



УДК 667.64:62-492.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-7-7

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Л.В. Семенова

кандидат технических наук

Э.Я. Бейдер

кандидат технических наук

Г.Н. Петрова

кандидат технических наук

Н.И. Нефедов

Август 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Л.В. Семенова¹, Э.Я. Бейдер¹, Г.Н. Петрова¹, Н.И. Нефедов¹

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Приведены основные электрические характеристики покрытий из отечественных порошковых красок, лакокрасочных материалов (ЛКМ) и компаундов: удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, пробивное напряжение, диэлектрическая проницаемость. Рассмотрены свойства покрытий как в исходном состоянии, так и после теплового старения на воздухе и в гидростате.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы, порошковые покрытия, электроизоляционные свойства покрытий, компаунды.

L.V. Semyonova, E.Ya. Beyder, G.N. Petrova, N.I. Nefyodov

ELECTRO-INSULATIVE PROPERTIES OF POLYMER COATINGS

The basic electrical characteristics of domestic powder coatings, paint-and-lacquer materials (PLM) and compounds (specific volume electrical resistance, dielectric loss tangent, the breakdown voltage, dielectric constant) are adduced. The properties of the coatings, as in the initial state and after thermal aging in air and hydrostat were considered.

Keywords: paint-and-lacquer materials, powder coatings, electro-insulative properties of coatings, compounds.

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

Технический уровень современных электрических машин, электронной и радиоаппаратуры в значительной степени определяется характеристиками электротехнических материалов. Важнейшие технико-экономические показатели указанного оборудования (масса, габарит, мощность, надежность, технологичность, трудоемкость изготовления и др.) зависят от качества применяемых материалов. Среди материалов электротехнического назначения большой объем принадлежит полимерам и синтетическим смолам. На долю электротехнической промышленности приходится 20% применения этих материалов.

Новым направлением в электротехнике является изоляция различного вида деталей и оборудования покрытиями из полимерных порошковых красок, лакокрасочных материалов и компаундов [1–3]. Материалы для таких покрытий наряду с высокими диэлек-

трическими и механическими свойствами должны обладать термической стабильностью и влагостойкостью, которые позволят сохранить длительную работоспособность покрытия при заданных силе тока и напряжении, а также выдерживать большие нагрузки и повышенные температуры без изменения своих характеристик [4–8].

Основные электрические свойства покрытий из отечественных порошковых красок, лакокрасочных материалов и компаундов в исходном состоянии, а также после теплового старения на воздухе и в гидростате (при температурах 40–60°C и влажности 98%) приведены в табл. 1 и 2 [9].

Видно, что электрические свойства многих покрытий позволяют использовать их в качестве электроизоляционных материалов.

Малые величины диэлектрических характеристик и их высокая стабильность в широком диапазоне частот (рис. 1 и 2) позволяют применять покрытия из полиолефинов в высокочастотной технике. У сополимеров фторопластов с увеличением частоты выше 10^5 – 10^6 Гц диэлектрические потери существенно не возрастают.

При повышении температуры у всех полимеров наблюдается увеличение диэлектрических потерь (рис. 3 и 4).

Величина потерь зависит от материала пленкообразователя. Для компаунда ЭП-49А в области температур 393–413 К наблюдается максимум дипольно-релаксационных потерь. После перехода минимума значений при температуре 413 К покрытие ЭП-49А ведет себя аналогично другим материалам. Наименьшие потери с ростом температуры наблюдаются у фторопластов и эпоксидных компаундов УП-2155 и ЭВН-10.

Тепловое старение сначала, как правило, улучшает электрические характеристики покрытий, что объясняется удалением влаги из низкомолекулярных соединений и структурированием. С накоплением полярных групп в покрытии, связанным с термодеструкцией пленкообразователя, свойства начинают снижаться. Наиболее термостойкими являются покрытия Ф-40ДП, Ф-4МБ и ПДФ-10 (см. табл. 1).

Электрическое старение полимеров ускоряет влага, при поглощении которой растут диэлектрические потери и уменьшается электросопротивление. Гидрофобные полимеры (полиолефины, фторопласты, пентапласты), имеющие низкое водопоглощение, после выдержки в гидростате снижают свои характеристики незначительно, у гидрофильных (поливинилбутираль, компаунды ЭП-49Д и ЭП-49С) ρ_v снижается на 7–8 порядков, $\text{tg}\delta$ – на 1–2 порядка.

Таблица 1

Электрические свойства покрытий

Покрытие	Условия старения	Температура испытания, °С	ρ_v , Ом·см	$\text{tg } \delta$	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Пробивное напряжение E , кВ/см	
ПЭВП+4% (по массе) Cr_2O_3	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{15}	0,0015	2,6	20–30	
	В гидростате (8 сут)	20	$2 \cdot 10^{13}$	0,002	–	30	
ПЭВП+1,5% (по массе) сажи	Без старения (в исходном состоянии)	20	$2 \cdot 10^{12}$	0,01	3,3	30	
	В гидростате (8 сут)	20	$3 \cdot 10^{10}$	0,015	–	25	
ПЭВП (термостабилизированный)+1,5% (по массе) Cr_2O_3	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{15}	0,0013	–	30	
	На воздухе	100	10^{14}	0,0013	–	–	
ПЭНП (сшитый)	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{14}	0,0022	–	20	
	На воздухе	100	$7 \cdot 10^{11}$	0,0022	–	–	
ПВЛ-212	Без старения (в исходном состоянии)	20	$2 \cdot 10^{13}$	0,0045	3,8	20	
Пентапласт А-2	–«–	20	$2,5 \cdot 10^{16}$	0,0011	3,1	36–45	
Фторопласт Ф-30П	–«–	20	10^{16}	0,002	2,7–2,9	> 20	
Фторопласт Ф-40ДП	–«–	20	10^{16}	0,0014	3,1	> 20	
Фторопласт Ф-4МБ	–«–	20	$0,6 \cdot 10^{16}$	0,001	2,1–2,2	37	
П-ЭП-91 (серая)	–«–	20	$3 \cdot 10^{14}$	0,006	4,8	–	
П-ЭП-177:	серая	–«–	20	$3,8 \cdot 10^{16}$	0,004	4,2–4,5	35
		На воздухе	150	$3 \cdot 10^9$	0,31	6,49	17–19
	зеленая	В гидростате (30 сут)	20	$1,9 \cdot 10^{14}$	0,03	5,6	–
		Без старения (в исходном состоянии)	20	$3,1 \cdot 10^{16}$	–	–	40–45
П-ЭП-534 (серая)	–«–	20	$3,1 \cdot 10^{16}$	–	4,0–4,5	30–35	
	В гидростате (30 сут)	20	$6 \cdot 10^{15}$	–	5,5	–	
П-ЭП-971:	серая	Без старения (в исходном состоянии)	20	$1,5 \cdot 10^{15}$	0,049	3,9	95
	красно-коричневая	В гидростате (30 сут)	20	$1,7 \cdot 10^{15}$	0,04	3,4	65
ЭП-49А	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{16}	0,005	3,5	60–80	
	На воздухе	130	10^{10}	0,25	4,5	40–44	
	В гидростате (56 сут)	20	10^{12}	0,05	5,0	31–43	
ЭП-49Д	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{16}	0,006	4,0	55–70	
	На воздухе	130	10^9	0,8	5,5	25–35	
	В гидростате (56 сут)	20	10^7	0,8	6,0	19–22	
ЭП-49С	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{15}	0,02	4,3	30	
	В гидростате (56 сут)	20	$6 \cdot 10^8$	0,5	16,0	7,5	
УП-2155	Без старения (в исходном состоянии)	20	$8 \cdot 10^{15}$	0,002*	3,05	40	
	В гидростате (56 сут)	20	$4 \cdot 10^{15}$	0,034*	3,8	40	
ЭВН-10	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{13}	0,01	3,5	54–64	
	На воздухе	130	10^{11}	0,05	3,8	30–35	
	В гидростате (56 сут)	20	10^{12}	0,14	3,6	18–20	
ПДФ-10	Без старения (в исходном состоянии)	20	10^{15}	0,01	3,0	50–60	
	На воздухе	250	10^{12}	0,03	3,5	15–20	
	В гидростате (56 сут)	20	10^{14}	0,01	3,5	20–25	

* Характеристики определены при частоте 10^6 Гц, в остальных случаях – при 10^3 Гц.

Влияние теплового старения на электроизоляционные свойства покрытий

Покрытие	Условия старения		ρ_v , Ом·см	tg δ	Электри- ческая прочность U , кВ/мм	Диэлектри- ческая проницае- мость ϵ
	темпе- ратура, °С	продолжи- тельность, ч				
ПЭВП+4% (по массе) Cr_2O_3	70	200	10^{15}	0,001	–	3,1
		500	10^{15}	0,0009	–	3,0
ПЭВП+1,5% (по массе) сажи ПВЛ-212	70	500	10^{12}	0,022	–	3,9
		500	10^{15}	0,0018	–	3,9
Пентапласт А-2	120	1000	$2,5 \cdot 10^{16}$	0,0011	35–40	3,1
Фторопласт Ф-30П	130	500	10^{16}	0,0015	>20	2,7–2,9
Фторопласт Ф-4МБ	200	1000	$5,4 \cdot 10^{17}$	0,0015	20	2,1
П-ЭП-91 (серая)	120	1000	$2,8 \cdot 10^{13}$	0,004	–	4,5
П-ЭП-177 (серая)	130	1000	$4,5 \cdot 10^{16}$	0,003	40	3,8
		180	100	$2,0 \cdot 10^{16}$	–	20
ЭП-49А	180	500	$2,5 \cdot 10^{15}$	–	25	–
		100	$9,6 \cdot 10^{16}$	–	17	–
УП-2155	200	100	$(4,5–6,8) \cdot 10^{16}$	–	34	–
		1000	$5,5 \cdot 10^{15}$	–	28	–

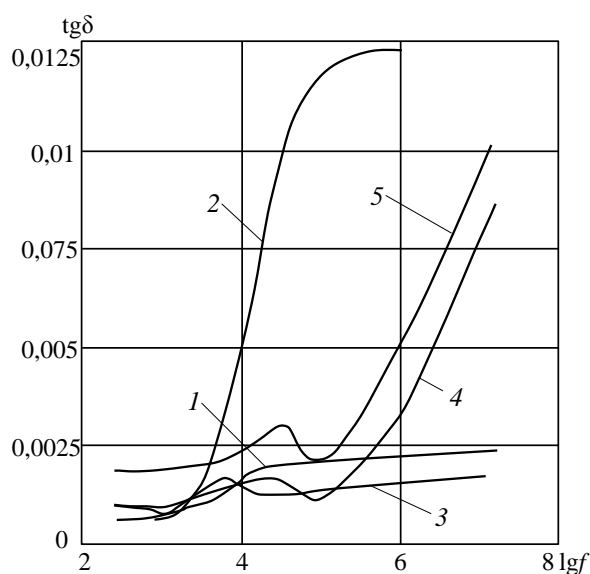


Рисунок 1. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь покрытий от частоты f :

1 – ПЭВП (сшитый); 2 – ПЭВП (сшитый; после старения в воздушной среде при 100°C , 500 ч); 3 – ПЭВП (термостабилизированный); 4 – фторопласт Ф-40ДП; 5 – фторопласт Ф-30П

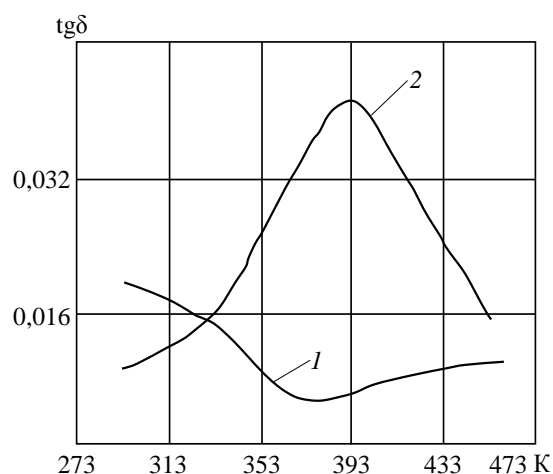


Рисунок 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь покрытия из фторопласта Ф-3 от температуры при частоте 10^3 (1) и 10^6 Гц (2)

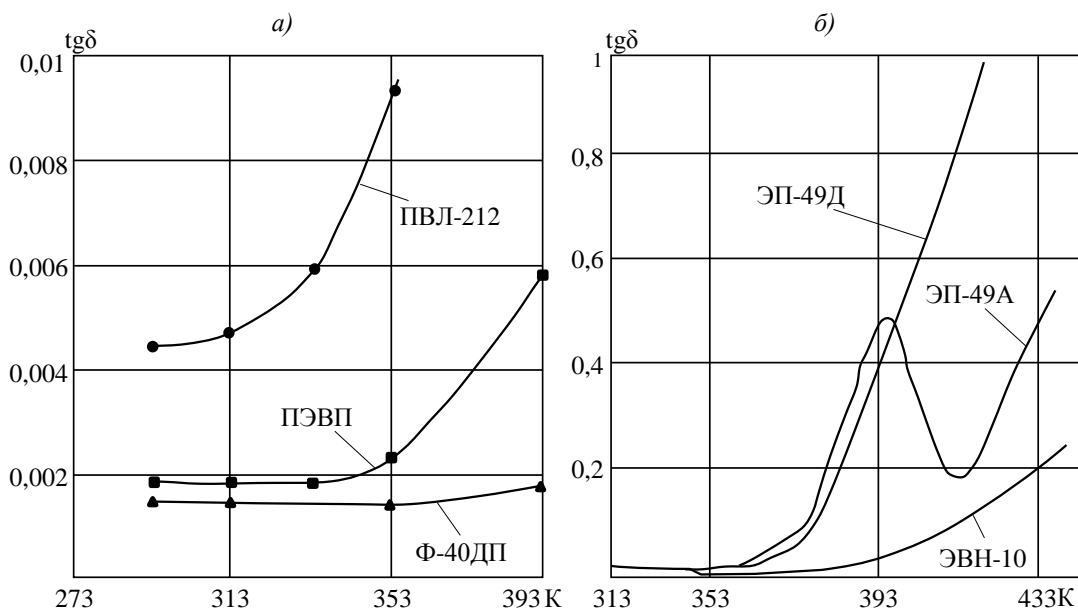


Рисунок 3. Влияние температуры на тангенс угла диэлектрических потерь покрытий из термопластичных (а) и терморективных полимеров (б)

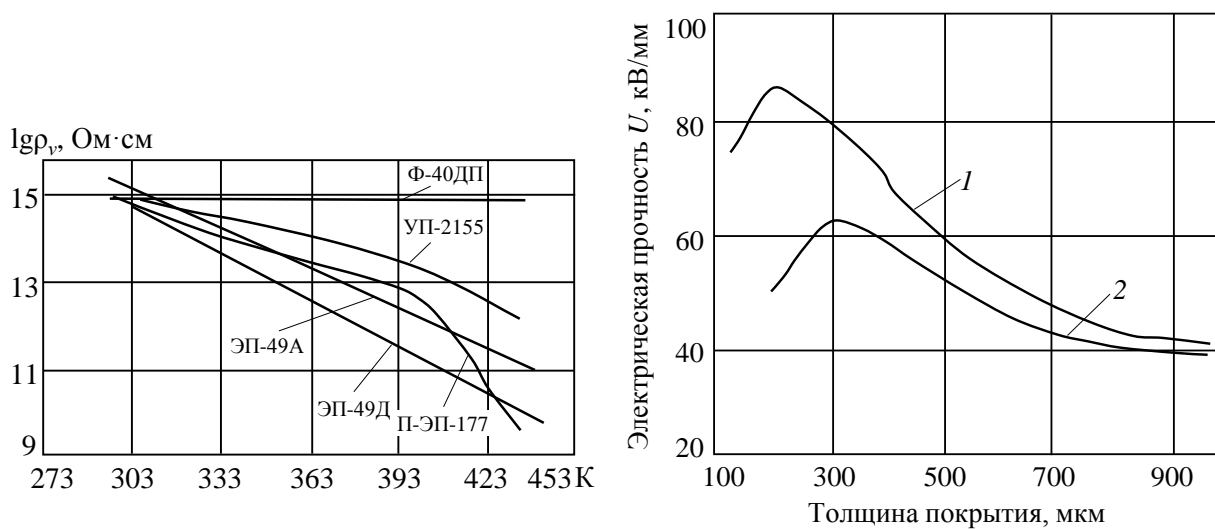


Рисунок 4. Зависимость удельного объемного сопротивления ρ_v покрытий от температуры

Рисунок 5. Зависимость электрической прочности напыленных покрытий ЭП-49А (1) и ЭВН-10 (2) от их толщины

В целом по электрическим свойствам порошковые покрытия лучше покрытий на основе лакокрасочных изоляционных материалов и несколько уступают пленочным, которые характеризуются высокой однородностью и сплошностью [10]. Известно, что из порошковых полимеров чрезвычайно трудно получать сплошные, без точечных несквозных пор, покрытия толщиной менее 100 μm [11], поэтому в отличие от лакокрасочных и полимерных пленок электрическая прочность порошковых покрытий проходит через максимум значений (рис. 5). Оптимальная толщина электроизоляционных

покрытий составляет 200–400 мкм. С увеличением толщины вероятность образования пор и других включений возрастает, и электрическая прочность любых полимерных диэлектриков, в том числе покрытий, снижается [12–14].

Приведенные результаты подтверждают возможность использования порошковых материалов в качестве изоляции в электроизоляционной технике. Наиболее эффективно применение порошковых красок, лакокрасочных материалов и компаундов для изоляции пазов и полюсов малогабаритных электрических машин переменного и постоянного тока, изолирования шин распределительных устройств и инструмента, корпусной изоляции приборов и аппаратов, влагозащиты и электроизоляции плат печатного монтажа, герметизации обмоток малогабаритных трансформаторов, дросселей, сопротивлений, конденсаторов, резисторов и многих других деталей электротехнического и радиоэлектронного оборудования, а также комплексной защиты изделий, работающих в контакте с жидкими или газообразными агрессивными средами, например аккумуляторов, топливо- и маслоизмерительной аппаратуры и др. [15–20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение. 1978. С. 214–220.
2. Варденбург А.К., Пилипосян П.М. Электрическая напыленная изоляция. М.: Энергоатомиздат. 1984. С. 43–45.
3. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
5. 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.
6. Лакокрасочные покрытия /В кн. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий; Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука. 2007. С. 152–158, 326.
7. Лакокрасочные покрытия /В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 319–329.
8. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А., Малова Н.Е. Развитие авиационных лакокрасочных материалов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 49–54.

9. 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.
10. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Свойства покрытий из порошковых красок //Авиационные материалы и технологии. 2003. №2. С. 61–73.
11. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Электроизоляционные свойства порошковых покрытий /В сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2003. №2. С. 73–78.
12. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Кондрашов Э.К. Покрытия из порошковых фторопластов //Пластические массы. 2013. №1. С. 50–52.
13. Семенова Л.В., Малова Н.Е., Кузнецова В.А., Пожого А.А. Лакокрасочные материалы и покрытия //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 315–327.
14. 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.
15. Бейдер Э.Я., Донской А.А., Железина Г.Ф., Кондрашов Э.К., Сытый Ю.В., Сурнин Е.Г. Опыт применения фторполимерных материалов в авиационной технике //Российский химический журнал. 2008. Т. LI. №3. С. 30–44.
16. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Тенденции развития в области конформных покрытий для влагозащиты и электроизоляции плат печатного монтажа и элементов радиоэлектронной аппаратуры //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 50–52.
17. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Нанесение лакокрасочных покрытий методом «сырой по сырому» //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 39–42.
18. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Оносова Л.А. Исследование процессов отверждения фторполимерных композиций //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №11. С. 23–27.
19. Ларионов С.А., Деев И.С., Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Влияние углеродных наполнителей на электрофизические, механические и реологические свойства полиэтилена //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 04 (viam-works.ru).
20. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Влияние полимерных покрытий на усталостно-коррозионную прочность металлов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Термопластичные материалы». М.: ВИАМ. 2004. С. 23–28.

REFERENCES LIST

1. Chebotarevskij V.V., Kondrashov Je.K. Tehnologija lakokrasochnyh pokrytij v mashinostroenii [Coatings technology in mechanical engineering]. M.: Mashinostroenie. 1978. S. 214–220.
2. Vardenburg A.K., Piliposjan P.M. Jelektricheseskaja napylenaja izoljacija [Electrical insulation sputtered]. M.: Jenergoatomizdat. 1984. S. 43–45.
3. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
4. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
5. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
6. Lakokrasochnye pokrytija [Paintwork] /V kn. Istorija aviacionnogo materialovedenija: VIAM – 75 let poiska, tvorcestva, otkrytij /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: Nauka. 2007. S. 152–158, 326.
7. Lakokrasochnye pokrytija [Paintwork] /V kn. Istorija aviacionnogo materialovedenija. VIAM – 80 let: gody i ljudi /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: VIAM. 2012. S. 319–329.
8. Kondrashov Je.K., Kuznecova V.A., Semenova L.V., Lebedeva T.A., Malova N.E. Razvitie avi-acionnyh lakokrasochnyh materialov [Development of aircraft paints and varnishes] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2012. №5. S. 49–54.
9. Kondrashov Je.K., Kuznecova V.A., Semenova L.V., Lebedeva T.A. Osnovnye napravlenija povyshenija jekspluatacionnyh, tehnologicheskikh i jekologicheskikh harakteristik lakokrasochnyh pokrytij dlja aviacionnoj tehniki [Main directions of operational, technological and environmental performance coatings for aircraft] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 96–102.
10. Bejder Je.Ja., Petrova G.N. Svojtva pokrytij iz poroshkovyh krasok [Coating properties of powder coatings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2003. №2. S. 61–73.
11. Bejder Je.Ja., Petrova G.N. Jelektroizoljacionnye svojtva poroshkovyh pokrytij [Dielectric properties of powder coatings] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. M.: VIAM. 2003. №2. S. 73–78.
12. Bejder Je.Ja., Petrova G.N., Kondrashov Je.K. Pokrytija iz poroshkovyh ftoroplastov [Powder coating of fluoropolymers] //Plasticheskie massy. 2013. №1. S. 50–52.

13. Semenova L.V., Malova N.E., Kuznecova V.A., Pozhoga A.A. Lakokrasochnye materialy i pokrytija [Coating materials and coating] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 315–327.
14. Semenova L.V., Rodina N.D., Nefedov N.I. Vlijanie sherohovatosti sistem lakokrasochnyh pokrytij na jekspluatacionnye svojstva samoletov [The effect of roughness of coatings systems on aircraft performance characteristics] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 37–40.
15. Bejder Je.Ja., Donskoj A.A., Zhelezina G.F., Kondrashov Je.K., Sytyj Ju.V., Surnin E.G. Opyt primenenija ftorpolimernyh materialov v aviacionnoj tehnike [Experience in the application of fluoropolymer materials in aeronautical engineering] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2008. T. LII. №3. S. 30–44.
16. Nefedov N.I., Semenova L.V. Tendencii razvitija v oblasti konformnyh pokrytij dlja vlagozashhity i jelektroizoljacji plat pechatnogo montazha i jelementov radiojelektronnoj apparatury [Development trends in the field of conformal coatings for electrical insulation and moisture protection of printed circuit boards and electronic equipment components] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 50–52.
17. Nefedov N.I., Semenova L.V. Nanesenie lakokrasochnyh pokrytij metodom «syroj po syromu» [Paint coating method «on a wet soggy»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 39–42.
18. Nefedov N.I., Semenova L.V., Onosova L.A. Issledovanie processov otverzhdjenja ftorpolimernyh kompozicij [Study of curing processes fluoropolymer compositions] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2013. №11. S. 23–27.
19. Larionov S.A., Deev I.S., Petrova G.N., Bejder Je.Ja. Vlijanie uglerodnyh napolnitelej na jelektrofizicheskie, mehanicheskie i reologicheskie svojstva polijetilena [Influence of carbon fillers on the electrical, mechanical and rheological properties of polyethylene] //Trudy VIAM. 2013. №9. St. 04 (viam-works.ru).
20. Bejder Je.Ja., Petrova G.N. Vlijanie polimernyh pokrytij na ustalostno-korrozionnuju prochnost' metallov [Effect of polymeric coatings on the corrosion-fatigue strength of metals] /V sb. Avi-acionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Termoplastichnye materialy». M.: VIAM. 2004. S. 23–28.