

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 544.7;544.13;544.722

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-346-355>

Поступила в редакцию 22.06.2021

Received 22.06.2021

В. Д. Кошевар, В. Г. Шкадрецова, А. С. Письменская

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОГО СУПЕРГИДРОФОБНОГО ПОКРЫТИЯ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМ ФИНИШНЫМ СЛОЕМ НА ОСНОВЕ СУСПЕНЗИИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ВО ФТОРИРОВАННОМ ПЛЕНКООБРАЗОВАТЕЛЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Аннотация. Исследованы процессы получения композиций на основе кремнийорганической смолы для термостойкого покрытия ускоренной сушки, а также гидрофобизация его путем создания на поверхности изотропной нано-микроструктуры. Показано, что наибольшее влияние на физико-химические свойства термостойких покрытий оказывают химическая природа, содержание ингредиентов и толщина покрытий. Исследованы способы получения композиции для термостойких покрытий с применением диссольвера и бисерной мельницы в различных режимах их работы, что позволило разработать технологический процесс изготовления термостойкого лакокрасочного материала. Разработан состав и технология получения финишного гидрофобизирующего слоя на основе суспензии аэросила HDK 12H и углеродных наночастиц во фторсодержащем лаке ЛФ 32ЛН с целью получения комплексного термостойкого, супергидрофобного и антикоррозионного покрытия для защиты металлических изделий и исследованы его свойства.

Ключевые слова: полисилоксановые пленкообразователи, пигменты, наполнители, диспергирование, пасты, адгезия, твердость, морфология, углы смачивания, супергидрофобность, термостойкость

Для цитирования. Кошевар, В. Д. Получение термостойкого супергидрофобного покрытия с наноструктурированным финишным слоем на основе суспензии диоксида кремния во фторированном пленкообразователе и его свойства / Кошевар В. Д., Шкадрецова В. Г., Письменская А. С. // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 346–355. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-346-355>

V. D. Koshevar, V. G. Shkadretsova, A. S. Pismenskaya

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

PREPARATION OF THE HEAT-RESISTANT SUPERHYDROPHOBIC COATING WITH A NANOSTRUCTURED FINISH LAYER BASED ON A SUSPENSION OF SILICON DIOXIDE IN A FLUORINATED FILM-FORMER AND ITS PROPERTIES

Abstract. The processes of obtaining compositions based on organosilicon resin for a heat-resistant coating of accelerated drying, as well as its hydrophobization by creating an isotropic nano-microstructure on the surface, are studied. It is shown that the chemical nature, the content of the ingredients and the thickness of the coatings have the greatest influence on the physicochemical properties of heat-resistant coatings. The methods of obtaining a composition for heat-resistant coatings using a dissolver and a bead mill in various modes of operation were studied, which allowed us to develop a technological process for manufacturing heat-resistant paint and varnish material. The composition and technology of obtaining a final hydrophobic layer based on a suspension of aerosil HDK 12H and carbon nanoparticles in a fluorine-containing varnish LF 32LN was developed in order to obtain a complex heat-resistant, superhydrophobic and anticorrosive coating for the protection of metal products and its properties were investigated.

Keywords: polysiloxane film-forming agents, pigments, fillers dispersion, pastes, adhesion, hardness, morphology, wetting angles, superhydrophobicity, heat resistance

For citation. Koshevar V. D., Shkadretsova V. G., Pismenskaya A. S. Preparation of the heat-resistant superhydrophobic coating with a nanostructured finish layer based on a suspension of silicon dioxide in a fluorinated film-former and its properties. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 346–355 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-346-355>

Введение. Термостойкие материалы на основе силиконовых смол требуют дальнейшего усовершенствования в направлении повышения их защитного индекса, сохранения его значения на данном уровне более длительное время. В ряде случаев это может быть достигнуто простым смешением при температуре окружающей среды растворов или дисперсий кремнийорганиче-

ских смол (КО-смола) с другими пленкообразователями, сополимеризацией их с полимерами (алкидными, полиэфирными, эпоксидными, фенольными, акриловыми и т. п.) [1–5].

Несмотря на значительный успех в разработке термостойких защитных систем на основе кремнийорганических смол (КО-смола), однако не весь их ассортимент отвечает современным требованиям из-за ряда недостатков: длительность и высокие температуры формирования покрытий, недостаточная коррозионная устойчивость, особенно в случае их эксплуатации при повышенных температурах [6–8]. Поэтому актуальной задачей является разработка защитных материалов на основе КО-смола с высокой скоростью формирования покрытий по энергосберегающей технологии (при комнатных температурах), а также увеличение сроков эксплуатации в высокотемпературном режиме и при одновременном воздействии агрессивных коррозионных сред.

Цель настоящей работы – получение композиций на основе КО-смола для создания жаростойкого покрытия ускоренной сушки и исследование возможности гидрофобизации его путем создания на поверхности изотропной нано-микроморфологии, а также физико-химических и эксплуатационных свойств полученного комплексного покрытия.

Экспериментальная часть. Экспериментальные исследования в работе осуществляли с применением следующих ингредиентов: смолы марки «Silikophen P 50 X» и («Evonik Industries AG», Германия), представляющей собой раствор метилфенилполисилоксана в ксилоле (вязкость $30 \text{ мПа}\cdot\text{с}^{-1}$), наполнителей (микротальк и микрослюда, ЗАО «Геоком»), загущающих агентов (аэросил 380, Россия), бентонита (Viskogel ED, Германия), пигмента (алюминиевая пудра марки ПА-1, ГОСТ 5494), пеногасителя (Tego 900), растворителей (ксилол, сольвент).

Композиции получали путем смешивания выбранных ингредиентов на лабораторной установке ЛДУ-МПП (Россия), работающей в режимах диссольвера и бисерной мельницы. Термографические исследования проводили на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG при скорости подъема температуры $0,5^\circ/\text{мин}$ в атмосфере воздуха в интервале температур $20\text{--}1000^\circ\text{C}$ [9]. Рентгенограммы образцов снимали на дифрактометре D 8 DVANCE фирмы BRUKER (Германия).

Микроструктуру образцов определяли методом сканирующей электронной микроскопии на приборе LEO 1420. Напыление слоя золота на поверхность образцов производили на установке вакуумного напыления ВУП-2К.

Относительную твердость пленок определяли с помощью маятникового прибора 2124 ТМЛ ГОСТ 5233-89, адгезию – методом решетчатых надрезов ГОСТ 15140-78, прочность при ударе – на приборе У-1 ГОСТ 4765-73.

Вязкость композиций находили с помощью вискозиметра ВЗ-4 по ГОСТ 8420-74, а реологические свойства систем исследовали при температуре $(20\pm 0,5)^\circ\text{C}$ на реометре «Physika MCR 101» (Anton Paar, Австрия) с воздушными подшипниками (программное обеспечение «Rheoplus») при использовании системы пластина–пластина с зазором между ними $0,05 \text{ мм}$. Измерение производили в стационарном режиме в области скоростей деформации сдвига $0,1\text{--}300 \text{ с}^{-1}$, охватывающей диапазоны гидродинамического воздействия, испытываемого системами при хранении (гравитационные силы), транспортировке $(0,1\text{--}5,0) \text{ с}^{-1}$, перемешивании в ламинарном режиме $(10\text{--}300) \text{ с}^{-1}$. Были построены кривые вязкости $\eta_{\text{эфф}} = f(\dot{\gamma})$ и течения $\tau = f(\dot{\gamma})$, где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации, с^{-1} ; τ – напряжение сдвига, Па; $\eta_{\text{эфф}}$ – эффективная вязкость, Па·с. При этом соблюдали стационарный режим в диапазоне установившихся скоростей сдвига. Использовали методику при $\dot{\gamma} = \text{const}$ (деформирование в каждом опыте с заданной $\dot{\gamma}$, поддерживаемой для всего данного опыта постоянной: равновесные условия стационарного потока).

Качество диспергирования и наполнения смолы (степень перетира) контролировали с помощью гриндометра «Клин» по ГОСТ 6589-74. Время высыхания покрытия изучали по ГОСТ 19007-73. Адгезию получаемого с использованием наполненной полисилоксановой смолы покрытия к подложкам определяли по ГОСТ 15140-78; твердость покрытия – с помощью маятникового прибора по ГОСТ 5233-89; прочность покрытия при ударе – по ГОСТ 4765-73; стойкость к статическому воздействию жидкостей – по ГОСТ 9.403-80.

Термостойкость изучали следующим способом: образцы покрытий помещали в муфельную печь СНОЛ 7.2./1100, выдерживали при температуре 500°C в течение 3 ч, охлаждали и проводили визуальный осмотр и измерения.

Для определения КУС использовали гониометр KRUSS DSA 25B (Германия) с диапазоном измерения от 1 до 180° с точностью $\pm 0,1^\circ$. Измерения проводили путем нанесения капель дистиллированной воды объемом 7–10 мкл на поверхность образца. На каждом образце проводилось не менее пяти измерений на разных участках поверхности и рассчитывали среднее арифметическое значение КУС.

Результаты и их обсуждение. С целью выбора ингредиентов состава композиции для термостойких покрытий были проведены исследования основополагающих из них с помощью дериватографии (рис. 1).

Из рис. 1, *a*, видно, что термодеструкция индивидуальной смолы начинается в области температур 255–299 °С и заканчивается при достижении 600 °С, при которой потеря массы образца составляет 50 %. Дальнейший нагрев образца до 900 °С приводит дополнительно лишь к небольшой потере массы (1,5 мас.%). Процесс окисления алюминиевого пигмента начинается в области температуры 400 °С и сопровождается интенсивным приростом массы образца (рис. 1, *b*). Так, при достижении температуры 900 °С общий прирост массы образца составил 49,4 %. Термограмма композиции, содержащей алюминиевый пигмент и смолу (рис. 1, *c*), показывает, что в присутствии смолы процесс окисления пигмента значительно замедляется. Так, в температур-

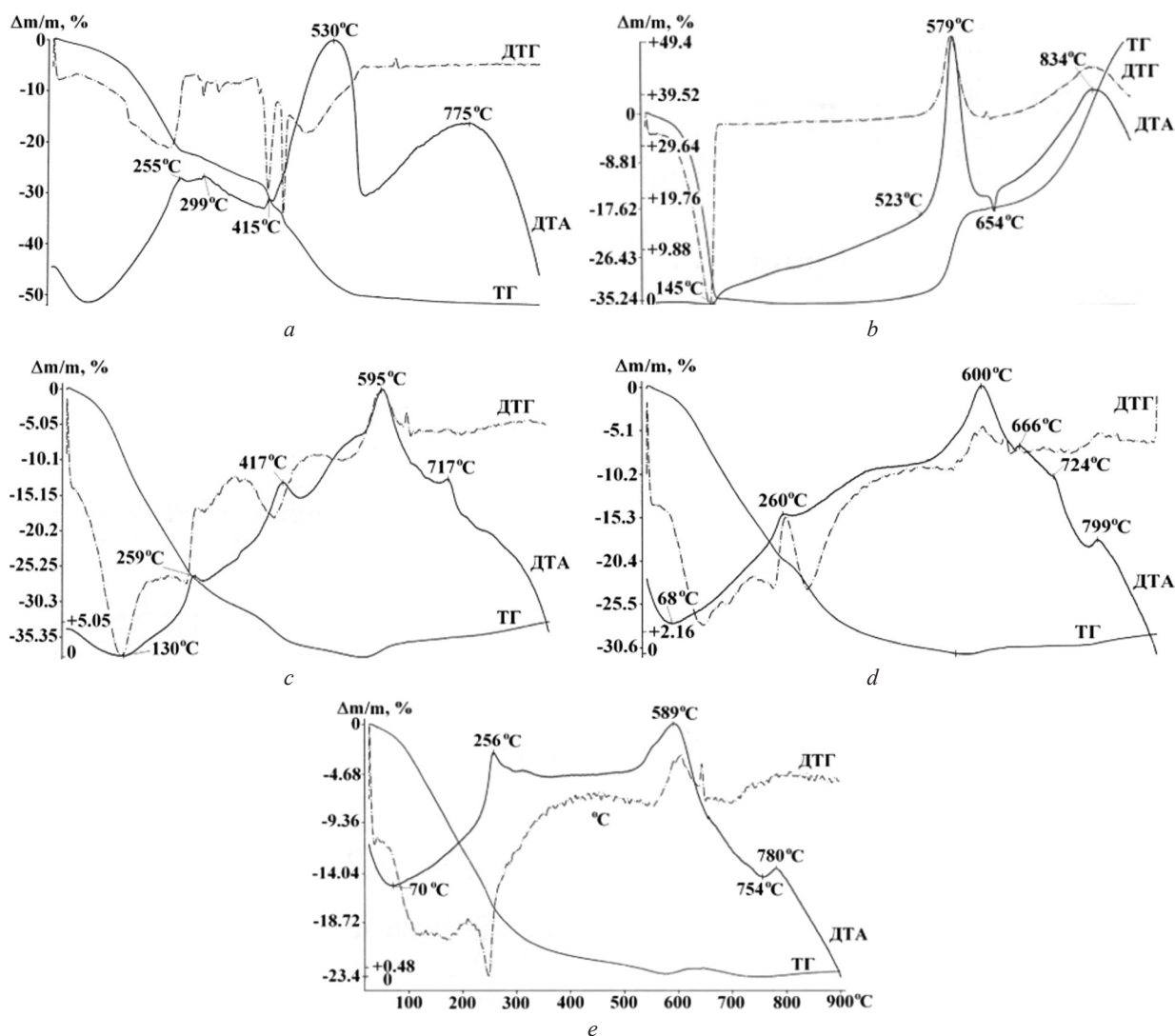


Рис. 1. Дериватограммы индивидуальных ингредиентов: смола Silikophen P 50 X (*a*), алюминиевая пудра (*b*) и композиций: алюминиевая пудра–смола (*c*), алюминиевой пудра–тальк–смола (*d*), алюминиевой пудра–тальк–микрослюда–смола (*e*)

Fig. 1. Derivatograms of individual ingredients: Silikophen P 50 X resin (*a*), aluminum powder (*b*) and compositions: aluminum powder–resin (*c*), aluminum powder–talc–resin (*d*), aluminum powder–talc–micromica–resin (*e*)

ном диапазоне 560–900 °С происходит прирост массы образца только на 5,05 %. На кривой ДТА данной композиции наблюдаются эндопики, три из которых (259, 417, 430 °С) связаны с термодеструкцией полимера, а экзопики при 595 и 717 °С – с окислением алюминиевого пигмента и продуктов деструкции полимера. Следовательно, можно сказать, что введение алюминиевого пигмента в смолу повышает ее термостойкость до ~ 600–650 °С.

Введение талька в композицию, содержащую алюминиевый пигмент и смолу приводит к дальнейшему замедлению процесса окисления пигмента (рис. 1, *d*). Прирост массы образца начинается несколько позже (при 580 °С) и по достижении 900 °С составляет 2,16 %. Термодеструкция смолы также замедляется и повышается термостойкость композиции до ~ 700 °С. Присутствие в данной композиции слюды приводит к тому, что на кривой ТГ в интервале температур 580–640 °С наблюдается прирост массы образца на 0,48 %, 640–720 °С – ее уменьшение на 0,7 %, а в интервале температур 720–900 °С – опять прирост на 0,46 % (рис. 1, *e*). Таким образом, общий прирост массы составляет всего 0,68 %. Согласно ДТА термостойкость композиции при введении микрослюды повышается на ~ 20–30 °С.

Наиболее сложной и энергоемкой стадией получения пигментированных композиций на основе кремнийорганических смол является диспергирование пигментов и наполнителей в пленкообразующей дисперсионной среде. Процесс получения пигментированной композиции в проводимом эксперименте включал следующие стадии: предварительное перемешивание в режиме диссольвера или бисерной мельницы вводимых пигментов и наполнителей в дисперсионной среде, состоящей из растворителя и небольшого количества смолы при различных скоростях вращения вала и рабочих тел (стадия 1); введение оставшегося расчетного количества пленкообразователя и перемешивание в данных диспергирующих устройствах в различных режимах (стадия 2).

Вначале была изучена возможность изготовления пасты (стадия 1) различными способами: а) в режиме диссольвера (скорость вращения вала 500, 1000 и 2000 об/мин); б) в режиме бисерной мельницы (скорость вращения вала 200, 300 и 500 об/мин) с применением в качестве мелющих тел стеклянных шариков диаметром 4 мм. При этом все остальные параметры технологического процесса (концентрации компонентов, последовательность их введения, время диспергирования фиксировались). В качестве контролируемого показателя эффективности диспергирования выбран параметр степень перетира. Такие исследования вначале проводили на модельной системе, включающей следующие ингредиенты, мас. %: Silikophen P 50X – 30, слюда – 5, аэросил – 8, бентонит – 4, алюминиевая пудра – 12, сольвент – 43. Результаты приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Степень перетира модельной композиции при получении ее на различных диспергирующих устройствах

Table 1. The degree of grinding of the model composition when receiving it on various dispersing devices

Контролируемый показатель	Скорость вращения вала диссольвера, об/мин			Скорость вращения вала бисерной мельницы, об/мин		
	500	1 000	2 000	200	300	500
Степень перетира, мкм	60	30	30	70	50	45

Из табл. 1 следует, что режим диспергирования в диссольвере при 1 000 об/мин обеспечивает наибольший эффект пигментирования. Степень перетира при незначительном пенообразовании составляет 30 мкм. Недостаточный перетир в случае применения диспергирования в режиме бисерной мельницы объясняется высоким пенообразованием. Известно, что появление многочисленных пузырьков воздуха снижает эффективность контакта ее рабочих тел диспергатора с агрегатами частиц порошков (уменьшается напряжение сдвига и удара). В силу этих причин в дальнейшем применяли диспергирование в диссольвере.

На рис. 2 представлены результаты получения композиции со скоростью вращения вала диссольвера 1 000 об/мин при различном времени диспергирования. Откуда следует, что размеры частиц начинают уменьшаться после 20 мин диспергирования, достигая 25–30 мкм.

В табл. 2 представлены величины твердости формирующихся покрытий на основе пигментированной смолы «Silikophen P 80 X» при различных толщине и применяемых растворителях.

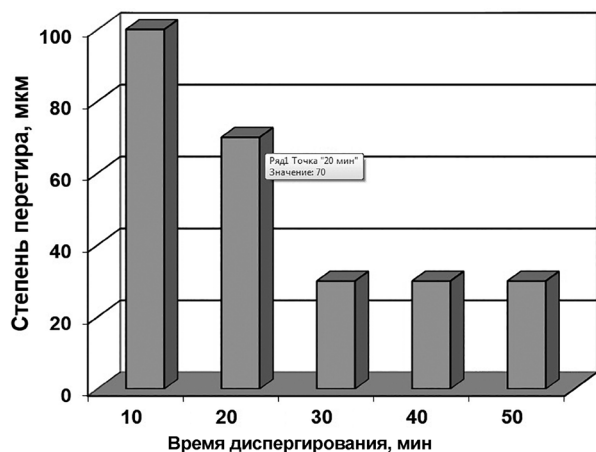


Рис. 2. Зависимость степени перетира композиции от времени диспергирования

Fig. 2. Dependence of the grinding degree of the composition on the dispersion time

менялось от 15 до 30 мас.%. Оценку влияния данного фактора осуществляли по изменениям твердости покрытия, адгезии его к стали марки 08 кп (табл. 3, 4)

Таблица 2. Зависимость твердости покрытий, полученных на основе пигментированной модельной композиции, от их толщины, природы растворителя и времени сушки

Table 2. Dependence of the hardness of coatings obtained on the basis of a pigmented model composition on their thickness, solvent nature and drying time

Вид растворителя	Толщина покрытия, мкм	Свойство покрытия	
		время сушки до степени 3, мин	твердость покрытия, усл. ед.
Ксилол	30	15	0,29
	60	20	0,18
Сольвент	30	32	0,15
	60	45	0,13

Таблица 3. Твердость покрытий в зависимости от концентрации пигмента и времени сушки

Table 3. Hardness of coatings depending on the concentration of pigment and drying time

Индекс состава	Содержание пигмента, мас.%	Твердость покрытия, отн.ед.	
		время сушки, ч	
		0,3	24
A1	15	0,17	0,30
A2	20	0,16	0,29
A3	25	0,18	0,25
A4	30	0,17	0,28

Как видно из табл. 3, 4 концентрация пигмента не оказывает существенного влияния на твердость покрытия и адгезию его к стальной поверхности. Максимальная твердость покрытия достигается уже через сутки после нанесения и составляет 0,25–0,30 отн. ед. Адгезия, однако, заметно зависит от толщины покрытия (табл. 4). Так, при толщине его 20 мкм все составы обладают адгезией 0–1 балл (края надрезов полностью гладкие, нет признаков отслаивания ни в одном квадрате решетки). Увеличение толщины покрытий более 20 мкм отрицательно сказывается на адгезии.

Важным показателем качества композиций, влияющим серьезным образом также и на параметры получаемых покрытий, являются их реологические свойства, от которых зависят смачивание поверхностей субстратов и растекаемость по ним. Результаты реологических исследований приведены на рис. 3 для составов с различным содержанием реологической добавки.

Из табл. 2 следует, что использование сольвента увеличивает время сушки и уменьшает твердость покрытия. В то же время, как было установлено, адгезия, стойкость к удару и термостойкость этих покрытий, полученных с использованием композиций как с сольвентом, так и с ксилолом, имели примерно одинаковые значения. Поскольку целью работы являлось создание покрытий ускоренной сушки при температуре 20 °С, был проведен ряд экспериментов и определено оптимальное суммарное количество и соотношение растворителей ксилол–сольвент в композиции, мас.% – 1,5:1.

Для определения влияния концентрации пигмента (алюминиевой пудры) на физико-химические и технологические свойства композиции и покрытия были приготовлены составы А1–А4, в которых содержание алюминиевой пудры из-

Из приведенного рисунка видно, что при сдвиговой деформации данных композиций обнаружено течение, характерное для псевдопластических систем с небольшими статическими пределами текучести (τ_k). Увеличение содержания бентонита в составе композиции от 3 до 5 мас.% способствует росту эффективной вязкости при скорости сдвига 16 с^{-1} от 106 до 150 мПа·с и τ_k также увеличивается от 2,3 (3 мас.%) до 3,6 Па (5 мас.%). Так как образующиеся коагуляционные структуры в данных композициях обладают относительно невысокой прочностью и при небольших скоростях сдвига (начиная с 50 с^{-1}) текут как ньютоновские жидкости, то это свидетельствует об их хороших пленкообразующих свойствах, которые достигаются уже при небольших сдвиговых усилиях. В таких дисперсионных средах, как известно, облегчается диспергирование порошкообразных ингредиентов, наблюдается хорошее растекание композиций по поверхности субстрата при различных способах их нанесения.

Таблица 4. Зависимость адгезии покрытия к поверхности стали от концентрации пигмента и его толщины

Table 4. Dependence of the adhesion of the coating to the steel surface on the concentration of the pigment and its thickness

Индекс состава	Содержание пигмента, мас.%	Толщина, мкм	Адгезия, балл
A1	15	20	0–1
		от 20 до 30	2
		>30	4
A2	20	20	0–1
		от 20 до 30	2
		>30	3–4
A3	25	20	0–1
		от 20 до 30	3–4
		>30	5
A4	30	20	0–1
		от 20 до 30	3
		>30	4–5

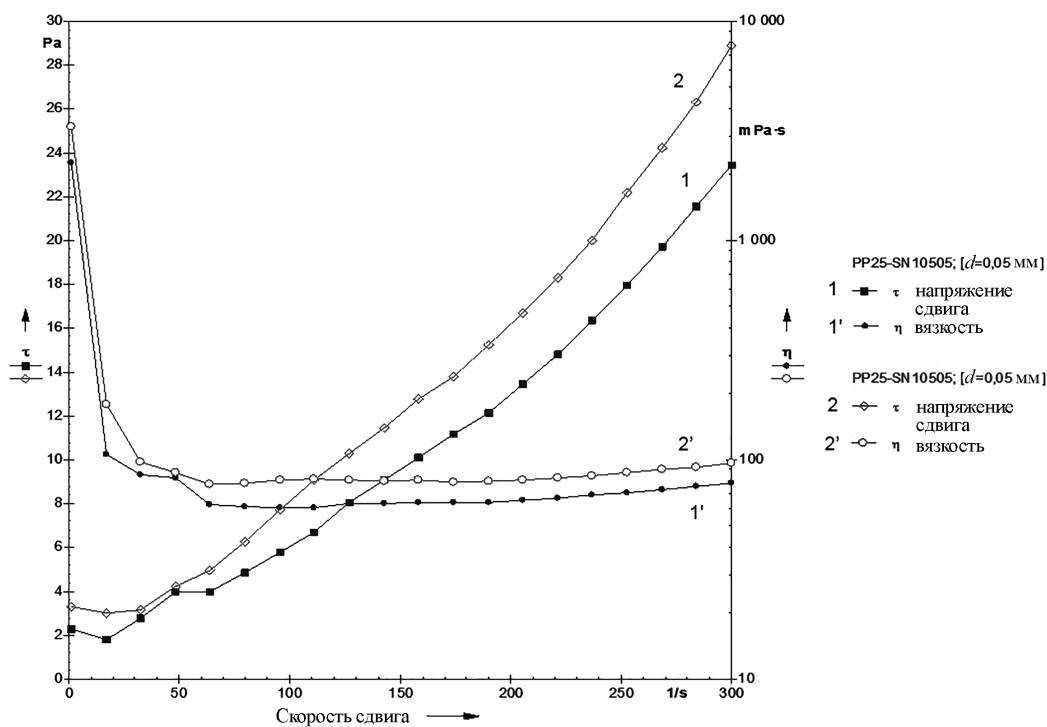


Рис. 3. Зависимость вязкости (η) и напряжения сдвига (τ) от скорости сдвига (γ) для составов с содержанием бентонита, мас.%. 1 – 3, 2 – 5

Fig. 3. Dependence of viscosity (η) and shear stress (τ) on the shear rate (γ) for the compositions with bentonite content, wt.%. 1 – 3, 2 – 5

На основе проведенных исследований по подбору ингредиентов и установлении закономерностей влияния их содержания на основные физико-механические характеристики композиций и термостойких покрытий на их основе, а также принимая во внимание структурно-механические свойства составлена рецептура лакокрасочного термостойкого материала (ЛКТМ).

Для проведения химической гидрофобизации образуемого термостойкого покрытия с целью усиления его антикоррозионных свойств были использованы суспензии аэросила HDK 12Н и наночастиц, полученных пиролизом пропан-бутановой смеси, в органорастворимом фторопластовом лаке ЛФ 32ЛН, который применялся при гидрофобизации алюминиевых пластин [11]. Гидрофобизация осуществлялась путем полива указанной на разработанное термостойкое покрытие стальной пластины (сталь Ст3). Высушенный при 20 °С после нанесения финишного слоя образец подвергался затем температурной обработке при 250 °С. Морфологию и структуру поверхности покрытия после гидрофобизации контролировали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 4) и измерениями (КУС) гистерезиса смачивания (угла скатывания) водой (рис. 5, табл. 4).

Установлено, что наибольшее влияние на КУС оказывает концентрация лака ЛФ 32ЛН и содержания в нем аэросила. Так, с увеличением концентрации аэросила от 1 до 2 мас.% КУС возрастает от 90 до 170°, а при увеличении концентрации лака более 5 мас.%, наоборот падает, что вызвано, по-видимому, сглаживанием шероховатости поверхности (рис. 4, *с*) по мере роста толщины лаковой пленки. Увеличение содержания в композиции нанодобавки углерода оказывает значительно меньшее влияние на КУС. Если капли воды, помещенные на поверхность, покрытую лаком ЛФ 32ЛН с добавкой только аэросила (КУС 165°), не скатываются с нее даже при угле наклона пластины 90° («липкая гидрофобность»), то при введении даже небольшого содержания

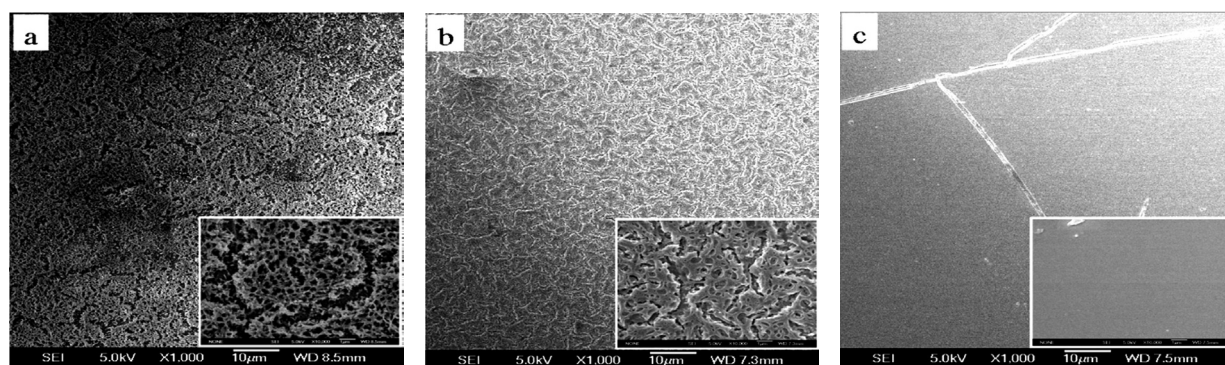


Рис. 4. СЭМ гидрофобизирующих пленок на основе фторопластового лака ЛФ 32ЛН, содержащего различное количество, мас.%, *a* – 2, *b* – 5, *c* – 10. Содержание аэросила – 2 мас.%; толщина пленок – 3–5 мкм

Fig. 4. SEM of hydrophobizing films based on fluoroplastic varnish LF 32LN, containing different amounts, wt.%, *a* – 2, *b* – 5, *c* – 10. Aerosil content – 2 wt.%; the thickness of the films is 3–5 µm

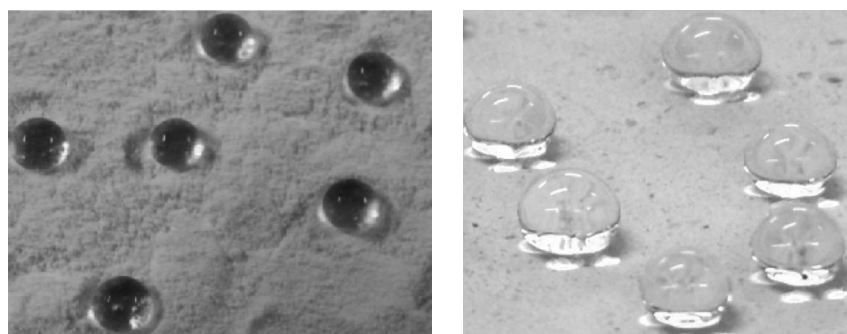


Рис. 5. Капли воды на поверхности гидрофобизированного термостойкого покрытия

Fig. 5. Water droplets on the surface of a hydrophobized heat-resistant coating

нанодобавок угол скатывания снижается до 5–10 ° («скользящая гидрофобность»). В этом случае покрытие приобретает супергидрофобность (эффект «лотоса»), сохраняющаяся длительное время (не менее 60 дней при 20 °С), а также выдерживает воздействие температуры до 300 °С.

На основании проведенных исследований изготовлен опытный образец комплексного термостойкого, супергидрофобного антикоррозионного покрытия на стальной поверхности, испытания которого показали его высокие защитные свойства (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Свойства экспериментального образца комплексного гидрофобно-термостойкого покрытия

Table 5. Properties of the experimental sample of a complex hydrophobic-heat-resistant coating

Наименование показателей	Полученные показатели	Метод испытаний
Рабочая вязкость композиции при температуре (20±0,5)°С по вискозиметру типа ВЗ-4, с	47	ГОСТ 8420-74
Величина сухого остатка в композиции, мас.%	47–53	
Время высыхания до Ст3, мин при 20 °С, при 150 °С, не более	20 10	ГОСТ 19 007-73
Степень перетира, мкм	35	ГОСТ 65-89-74
Адгезия покрытия к основанию, балл	1	ГОСТ 15 140-78
Твердость покрытия по ТМЛ, не менее, отн.ед.	0,24	ГОСТ 5233-89
Прочность покрытия при ударе по прибору У-1 при 20 °С, не менее, см После термообработки при 450–500 °С в течение 3 ч, не менее	40 10	ГОСТ 4765-73
Краевой угол смачивания, град., не менее непосредственно после гидрофобизации после хранения в течение 60 дней	170 165	
Гистерезис смачивания (угол скатывания, капли), град., не более	10	
Стойкость к статическому воздействию воды при 20 °С, не менее, ч	500	ГОСТ 9.403-80
Стойкость к воздействию машинного масла, не менее, ч	150	ГОСТ 9.403-80
Стойкость в растворе 3 %-ного хлористого натрия, не менее, ч	100	ГОСТ 9.403-80
Термостойкость покрытия при температуре 500–600 °С, не менее, ч	3	ГОСТ 9.406-84

Как видно из приведенной таблицы, все основные свойства изготовленного экспериментального образца свидетельствуют, что полученное комплексное покрытие является супергидрофобным, термостойким и обладает достаточно высокими антикоррозионными свойствами.

Заключение. Показано, что наибольшее влияние на характеристики композиций и термостойких покрытий на их основе оказывают природа и содержание наполнителей, пигмента, малых добавок и толщина покрытий. Исследованы способы получения состава композиции для термостойких покрытий с применением диссольверов, бисерной мельницы в различных режимах работы, что позволило разработать технологический процесс изготовления термостойкого лакокрасочного материала.

Экспериментально обоснован выбор ингредиентов состава термостойкой краски для защиты металлических поверхностей от воздействия температур при 500–600 °С и разработана ее рецептура. Предложен состав финишного гидрофобизирующего слоя на основе суспензии аэросила HDK 12Н и углеродных наночастиц во фторсодержащем лаке ЛФ 32ЛН с целью получения комплексного термостойкого, супергидрофобного и антикоррозионного покрытия для защиты металлических изделий, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

Список использованных источников

1. Effects of siloxane plasma coating on the frictional properties of polyester and polyamide fabrics / E. Bertaux [et al.] // Surface and Coat. Technol. – 2009. – Vol. 204, N 1–2. – P. 165–171.
2. Минасян, Р. М. Пути повышения термостойкости кремнийорганических эластомерных материалов / Р. М. Минасян, А. Н. Поливанов, О. И. Минасян // Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. – № 7. – С. 24–26.

3. Головина, Е. В. Влияние кремнийсодержащих компонентов на термостойкость и снижение горючести огнезащитных составов интумесцентного типа / Е. В. Головина, О. В. Беззапонная // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2018. – Т. 46, № 2. – С. 110–119.
4. Тимофеева, С. В. Защитные материалы пониженной пожарной опасности. Модифицирование силиконовых покрытий соединениями алюминия / С. В. Тимофеева, А. С. Малясова, О. Г. Хелевина // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 10. – С. 25–29.
5. Термостабилизация и керамообразование силиконовых резин / В. М. Копылов [и др.] // Каучук и резина. – 2015. – № 5. – С. 52–57.
6. Кахраманов, Н. Т. Состояние проблемы получения, исследования и применения кремнийорганических полимеров / Н. Т. Кахраманов, Р. В. Гурбанова, Ю. Н. Кахраманлы // Евразийский союз ученых. – 2016. – Т. 27, № 2. – С. 112–118.
7. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов / Е. Н. Каблов [и др.] // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2016. – № 6. – С. 32–35.
8. Неёлова, О. В. Защитные покрытия на основе кремнийорганических лестничных блок-сополимеров, применяемые в микроэлектронике / О. В. Неёлова, Р. А. Газзаева, Л. Б. Коблова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 2-1. – С. 76–80.
9. Шайдурова, Г. И. Дериватографическое исследование металлонаполненных термостойких покрытий на кремнийорганической основе / Г. И. Шайдурова, С. А. Лобковский, И. Л. Васильев // Пром. окраска. – 2007. – № 5. – С. 42–43.
10. Беззапонная, О. В. Оценка влияния минеральных наполнителей на термостойкость и горючесть огнезащитного состава интумесцентного типа на силиконовой основе / О. В. Беззапонная, Е. В. Головина // Журн. прикл. химии. – 2018. – Т. 91, № 1. – С. 104–109.
11. Смачивание изотропных микротекстур, сформированных на поверхности стекла и алюминия / В. Д. Кошевар [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 309–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-309-317>

References

1. Bertaux E., LeMarec E., Crespy D., Rossi R., Hegemann D. Effects of siloxane plasma coating on the frictional properties of polyester and polyamide fabrics. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 204, no. 1–2, pp. 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.07.016>
2. Minas'yan P. M., Polivanov A. N., Minas'yan O. I. Ways to increase the heat resistance of organosilicon elastomeric materials. *Klei. Germetiki, tekhnologii = Adhesives. Sealants. Technologies*, 2015, no. 7, pp. 24–26 (in Russian).
3. Golovina E. V., Bezzaponnaya O. V. Influence of silicon-containing components on heat resistance and reduction of flammability of intumescent flame retardants. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of Risk management in the technosphere*, 2018, vol. 46, no. 2, pp. 110–119 (in Russian).
4. Timofeeva S. V., Malyasova A. S., Khelevina O. G. Protective materials of reduced fire hazard. Modification of siloxane coatings with aluminum compounds. *Pozharovzryvobezопасnost' = Fire and explosion safety*, 2010, vol. 19, no. 10, pp. 25–29 (in Russian).
5. Kopylov V. M., Kovyazin V. A., Kopyleva E. A., Fedorov A. Yu. Thermostabilization and ceramic formation of silicone rubbers. *Kauchuk i rezina*, 2015, no. 5, pp. 52–57 (in Russian).
6. Kakhramanov N. T., Gurbanova R. V., Kakhramanly Yu. N. State of the problem of obtaining, research and application of organosilicon polymers. *Evrasiiskii soyuz uchenykh = Eurasian Union of Scientists*, 2016, vol. 27, no. 2, pp. 112–118 (in Russian).
7. Kablov E. H., Semenova L. V., Es'kov A. A., Lebedeva T. A. Complex systems of paint and varnish coatings for the protection of metal polymer composite materials, as well as their contact joints from the effects of aggressive factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie = Russian Coatings Journal*, 2016, no. 6, pp. 32–35 (in Russian).
8. Neelova O. V., Gazzaeva P. A., Koblova L. B. Protective coatings based on organosilicon ladder block copolymers used in microelectronics. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2016, no. 2-1, pp. 76–80 (in Russian).
9. Shaidurova G. I., Lobkovskii S. A., Vasil'ev I. L. Derivatographic study of metal-filled heat-resistant coatings on an organosilicon basis. *Promyshlennaya okraska = Industrial Coatings*, 2007, no. 5, pp. 42–43 (in Russian).
10. Bezzaponnaya O. V., Golovina E. V. Evaluation of the effect of mineral fillers on the heat resistance and flammability of the intumescent type flame retardant composition on a silicone base. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 96–100. <https://doi.org/10.1134/s1070427218010159>
11. Koshevar V. D., Kazhuro I. P., Shkadretsova V. G., Pis'menskaya A. S. Wetting of isotropic microtextures formed on the surface of glass and aluminum. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 309–317 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-309-317>

Информация об авторах

Кошевар Василий Дмитриевич – д-р хим. наук, профессор, зав. лаб. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: koshevar@igic.bas-net.by

Шкадрецова Валентина Георгиевна – ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shgv@igic.bas-net.by

Письменская Александра Сергеевна – мл. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: as.pismenskaya@mail.ru

Information about the authors

Vasily D. Koshevar – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: koshevar@igic.bas-net.by

Valentina G. Shkadretsova – Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shgv@igic.bas-net.by

Alexandra S. Pismenskaya – Junior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: as.pismenskaya@mail.ru