа от толщины покрытия, что особенно заметно проявляется при толщине <100 мкм. Поэтому эрозионностойкие эмали на основе эластомеров наносятся толщиной не менее 120 мкм. Как показали исследования, проведенные в 2018 г. (магистерская работа Н.Д. Найденова «Исследование эрозионной стойкости систем покрытий на основе фторсополимерных и эпоксикаучуковых композиций»), эрозионная стойкость фторкаучуковых покрытий может быть повышена не менее чем в 1,5 раза за счет замены части дисперсного наполнителя на армирующий.

Таблица 7

Основные технические характеристики эмали КЧ-5185

Свойства	Значения свойств
Цвет пленки эмали	Серый, белый
Внешний вид пленки эмали	Однородная, матовая
Условная вязкость полуфабриката эмали по вискозиметру ВЗ-4 с диаметром сопла 4 мм при температуре 20±0,5 °С, с	20–80
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката эмали, %	15–24
Время высыхания до степени 3, ч (не более), при температуре, °С: 20±2 120±2	24 2
Жизнеспособность после смешения компонентов, ч (не менее)	24
Твердость покрытия по маятниковому прибору М-3, усл. ед. (не менее)	0,2
Прочность пленки при ударе, см (не менее)	50
Стойкость покрытия к статическому действию воды при температуре 20±2 °С, ч (не менее)	3
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ⁶ Гц (не более)	0,2
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц (не более)	9

Таблица 8

Основные технические характеристики эмали ФП-5105

Свойства	Значения свойств
Цвет пленки эмали	Белый, темно-серый, оттенок не нормируется
Внешний вид пленки эмали	После высыхания пленка должна быть ровной, однородной, полуматовой, без посторонних включений
Условная вязкость полуфабриката эмали по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм, при температуре 20 °С, с	20–50
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката эмали, %	17–20
Время высыхания до степени 3 при температуре 120±2 °С, ч	3
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	1
Твердость пленки эмали по прибору типа М-3, усл. ед. (не менее)	0,6
Стойкость пленки к действию воды при температуре 20 °С, ч (не менее)	5
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц	3–5
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ⁶ Гц (не более)	0,03
Теплостойкость при температуре 300 °С, ч (не менее)	4

Указанные лакокрасочные покрытия используют в системах покрытий, которые состоят из нескольких слоев различного назначения. Так, эмаль КЧ-5185, как правило, применяют в системе, состоящей из выравнивающего шпатлевочного слоя, адгезионного грунта, влагозащитного слоя и самой эмали КЧ-5185 как эрозионностойкого слоя.

При нанесении влагозащитного слоя эмали ФП-5105 не только на адгезионный грунт, но и на слой эмали КЧ-5185, эрозионная стойкость такой системы покрытий возрастает на 30%, хотя при этом толщина системы покрытий увеличивается до 200 мкм.

При окраске деталей конструкционного назначения для снятия электростатического заряда в систему на основе эмалей КЧ-5185 и ХП-5184 может быть введена электропроводящая грунтовка ЭП-0181. При этом конструктивно решен вопрос об обеспечении электрического контакта грунтовки с металлическими частями изделия. При необходимости проведения ремонта применяют специальную смывку [19].

При выполнении магистерской работы также показано, что эрозионная стойкость системы покрытий с эмалью КЧ-5185 толщиной 150–155 мкм в 3 раза превышает эрозионную стойкость системы покрытий с эмалью ЭП-5236 той же толщины.

Основные показатели, контролируемые при производстве и применении грунтовок ЭП-0104

Свойства	Значения свойств
Цвет пленки грунтовки	Белый, зеленый, оттенок не нормируется
Внешний вид пленки грунтовки	Высохшая пленка грунтовки должна быть матовой, однородной, без посторонних включений
Условная вязкость полуфабриката грунтовки по вискозиметру ВЗ-4 с диаметром сопла 4 мм при температуре 20 °С, с	11–13
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката грунтовки, %	35–40
Время высыхания пленки до степени 3 при температуре 70 °С, ч	1
Эластичность пленки при изгибе, мм (не более)	1
Термостойкость при температуре 200 °С, ч	3 (не допускаются отслаивание и вздуывание пленки; допускается изменение цвета в сторону потемнения или пожелтения)
Адгезия эмалей ФП-566 (ТУ6-10-617–75) или ФП-5105 (ТУ6-10-954–70) к грунтовке после увлажнения образцов в воде при температуре 20±2 °С в течение 24 ч – по методу решетчатых надрезов, балл (не более)	1

Анализируя достигнутый уровень эрозионной стойкости эластомерных лакокрасочных покрытий авиационного назначения, следует отметить, что максимальную эрозионную стойкость (30 циклов при толщине 300 мкм) имеет импортное полиуретановое покрытие ERC-5.

Применительно к антенным обтекателям толщина эрозионностойкого покрытия зависит от его диэлектрических свойств – чем меньше диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, тем большей толщины можно нанести эрозионностойкое покрытие. Поэтому покрытие ERC-5 наносят толщиной до 300 мкм, а эмаль КЧ-5185 – толщиной 120–155 мкм.

В том случае, когда требование по радиопрозрачности отсутствует, эрозионностойкие покрытия для защиты винтовентиляторных и компрессорных лопаток из ПКМ можно нанести толщиной >500 мкм [20–22], так как при этом достигается максимальная защита от эрозионных разрушений.

Разработку более эрозионностойких лакокрасочных покрытий необходимо осуществлять с учетом современных тенденций создания авиационной техники нового поколения [23–25].

Заключения

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» эрозионностойкие эпоксидные и эластомерные покрытия способны обеспечить устойчивую эксплуатацию авиационной техники различного назначения.

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» эрозионностойкие радиопрозрачные фторкаучуковые системы покрытий по уровню термостойкости значительно превосходят зарубежную эмаль ERC-5.

Определены направления дальнейшего повышения эрозионной стойкости фторкаучуковых покрытий.

Библиографический список

1. 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: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №2 (86). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-81-90.

2. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 296 с.
3. 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.
4. 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.
5. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности и эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
6. Эрозия / пер. с англ. под ред. Ю.В. Полежаева. М.: Мир, 1982. 464 с.
7. Кашеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. М.: Наука, 1970. 248 с.
8. Клейс И.Р. Теория трения, износа и проблемы стандартизации. Брянск: Приок. кн. изд-во, 1978. 387 с.
9. Ратнер А.В., Зелинский В.Г. Эрозия материалов теплоэнергетического оборудования. М.; Л.: Энергия, 1966. 271 с.
10. Урванцев Л.А. Эрозия и защита металлов. М.: Машиностроение, 1966. 235 с.
11. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М.: Высшая школа, 1970. 424 с.
12. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1964. 139 с.
13. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 246 с.
14. Кондрашов Э.К. Термостойкие кремнийорганические шпатлевки // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №10 (58). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-7-7.
15. Кондрашов Э.К. Эрозионностойкая радиопрозрачная эмаль ВЭ-14 // Авиационная промышленность. 1976. №1. С. 67–68.
16. Гольдберг М.М. Материалы для лакокрасочных покрытий. М.: Химия, 1972. 344 с.
17. Лакокрасочные материалы: справочник / под ред. И.Н. Сапгира. М.: Изд-во хим. лит., 1961. 506 с.
18. Лакокрасочные материалы. Технические требования и контроль качества: справ. пособие: в 2 т. М.: Химия, 1977. Т. 2. 286 с.
19. 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.
20. Elastomer coated layer for erosion and/or fire protection: pat. US5908528; field 16.04.98; publ. 06.01.99.
21. Elastomer coated layer for erosion and/or fire protection: pat. US5912195; field 16.04.98; publ. 15.06.99.
22. 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://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.
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.