

УДК 666.29

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.31

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN mazwau

DOI 10.62980/2076-0655-2025-156-163

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Пчельников А.В., Пичугин А.П., Искандаров М.Х., Илясов А.П.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (НГАУ)

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования влияния различных наноматериалов (углеродных нанотрубок, оксида висмута, диоксида кремния) на эксплуатационные характеристики эмалей АС-182 и ПФ-115, широко применяемых для окрашивания металлических поверхностей строительных конструкций и оборудования. Образцы на основе выбранных эмалей, без добавления наноматериалов, демонстрируют общую тенденцию к снижению физико-механических характеристик в процессе старения покрытий (свойства покрытий снижаются в 1,5–3 раза). Введение наноматериалов способствует увеличению адгезионной прочности и устойчивости к деформационным воздействиям, антистатичности покрытий до двух и более раз. Причем эксплуатационные качества покрытий сохраняются на высоком уровне длительное время, что показали результаты термического старения покрытий. Наибольшую стабильность показывают образцы с добавкой углеродных нанотрубок в лакокрасочный материал АС-182: покрытия сохраняют свои антистатические и электропроводящие качества, что характеризует повышенную долговечность покрытий в условиях эксплуатации, обеспечивая надежную защиту металлических поверхностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические поверхности, лакокрасочные материалы, защитные покрытия, наноматериалы, наноструктурированные покрытия, углеродные нанотрубки, нанодобавки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пчельников А.В., Пичугин А.П., Искандаров М.Х., Илясов А.П. Оценка эксплуатационных характеристик наноструктурированных защитных покрытий металлических поверхностей // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 156-163. DOI 10.62980/2076-0655-2025-156-163, EDN mazwau

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN mazwau

DOI 10.62980/2076-0655-2025-156-163

EVALUATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF NANOSTRUCTURED PROTECTIVE COATINGS OF METAL SURFACES

Pchelnikov A.V., Pichugin A.P., Iskandarov M.H., Ilyasov A.P.

Federal State State-Funded Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Agricultural University" FSBEI HE Novosibirsk SAU

ABSTRACT

The article presents the results of a study of the influence of various nanomaterials (carbon nanotubes, bismuth oxide, silicon dioxide) on the performance characteristics of AC-182 and PF-115 enamels, widely used for painting metal surfaces of building structures and equipment. Samples based on the selected enamels, without the addition of nanomaterials, demonstrate a general tendency to reduce the physical and mechanical characteristics during the aging of the coatings (the properties of the coatings decrease by 1.5-3 times). The introduction of nanomaterials helps to increase the adhesive strength and resistance to deformation effects, antistatic properties of the coatings up to two or more times. Moreover, the performance qualities of the coatings are maintained at a high level for a long time, which was shown by the results of thermal aging of the coatings. The greatest stability is demonstrated by samples with the addition of carbon nanotubes to the AC-182 paint and varnish material: the coatings retain their antistatic and electrically conductive qualities, which characterizes the increased durability of the coatings under operating conditions, providing reliable protection of metal surfaces.

KEY WORDS: metal surfaces, paints and varnishes, protective coatings, nanomaterials, nanostructured coatings, carbon nanotubes, nanoadditives.

FOR CITATION: Pchelnikov A.V., Pichugin A.P., Iskandarov M.H., Ilyasov A.P. Evaluation of performance characteristics of nanostructured protective coatings of metal surfaces // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. 32, No2. – Pp. 156 –163. DOI 10.62980/2076-0655-2025-156-163, EDN mazwau

ВВЕДЕНИЕ

INTRODUCTION

Металлические поверхности строительных конструкций и оборудования, эксплуатируемые в различных условиях необходимо защищать от внешних воздействий. Одним из наиболее распространенных способов защиты являются лакокрасочные покрытия, которые должны обладать определенным набором свойств, обеспечивающим эксплуатационную стойкость покрытия и надежную защиту металлических поверхностей в заданных условиях эксплуатации. Эффективным методом для улучшения технологических и эксплуатационных характеристик материалов является их наномодификация, что было положено в основу при проведении настоящего исследования [1-15].

Цель исследования: оценка влияния наномодификаторов на эксплуатационные характеристики защитных покрытий металлических поверхностей.

Материалы и методы исследования

При проведении испытаний принимались акриловые и пентафталевые лакокрасочные материалы (АС-182, ПФ-115), широко распространенные для окрашивания металлических изделий и конструкций, выбор которых обоснован в других исследованиях. Для модификации лакокрасочных материалов применялись составы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) – Россия, наночастиц оксида висмута (Bi_2O_3) – Китай), диоксида кремния (SiO_2) – Россия). Способ диспергирования наноматериалов – механическое смешение [1].

Адгезионная прочность лакокрасочных покрытий определялась в соответствии с ГОСТ 32299-2013 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва». Твердость покрытий оценивалась в соответствии с ГОСТ Р 54586-2011 «Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытия по карандашу». Эластичность покрытий при изгибе оценивалась в соответствии с ГОСТ 6806-2024 «Материалы лакокрасочные. Метод определения эластичности покрытия при изгибе». Термическое старение покрытий осуществлялось в соответствии с методикой ГОСТ 33291-2015 «Материалы лакокрасочные. Метод определения теплового воздействия». Оценка диэлектрических характеристик лакокрасочных покрытий проводилась в соответствии с известной методикой, описанной в патент РФ № 2778798.

Эксперименты и обсуждение результатов

По результатам оценки физико-механических характеристик лакокрасочных покрытий полученных на основе эмалей АС-182 и ПФ-115, определено влияние нанодобавок на изменение адгезионной прочности, твердости и эластичности при изгибе (таблица 1 и 2).

Образцы на основе эмали АС-182, демонстрирует общую тенденцию к снижению адгезионной прочности после термического старения. Так, адгезионная прочность эталонного образца АС-182 снижается с 2,0–2,2 МПа до 1,7–1,8 МПа после первого режима и до 1,6–1,8 МПа после второго режима. Аналогичное поведение наблюдается при введении наноматериалов. Например, для Bi_2O_3 -0,5% адгезионная прочность снижается с 2,7–2,8 МПа до 2,5–2,7 МПа после первого режима и до 2,2–2,3 МПа после второго режима.

Metal surfaces of building structures and equipment used in various conditions must be protected from external influences. One of the most common methods of protection is paint and varnish coatings, which must have a certain set of properties that ensure the operational durability of the coating and reliable protection of metal surfaces under specified operating conditions. An effective method for improving the technological and operational characteristics of materials is their nanomodification, which was the basis for this study [1-15].

The purpose or objectives of the study: to assess the influence of nanomodifiers on the performance characteristics of protective coatings of metal surfaces.

Materials and methods of research

Acrylic and pentaphthalic paints and varnishes (AC-182, PF-115) were used in the tests. They are widely used for painting metal products and structures, and their choice is justified in other studies. The paints and varnishes were modified using compositions based on carbon nanotubes (CNT) — Russia, bismuth oxide nanoparticles (Bi_2O_3) — China, silicon dioxide (SiO_2) — Russia. The nanomaterials were dispersed by mechanical mixing [1].

The adhesive strength of the paint and varnish coatings was determined in accordance with GOST 32299-2013 "Paints and varnishes. Determination of adhesion by the pull-off method". The hardness of the coatings was assessed in accordance with GOST R 54586-2011 "Paints and varnishes. Method for determining the coating hardness using a pencil". The bending elasticity of the coatings was assessed in accordance with GOST 6806-2024 "Paint and varnish materials. Method for determining the bending elasticity of the coating". Thermal aging of the coatings was carried out in accordance with the methodology of GOST 33291-2015 "Paint and varnish materials. Method for determining thermal impact". The dielectric characteristics of the paint and varnish coatings were assessed in accordance with the known methodology described in Russian patent No. 2778798.

Experiments and discussion of results

Based on the results of assessing the physical and mechanical characteristics of paint and varnish coatings obtained on the basis of enamels AC-182 and PF-115, the effect of nanoadditives on the change in adhesive strength, hardness and elasticity in bending was determined (Tables 1 and 2). Samples based on enamel AC-182 demonstrate a general tendency to decrease in adhesive strength after thermal aging. Thus, the adhesive strength of the reference sample AC-182 decreases from 2.0–2.2 MPa to 1.7–1.8 MPa after the first mode and to 1.6–1.8 MPa after the second mode. Similar behavior is observed when introducing nanomaterials. For example, for Bi_2O_3 -0.5%, the adhesive strength decreases from 2.7–2.8 MPa to 2.5–2.7 MPa after the first mode and to 2.2–2.3 MPa after the second mode.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭМАЛИ АС-182Table 1. Results of evaluation of physical and mechanical characteristics of paint and varnish coatings
based on enamel AC-182

Образец Sample	Среднее значение адгезии, МПа Характер отрыва Адгезионный (А) – Когезионный (К) Average adhesion value, MPa / Peeling be- havior Adhesive (A) - Cohesive (K)			Твердость Hardness			Минимальный диаметр стержня при изгибе покры- тия, мм Minimum diameter of the rod when bending the coating, mm		
	До старения Before aging	После 1-го режима ста- рения (125°С) After 1st ag- ing mode (125°С)	После 2-го режима старения (150°С) After the 2nd aging mode (150°С)	До ста- рения Before aging	1-й ре- жим 1st mode	2-й ре- жим 2nd mode	До старения Before aging	1-й режим 1st mode	2-й ре- жим 2nd mode
Эталон Reference	2,0 – 2,2 А – 80 К – 20	1,7 – 1,8 А – 60 К – 40	1,6 – 1,8 А – 60 К – 40	НВ	3Н	6Н	3	5	10
Bi ₂ O ₃ - 0,5%	2,7 – 2,8 А – 30 К – 70	2,5 – 2,7 А – 40 К – 60	2,2 – 2,3 А – 60 К – 50	2Н	3Н	5Н		7	10
Bi ₂ O ₃ -1%	2,8 – 3,0 А – 10 К – 90	2,7 – 3,0 А – 40 К – 60	2,4 – 2,5 А – 50 К – 50	2Н	5Н	7Н		8	12
Bi ₂ O ₃ -2%	2,4 – 2,6 А – 30 К – 70	2,1 – 2,2 А – 40 К – 60	1,8 – 2,1 А – 80 К – 20	2Н	5Н	7Н		8	12
SiO ₂ -0,5%	2,1 – 2,2 А – 80 К – 20	1,8 – 1,9 А – 60 К – 40	1,6 – 1,8 А – 60 К – 40	Н	2Н	2Н		10	16
SiO ₂ -1%	2,3 – 2,5 А – 80 К – 20	2,2 – 2,4 А – 70 К – 30	1,9 – 2,1 А – 60 К – 40	2Н	4Н	5Н		8	12
SiO ₂ -2%	2,1 – 2,2 А – 80 К – 20	1,7 – 1,9 А – 50 К – 50	1,6 – 1,8 А – 60 К – 40	3Н	4Н	5Н		10	14
УНТ- 0,01%	2,4 – 2,6 А – 90 К – 10	2,1 – 2,3 А – 60 К – 40	1,9 – 2,0 А – 50 К – 50	Н	2Н	4Н		7	8
УНТ- 0,05%	3,1 – 3,3 А – 90 К – 10	2,9 – 3,1 А – 80 К – 20	2,8 – 3,0 А – 80 К – 20	2Н	3Н	4Н		5	7
УНТ- 0,1%	3,3 – 3,5 А – 50 К – 50	3,1 – 3,3 А – 50 К – 50	2,8 – 3,0 А – 40 К – 60	2Н	3Н	4Н		5	7

Твердость покрытий также изменяется после термического старения. У эталонного образца АС-182 увеличивается твердость с НВ до 3Н после первого режима и до 6Н после второго режима. Например, у таких образцов как Bi₂O₃-0,5%, наблюдается увеличение твердости с 2Н до 3Н после первого режима и до 5Н после второго режима, что указывает на упрочнение материала под воздействием температуры.

Образцы с добавками Bi₂O₃ и SiO₂, показывают значительные различия в изменении твердости. Особенно выраженное увеличение твердости наблюдается для добавок на основе Bi₂O₃ и SiO₂, что может указывать на различия в механизмах взаимодействия этих добавок с полимерной матрицей.

Результаты испытаний на изгиб свидетельствуют о том, что покрытия до воздействия термического старения показывают хорошую эластичность. Однако после термического старения они становятся хрупкими.

The hardness of the coatings also changes after thermal aging. The hardness of the reference sample AC-182 increases from HB to 3H after the first mode and to 6H after the second mode. For example, for samples such as Bi₂O₃-0.5%, an increase in hardness is observed from 2H to 3H after the first mode and to 5H after the second mode, which indicates strengthening of the material under the influence of temperature.

Samples with Bi₂O₃ and SiO₂ additives show significant differences in the change in hardness. A particularly pronounced increase in hardness is observed for additives based on Bi₂O₃ and SiO₂, which may indicate differences in the mechanisms of interaction of these additives with the polymer matrix.

The results of bending tests indicate that the coatings exhibit good elasticity before thermal aging. However, after thermal aging, they become brittle.

**ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭМАЛИ ПФ-115**
Table 2. Results of evaluation of physical and mechanical characteristics of paint and varnish coatings
based on enamel PF-115

Образец Sample	Среднее значение адгезии, МПа / Ха- рактер отрыва Адгезионный (А) – Когезионный (К) Average adhesion value, MPa / Peeling be- havior Adhesive (A) - Cohesive (K)			Твердость Hardness			Минимальный диаметр стержня при изгибе покры- тия, мм Minimum diameter of the rod when bending the coating, mm		
	До старения Before aging	После 1-го режима старения (125°C) After 1st aging mode (125°C)	После 2-го режима старения (150°C) After the 2nd aging mode (150°C)	До старе- ния Before aging	1-й ре- жим 1st mode	2-й ре- жим 2nd mode	До старения Before aging	1-й режим 1st mode	2-й ре- жим 2nd mode
Эталон Reference	1,5 – 1,7 А – 80 К – 20	1,1 – 1,3 А – 70 К – 30	1,0 – 1,2 А – 80 К – 20	НВ	2Н	2Н	3	5	12
Bi ₂ O ₃ - 0,5%	1,9 – 2,1 А – 30 К – 70	1,8 – 2,0 А – 40 К – 60	1,6 – 1,7 А – 60 К – 50	В	В	В		10	16
Bi ₂ O ₃ -1%	2,0 – 2,3 А – 10 К – 90	1,9 – 2,0 А – 40 К – 60	1,7 – 1,9 А – 50 К – 50	В	Н	4Н		10	12
Bi ₂ O ₃ -2%	1,8 – 2,0 А – 20 К – 80	1,6 – 1,8 А – 30 К – 70	1,1 – 1,5 А – 35 К – 65	НВ	Н	3Н		10	12
SiO ₂ -0,5%	1,4 – 1,6 А – 80 К – 20	1,2 – 1,4 А – 30 К – 70	1,0 – 1,2 А – 10 К – 90	В	НВ	2Н		10	16
SiO ₂ -1%	1,6 – 1,7 А – 80 К – 20	1,1 – 1,3 А – 50 К – 50	1,1 – 1,3 А – 30 К – 70	НВ	В	2Н		12	16
SiO ₂ -2%	1,4 – 1,6 А – 20 К – 80	1,2 – 1,5 А – 40 К – 60	1,1 – 1,3 А – 55 К – 45	НВ	Н	Н		12	16
УНТ- 0,01%	1,7 – 2,0 А – 70 К – 30	1,6 – 1,8 А – 60 К – 40	1,2 – 1,4 А – 50 К – 50	НВ	3Н	4Н		10	12
УНТ- 0,05%	2,1 – 2,4 А – 50 К – 50	1,6 – 1,7 А – 40 К – 40	1,5 – 1,7 А – 20 К – 80	НВ	3Н	5Н		8	10
УНТ- 0,1%	2,5 – 2,7 А – 55 К – 45	2,2 – 2,4 А – 50 К – 50	2,0 – 2,2 А – 50 К – 50	НВ	2Н	4Н		8	10

Видно, что хрупкость покрытий нарастает с каждым режимом до 16 мм стержня. Однако, покрытия, содержащие углеродные нанотрубки (УНТ), начинают разрушаться при 5 мм на первом режиме и 7 мм на втором режиме. Это говорит о том, что покрытие с добавкой УНТ сохраняет повышенную устойчивость к деформационным воздействиям с течением времени.

Наилучшие результаты показали наноструктурированные покрытия с добавлением УНТ. При этом покрытия отличаются повышенной адгезионной прочностью, прочностью при изгибе, а также оптимальным значением твердости, которые остаются в пределах удовлетворительных по результатам термического старения. Данные результаты характеризуют потенциальную эксплуатационную стойкость и долговечность покрытий, а также надежную защиту металлических поверхностей в различных условиях эксплуатации.

Покрытия на основе эмали ПФ-115, также демонстрируют снижение адгезионной прочности после

It is evident that the brittleness of the coatings increases with each mode up to 16 mm of the rod. However, the coatings containing carbon nanotubes (CNT) begin to deteriorate at 5 mm in the first mode and 7 mm in the second mode. This indicates that the coating with the addition of CNT retains increased resistance to deformation effects over time.

The best results were shown by nanostructured coatings with the addition of CNT. At the same time, the coatings are distinguished by increased adhesive strength, bending strength, and an optimal hardness value, which remain within the satisfactory limits according to the results of thermal aging. These results characterize the potential operational resistance and durability of the coatings, as well as reliable protection of metal surfaces under various operating conditions.

Coatings based on PF-115 enamel also demonstrate a decrease in adhesive strength after thermal aging. The adhesive strength of the reference sample (without additives) decreases from 1.4–1.6 MPa to 1.1–1.3 MPa after the first

термического старения. Адгезионная прочность эталонного образца (без добавок) снижается с 1,4–1,6 МПа до 1,1–1,3 МПа после первого режима и до 1,0–1,2 МПа после второго режима. Подобные изменения наблюдаются при введении различных наноматериалов. Например, адгезионная прочность образца с добавлением Bi_2O_3 -0,5% снижается с 1,9–2,1 МПа до 1,8–2,0 МПа после первого режима и до 1,3–1,5 МПа после второго режима.

Твердость покрытий также изменяется после термического старения. Для эталонного образца твердость увеличивается с НВ до 2Н после первого режима и остается на уровне 2Н после второго режима. Для других образцов, таких как Bi_2O_3 -0,5%, твердость изменяется с В до F после первого режима и остается на уровне F после второго режима.

Таким образом, при исследовании влияния нанодобавок на свойства покрытий, полученных на основе эмали ПФ-115, отсутствует ярко выраженное их положительное влияние на улучшение физико-механических характеристик. Немного лучшими, по сравнению с другими, обладают покрытия с добавлением УНТ 0,1%, однако, после термического старения, такие покрытия не обладают показателями эксплуатационных характеристик, способными обеспечить надежную защиту металлических поверхностей.

Одним из методов определения электрических свойств является определение показателя добротности (характеризующего потери энергии в системе) и ёмкости объекта на аппарате добротности, а также последующий математический расчет диэлектрических характеристик (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь). По значению тангенса угла диэлектрических потерь возможно оценить антистатические качества защитных покрытий, а по значению диэлектрической проницаемости изоляционные свойства. Результаты испытаний электрических свойств покрытий представлены в таблицах 3 и 4.

mode and to 1.0–1.2 MPa after the second mode. Similar changes are observed when introducing various nanomaterials. For example, the adhesive strength of the sample with the addition of Bi_2O_3 -0.5% decreases from 1.9–2.1 MPa to 1.8–2.0 MPa after the first mode and to 1.3–1.5 MPa after the second mode.

The hardness of the coatings also changes after thermal aging. For the reference sample, the hardness increases from HB to 2H after the first mode and remains at the level of 2H after the second mode. For other samples, such as Bi_2O_3 -0.5%, the hardness changes from B to F after the first mode and remains at the F level after the second mode.

Thus, when studying the effect of nanoadditives on the properties of coatings obtained on the basis of PF-115 enamel, there is no clearly expressed positive effect on improving the physical and mechanical characteristics. Coatings with the addition of 0.1% CNTs have slightly better performance compared to others, however, after thermal aging, such coatings do not have performance indicators capable of providing reliable protection of metal surfaces.

One of the methods for determining electrical properties is to determine the quality factor (characterizing energy losses in the system) and the capacity of the object on a quality factor apparatus, as well as subsequent mathematical calculation of the dielectric characteristics (dielectric constant and dielectric loss tangent). The dielectric loss tangent value can be used to evaluate the antistatic qualities of protective coatings, and the dielectric constant value can be used to evaluate the insulating properties. The results of testing the electrical properties of the coatings are presented in Tables 3 and 4.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭМАЛИ АС-182 ДО И ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Table 3. Results of evaluation of dielectric characteristics of coatings based on enamel AC-182 before and after thermal tests

Образец Sample	До термического старения Before thermal aging		После термического старения After thermal aging			
			Первый режим (после 125°C) First mode (after 125°C)		Второй режим (после 150°C) Second mode (after 150°C)	
	Тангенс угла диэл. по- терь (tgδ) Tangent of the dielectric loss angle (tgδ)	Диэл. проница- емость (ε) Diel. permeability (ε)	Тангенс угла диэл. по- терь (tgδ) Tangent of the dielectric loss angle (tgδ)	Диэл. проница- емость (ε) Diel. Permeability (ε)	Тангенс угла диэл. по- терь (tgδ) Tangent of the dielectric loss angle (tgδ)	Диэл. проница- емость (ε) Diel. permeability (ε)
Эталон Reference	0,019	16,78	0,028	18,25	0,035	19,46
Bi_2O_3 -0,5%	0,016	15,64	0,023	16,65	0,028	17,63
Bi_2O_3 -1%	0,018	16,23	0,025	16,69	0,029	18,13
Bi_2O_3 -2%	0,018	16,12	0,025	16,91	0,028	18,02
SiO_2 -0,5%	0,021	16,67	0,023	16,98	0,031	18,74
SiO_2 -1%	0,020	17,12	0,022	17,29	0,028	18,96
SiO_2 -2%	0,021	17,45	0,023	17,66	0,030	18,52
УНТ-0,01%	0,011	17,81	0,012	17,96	0,015	18,57
УНТ-0,05%	0,011	17,77	0,013	18,12	0,015	18,48
УНТ-0,1%	0,009	18,66	0,011	18,70	0,015	19,06

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭМАЛИ ПФ-115 ДО И ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Table 4. Results of evaluation of dielectric characteristics of coatings based on enamel PF-115 before and after thermal tests

Образец Sample	До термического старения Before thermal aging		После термического старения After thermal aging			
			Первый режим (после 125°C) First mode (after 125°C)		Второй режим (после 150°C) Second mode (after 150°C)	
	Тангенс угла диэл. потерь (tgδ) Tangent of the dielectric loss angle (tgδ)	Диэл. проницаемость (ε) Diel. permeability (ε)	Тангенс угла диэл. потерь (tgδ) Tangent of the dielectric loss angle (tgδ)	Диэл. проницаемость (ε) Diel. Permeability (ε)	Тангенс угла диэл. потерь (tgδ) Tangent of the dielectric loss angle (tgδ)	Диэл. проницаемость (ε) Diel. permeability (ε)
Эталон Reference	0,021	16,94	0,027	18,45	0,036	20,18
Bi ₂ O ₃ -0,5%	0,017	15,96	0,023	16,59	0,030	18,24
Bi ₂ O ₃ -1%	0,017	16,37	0,025	16,71	0,029	17,96
Bi ₂ O ₃ -2%	0,018	16,92	0,026	17,08	0,030	18,19
SiO ₂ -0,5%	0,023	16,84	0,028	16,93	0,030	19,48
SiO ₂ -1%	0,022	16,72	0,027	17,34	0,030	19,33
SiO ₂ -2%	0,023	16,97	0,027	17,71	0,031	19,29
УНТ-0,01%	0,013	18,73	0,016	18,14	0,020	18,97
УНТ-0,05%	0,011	17,95	0,015	18,41	0,017	18,48
УНТ-0,1%	0,009	18,60	0,013	18,78	0,015	19,06

Для образцов на основе эмали АС-182 наблюдается увеличение значений тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости после термического старения. Причем для эталонного образца АС-182 значение тангенса угла потерь увеличивается с 0,019 до 0,028 после первого режима и до 0,035 после второго режима, а диэлектрическая проницаемость возрастает с 16,78 до 18,25 и 19,46 соответственно. Однако при введении модифицирующих добавок значения данных показателей изменяются не так интенсивно, как у образца без добавок.

Наибольшую стабильность показывают образцы с добавкой УНТ 0,1% – значение тангенса угла потерь увеличивается с 0,009 до 0,011 после первого режима и до 0,015 после второго режима, а диэлектрическая проницаемость возрастает с 18,66 до 18,70 и 19,06 соответственно. Это говорит о сохранении высокой антистатической способности и электропроводящих качествах покрытия, а также о сохранении целостности покрытия, о чём свидетельствуют более ранние исследования авторов [1]: при изменении со временем диэлектрической проницаемости покрытий, увеличивается количество микротрещин в нем.

Для образцов на основе эмали ПФ-115 также наблюдается увеличение значений тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости после термических испытаний. У эталонного образца ПФ-115 значение тангенса угла диэлектрических потерь увеличивается с 0,021 до 0,027 после первого режима термического старения и до 0,036 после второго режима, при этом диэлектрическая проницаемость возрастает с 16,94 до 18,45 и 20,18 соответственно. Аналогичным образом, как и у образцов на основе эмали АС-182, Наибольшую стабильность показывают образцы с добавкой УНТ.

For samples based on AC-182 enamel, an increase in the dielectric loss tangent and dielectric constant values is observed after thermal aging. Moreover, for the reference sample AC-182, the loss tangent value increases from 0.019 to 0.028 after the first mode and to 0.035 after the second mode, and the permittivity increases from 16.78 to 18.25 and 19.46, respectively. However, when introducing modifying additives, the values of these indicators do not change as intensively as for the sample without additives.

The greatest stability is shown by samples with the addition of 0.1% CNT - the loss tangent value increases from 0.009 to 0.011 after the first mode and to 0.015 after the second mode, and the permittivity increases from 18.66 to 18.70 and 19.06, respectively. This indicates the preservation of high antistatic capacity and electrically conductive qualities of the coating, as well as the preservation of the integrity of the coating, as evidenced by earlier studies by the authors [1]: when the dielectric constant of the coatings changes over time, the number of microcracks in it increases.

For samples based on PF-115 enamel, an increase in the values of the dielectric loss tangent and dielectric constant is also observed after thermal tests. For the reference sample PF-115, the value of the dielectric loss tangent increases from 0.021 to 0.027 after the first mode of thermal aging and to 0.036 after the second mode, while the dielectric constant increases from 16.94 to 18.45 and 20.18, respectively. Similarly, as with samples based on AC-182 enamel, the greatest stability is shown by samples with the addition of CNT.

Заключение

В целом, стоит сказать, что введение в испытываемые эмали нанодобавок позволяет получать покрытия, которые отличаются улучшенными эксплуатационными характеристиками – адгезионная прочность, устойчивость к деформационным воздействиям, антистатичность. Наилучшие результаты достигаются при введении в лакокрасочный материал AC-182 составов на основе углеродных нанотрубок, таким образом, получаемое покрытие обладает до двух и более раз лучшими физико-механическими свойствами. Ко всему прочему, такие покрытия сохраняют требуемый уровень свойств длительное время, обеспечивая надежную защиту металлических поверхностей в эксплуатационных условиях.

Литература:

1. Диэлектрический анализ эксплуатационных характеристик и процесса старения защитных покрытий / А. В. Пчельников, А. П. Пичугин, Р. В. Луцки, С. Е. Ткаченко // *Эксперт: теория и практика*. – 2022. – № 1(16). – С. 14-22.
2. Столяров Р.А., Меметова А.Е., Ягубов В.С. Токопроводящие кремнийорганические материалы и покрытия с многослойными углеродными нанотрубками // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 153-161.
3. Нелюбова В.В. Кузьмин Е.О., Строкова В.В. Структура и свойства нанодисперсного кремнезема, синтезированного золь-гель методом // *Строительные материалы*. – 2022. – № 12. – С. 38-44.
4. Гребнов В.С., Гребнова А.Б., Зубков Е.М., Данилов Ю.П. Влияние внешних воздействий на металлические конструктивные элементы // *Промышленные и строительные технологии*. – 2016. – №7 (9). – С. 11-15.
5. Логанина В.И. Оценка вероятности растрескивания лакокрасочных покрытий при воздействии климатических факторов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2022. – № 10(766). – С. 31-36.
6. Vance M., Kuiken T., Vejerano E., McGinnis S., Hochella M., Rejeski D., Hull M. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2015;6(1):1769–1780.
7. Erofeev V.T., Ivlev V.I., Sigachyov A.F. Mechanical properties of epoxy resin with additives soot and nanotubes. *Materials Physics and Mechanics*. 2021;47(1):20-30.
8. Ma, P.C., Siddiqui, N.A., Marom, G., Kim J.K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(10):1345-1367.
9. Низина Т.А., Бальков А.В., Коровкин Д.В., Володин В.Г. Оптимизация составов цементных дисперсно-армированных мелко-зернистых бетонов, содержащих углеродные наномодификаторы // *Наноиндустрия*. – 2017. – № 7(78). – С. 82-91.
10. Хозин В.Г., Низамов Р. К., Абдрахманова Л. А. Модификация строительных полимеров (поливинилхлорида и эпоксидных) однослойными углеродными нанотрубками // *Строительные материалы*. – 2017. – № 1-2. – С. 55-61.
11. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // *Строительные материалы*. – 2015. – № 2. – С. 25-33.
12. Кожухова Н. И., Строкова В. В., Чижов Р. В., Кожухова М. И. Методика оценки реакционной активности алюмосиликатов кислого состава с нанокристаллической структурой // *Строительные материалы и изделия*. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 5-11.

Conclusions

In general, it is worth saying that the introduction of nano-additives into the tested enamels allows obtaining coatings that are distinguished by improved performance characteristics - adhesive strength, resistance to deformation effects, antistatic properties. The best results are achieved by introducing carbon nanotube-based compounds into the AC-182 paint and varnish material, thus, the resulting coating has up to two or more times better physical and mechanical properties. In addition, such coatings retain the required level of properties for a long time, providing reliable protection of metal surfaces under operating conditions.

References:

1. Dielectric analysis of performance characteristics and aging process of protective coatings / A. V. Pchelnikov, A. P. Pichugin, R. V. Lutsik, S. E. Tkachenko // *Expert: theory and practice*. – 2022. – No. 1 (16). – P. 14-22. (In Russ.)
2. Stolyarov R. A., Memetova A. E., Yagubov V. S. Conductive organosilicon materials and coatings with multilayer carbon nanotubes // *Bulletin of the Tambov State Technical University*. – 2022. – Vol. 28, No. 1. – P. 153-161. (In Russ.)
3. Nelyubova V. V., Kuzmin E. O., Stokova V. V. Structure and properties of nanodispersed silica synthesized by the sol-gel method // *Stroitel'nyye materialy*. – 2022. – No. 12. – P. 38-44. (In Russ.)
4. Grebnov V.S., Grebnova A.B., Zubkov E.M., Danilov Yu.P. Influence of external influences on metal structural elements // *Industrial and construction technologies*. – 2016. – No. 7 (9). – P. 11-15. (In Russ.)
5. Loganina V.I. Assessment of the probability of cracking of paint and varnish coatings when exposed to climatic factors // *News of higher educational institutions. Construction*. – 2022. – No. 10 (766). – P. 31-36. (In Russ.)
6. Vance M., Kuiken T., Vejerano E., McGinnis S., Hochella M., Rejeski D., Hull M. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2015;6(1):1769–1780.
7. Erofeev V.T., Ivlev V.I., Sigachyov A.F. Mechanical properties of epoxy resin with additives soot and nanotubes. *Materials Physics and Mechanics*. 2021;47(1):20-30.
8. Ma, P.C., Siddiqui, N.A., Marom, G., Kim J.K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(10):1345-1367.
9. Nizina T.A., Balykov A.V., Korovkin D.V., Volodin V.G. Optimization of compositions of cement dispersion-reinforced fine-grained concretes containing carbon nanomodifiers // *Nanoindustry*. – 2017. – No. 7(78). – P. 82-91. (In Russ.)
10. Khozin V.G., Nizamov R.K., Abdrakhmanova L.A. Modification of construction polymers (polyvinyl chloride and epoxy) with single-layer carbon nanotubes // *Stroitel'nyye materialy*. – 2017. – No. 1-2. – P. 55-61.
11. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. General concentration pattern of effects of nano-modification of building materials // *Stroitel'nyye materialy*. – 2015. – No. 2. – P. 25-33. (In Russ.)
12. Kozhukhova N.I., Stokova V.V., Chizhov R.V., Kozhukhova M.I. Methodology for assessing the reactivity of acidic aluminosilicates with a nanocrystalline structure // *Stroitel'nyye materialy i izdeliya*. – 2019. – Vol. 2, No. 3. – P. 5-11. (In Russ.)

13. Лыгденов В.Ц., Номоев А.В., Сызранцев В.В. Влияние нанодисперсного порошка диоксида кремния марки Таркосил т-20 на прочностные характеристики лакокрасочного покрытия из эмали ХВ-16 // *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика.* – 2019. – № 2-3. – С. 7-11.

14. Логанина В.И., Сергеева К.А. Оценка супергидрофобных свойств покрытий на основе акриловой смолы // *Региональная архитектура и строительство.* – 2020. – № 1(42). – С. 98-103.

15. Логанина В.И., Светалкина М.А., Арискин М.В. Оценка напряженного состояния лакокрасочных покрытий в зависимости от шероховатости их поверхности // *Известия высших учебных заведений. Строительство.* – 2023. – № 2(770). – С. 36-43.

13. Lygdenov V.Ts., Nomoev A.V., Syzrantsev V.V. Influence of nanodispersed silicon dioxide powder of the Tarkosil T-20 brand on the strength characteristics of the paint and varnish coating made of enamel HV-16 // *Bulletin of the Buryat State University. Chemistry. Physics.* - 2019. - No. 2-3. - P. 7-11. (In Russ.)

14. Loganina V.I., Sergeeva K.A. Evaluation of superhydrophobic properties of coatings based on acrylic resin // *Regional architecture and construction.* - 2020. - No. 1 (42). - P. 98-103. (In Russ.)

15. Loganina V.I., Svetalkina M.A., Ariskin M.V. Evaluation of the stress state of paint and varnish coatings depending on the roughness of their surface // *News of higher educational institutions. Construction.* - 2023. - No. 2 (770). – P. 36-43. (In Russ.)

Пчельников Александр Владимирович – заведующий кафедрой «Надежность и ремонт машин», доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, E-mail: pchelaleksandr@mail.ru.

Пичугин Анатолий Петрович – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, E-mail: gmunsau@mail.ru.

Искандаров Марат Хайруллович – аспирант кафедры «Надежность и ремонт машин», ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, E-mail: alexmar@mail.ru.

Илясов Александр Петрович – старший преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин», ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, E-mail: aleksandrilyasov@yandex.ru

Вклад авторов: Пчельников А.В., Пичугин А.П. – идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Илясов А.П. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Искандаров М.Х. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Pchelnikov Aleksandr Vladimirovich – Head of the Department of Reliability and Repair of Machines, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Novosibirsk State Agrarian University, E-mail: pchelalek-sandr@mail.ru.

Pichugin Anatoly Petrovich – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor, Novosibirsk State Agrarian University, E-mail: gmunsau@mail.ru.

Iskandarov Marat Khairullovich – Postgraduate Student of the Department of Reliability and Repair of Machines, Novosibirsk State Agrarian University, E-mail: alexmar@mail.ru.

Ilyasov Aleksandr Petrovich – Senior Lecturer of the Department of Reliability and Repair of Machines, Novosibirsk State Agrarian University, E-mail: aleksandrilyasov@yandex.ru

Contribution of the author: Pchelnikov A.V., Pichugin A.P. – idea, scientific guidance, scientific editing of the article; Ilyasov A.P. – development of methods, processing of material, writing the article; Iskandarov M.K. – conducting experiments, processing of material, writing the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.