
АТМОСФЕРОСТОЙКОСТЬ ОРГАНОСИЛИКАНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫБОРА ПИГМЕНТА

© 2023 г. В. И. Вошиков^{1, *}, Л. Н. Красильникова¹, Chi Văn Nguyễn², А. М. Николаев¹, В. А. Асеев⁴, О. А. Шилова^{1, 3, **}

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 190034 Россия

²Coastal Branch, Joint Vietnam–Russia Tropical Science and Technology Research Center,
30 Nguyen Thien Thuat, Nha Trang, 5712 Vietnam

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
ул. Проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197022 Россия

⁴Университет ИТМО, Биржевая линия, 4, Санкт-Петербург, 190034 Россия

*e-mail: voshikoff@yandex.ru

**e-mail: olgashilova@bk.ru

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

Представлены результаты исследования атмосферостойкости защитно-декоративных органосиликатных покрытий, приготовленных с использованием органосиликатных композиций на основе полидиметилфенилсилоксана в качестве связующего и гидросиликатов в качестве наполнителей. Цвет покрытий варьировался за счет использования пигментов: природных минералов FeO_x желтых, красно-коричневых и коричневых оттенков цветов. Методами рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что состав минералов в первую очередь определяется оксидами железа в кристаллической модификации гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и гетита ($\alpha\text{-FeO(OH)}$). Пигменты содержат небольшое количество примесных соединений ряда элементов, вносящих вклад в цветовую гамму покрытий. Органосиликатные покрытия экспонировались в течение 11 мес. в тропическом климате двух климатических зон Вьетнама (в пригородах Нячанга и Хошимина). Высокая коррозионная стойкость и стабильность цвета покрытий были установлены в течение всего периода испытаний. По незначительным изменениям цвета и блеска, выявленным спектрофотометрическим и фотоэлектрическим методами, показано, что более высокая стойкость к солнечной радиации и другим неблагоприятным климатическим факторам характерна для покрытий с коричневым пигментом на основе гематита, а наименьшая — с желтым пигментом на основе гетита.

Ключевые слова: органосиликатные покрытия, оксиды железа, фазовый состав, цветостойкость, декоративные свойства, защитные свойства

DOI: 10.31857/S0132665123600346, EDN: EMHFZP

ВВЕДЕНИЕ

Защитно-декоративные покрытия, эксплуатируемые в различных климатических, в том числе и тропических, условиях подвергаются воздействию солнечной радиации, влаги, кислорода воздуха и других атмосферных факторов, приводящих к старению и последующему разрушению лакокрасочной системы. Особое влияние оказывает уль-

Таблица 1. Энергия связей, ккал/моль [8]

Связь	Энергия	Связь	Энергия
Si–Si	53	C–C	82.6
Si–C	78	–	–
Si–O	106	C–O	85.5
Si–H	76	C–H	98.7
Si–F	135	C–F	116
Si–Cl	91	C–Cl	81
Si–Br	74	C–Br	68
Si–I	56	C–I	51

трафиолетовое (УФ) излучение, интенсивность которого в тропическом климате за год может достигать 37.7 кДж/см^2 [1, 2]. Разработка покрытий с повышенной устойчивостью к действию атмосферных факторов тропического климата является серьезной проблемой.

Матрица органосиликатных покрытий состоит из полимерного кремнийорганического связующего и наполнителей, которыми являются слоистые гидросиликаты и пигменты — оксиды тугоплавких металлов [3, 4]. В каждом из перечисленных компонентов агрессивные УФ лучи, с длиной волны $0.295\text{--}0.400 \text{ мкм}$, вызывают физико-химические изменения, влияют на цвет покрытия, рельеф его поверхности, катализируют химические превращения и в результате сокращают срок службы покрытия [5, 17].

В УФ части излучения солнечного спектра разрушение лакокрасочных покрытий начинается с их поверхностного слоя, который представляет собой тонкую полимерную пленку ($0.5\text{--}1.0 \text{ мкм}$). В пленкообразователе происходят физико-химические превращения, приводящие к деструкции полимера и активации фотохимических процессов с образованием олигомеров и/или свободных радикалов и с выделением газов. В результате поверхность покрытия изменяет цвет, появляется шероховатость, ухудшается блеск [6, 7, 18].

Устойчивость пленкообразователей к разрушению во многом определяется их составом и химическим строением, прочностью связей основной полимерной цепи. В табл. 1 приведены литературные данные значений энергий связи, характерных для полимеров с основной углеродной цепью C–C и полисилоксанов со связью Si–O–Si [8].

Так, в карбоцепных полимерах наиболее слабой является связь углерод–углерод, которая составляет основу углеводородных молекул, поэтому при облучении разрыв происходит по основной цепи. В случае кремнийорганических полимеров более слабыми оказываются боковые связи кремний–углерод, где и возможен отрыв радикалов, но при этом сохраняются звенья основной полисилоксановой цепи. Силоксановая связь Si–O–Si, являющаяся основной в органосиликатных покрытиях, отличается от связи C–C в карбоцепных полимерах высокой прочностью. Это обеспечивает покрытия на основе кремнийорганических полимеров стойкость к воздействию многих агрессивных факторов — воздействию высокой температуры и радиационного облучения.

Минеральные наполнители и пигменты повышают стойкость органосиликатных покрытий к действию УФ лучей. Однако для некоторых оксидов металлов в УФ области светового потока характерна фотокаталитическая активность, которая оказывает негативное влияние на состояние внешнего вида покрытия и сохранность его свойств [9]. Известным примером является диоксид титана, который может существовать в нескольких полиморфных модификациях, в зависимости от строения кристаллической решетки. Практически используются две модификации — рутил и анатаз, отли-

чающиеся по свойствам. Диоксид титана в фазе рутила широко применяется в качестве пигмента благодаря высокой разбеливающей способности, хорошей укрывистости, атмосферо- и влагостойкости. Анатаз как пигмент встречается гораздо реже, из-за более низкого уровня пигментных свойств и способности проявлять под действием УФ лучей большую фотокаталитическую активность, приводящую к протеканию окислительно-восстановительных реакций в пленкообразователе [10]. В результате происходит ухудшение свойств полимера (деструкция, выцветание, меление и т.д.) и, в конечном счете, разрушение материала.

В работе [3] показано влияние соединений хрома (разной валентности) со степенью окисления +3 и +6 на состояние органосиликатных покрытий с кремнийорганической полимерной матрицей при испытаниях в условиях тропического климата. Так, авторы [3] использовали хроматы стронция и молибдена — соединения хрома(VI), и оксид хрома(III). Защитные свойства этих покрытий после испытаний в тропическом климате в течение года по ГОСТ 9.401 были оценены баллом А1 — отсутствие признаков разрушения покрытий. По декоративным показателям более стойкими оказались покрытия с оксидом хрома(III) в качестве пигмента. Покрытия с хроматами изменили цвет под действием УФ излучения и влаги атмосферы тропического климата.

Широкое применение в производстве красок и эмалей находят железоксидные пигменты. Они полиморфны, известно 16 соединений оксидов и гидрооксидов железа, которые отличаются валентностью, строением кристаллической решетки, свойствами, а также обладают большим разнообразием цветов — желтый, красный, черный и промежуточные оттенки [11]. Наличие того или другого цвета, прежде всего, обусловлено электронной структурой оксидов железа: при степени окисления (Fe^{+2}) оксид FeO (закись железа) имеет черный цвет; цвет оксида Fe_2O_3 (Fe^{+3}) относится к красному спектру с возможными оттенками; в оксиде Fe_3O_4 — в магнетите, сосуществуют катионы железа, как в степени окисления Fe^{2+} , так и в Fe^{3+} , его цвет меняется от черного до буро-коричневого в зависимости от соотношения этих катионов. Гидролизированный оксид железа (Fe^{+3}) имеет желтый цвет.

Цель данной работы — анализ результатов натурных испытаний на атмосферостойкость и цветостойкость органосиликатных покрытий, содержащих в качестве пигментов оксиды железа разных цветов, в экстремальных условиях тропического саванного и субэкваториального климата.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез органосиликатной композиции. Для получения экспериментальных покрытий за основу взят состав органосиликатной композиции (ОСК) ОС-51-03 зеленой (ТУ 84-725-78), содержащей связующее — полидиметилфенилсилоксан и наполнители — гидросиликаты хризотил асбест и слюда мусковит, слоистая структура которых обеспечивает барьерный характер защиты покрытий от воздействия агрессивных атмосферных факторов [12].

Для расширения цветовой гаммы ОСП, вместо часто употребляемого зеленого пигмента оксида хрома (III), были использованы оксиды железа красного, коричневого и желтого цветов. Оксиды железа придают ОСП хорошую укрывистость, обеспечивают высокую интенсивность цвета, сохраняют свойства, регламентированные ТУ 84-725-78 “Органосиликатные композиции” — адгезия (ГОСТ 15140) 1 балл, теплостойкость не менее 300°C, удельное объемное сопротивление (ГОСТ 50499) 10^{14} Ом см.

В табл. 2 приведены литературные данные диапазонов значений физико-химических и технических свойств оксидов железа, которые обычно используются при синтезе лакокрасочных покрытий [13, 14].

Таблица 2. Физико-химические и технологические свойства оксидов железа [13, 14]

Наименование	Гетит	Гематит (красный)	Гематит (коричневый)
Формула	$\alpha\text{-FeOOH}$	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Показатель преломления	2.27–2.38	2.87	—
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	12–20	2–11	4.4–4.5
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	3.8–3.9	4.5–5.0	4.4–4.5
Укрывистость, $\text{г}/\text{м}^2$	12–20	6–15	—
Дисперсность, мкм	0.4–5.5	0.5–0.7	0.27–2.75

В нашем исследовании в качестве органического растворителя был использован толуол. Для формирования покрытий холодного отверждения в композиции перед нанесением был введен отвердитель АГМ-9 — аминпропилтриэтоксисилан, в количестве 2 мас. % по отношению к связующему полидиметилфенилсилоксану. Изготовление органосиликатных композиций для покрытий проводилось посредством механохимической обработки компонентов в шаровой мельнице в течение 48 ч.

Нанесение органосиликатных покрытий. Полученные композиции были нанесены на предварительно зачищенные и обезжиренные металлические пластины из стали 08пс методом пневматического распыления.

Время выдержки органосиликатных покрытий (ОСП) до начала испытаний составило 3 нед.

Исследование фазового состава пигментов. Для исследования фазового состава порошков оксидов железа использован метод порошковой рентгеновской дифракции. Съемка дифрактограмм проводилась на приборе RigakuMiniFlexII с графитовым монокроматором (CoK_α -излучение, диапазон углов 2θ 20° – 80° , шаг 0.01° , скорость съемки $2^\circ/\text{мин}$). Обработка полученных дифрактограмм выполнялась с помощью программного комплекса PDWin3 с использованием базы данных JCPDS.

Исследование состава пигментов. Для исследования состава пигментов использовался портативный рентгенофлуоресцентный (XRF) анализатор металлов и сплавов Bruker TRACER 5G. Использовался режим GeoMining.

Физико-технические свойства органосиликатных композиций. Исследования проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТов. Измеренные показатели свойств полученных покрытий были не хуже, а в некоторых случаях превышали нормы, приведенные в ТУ 84-725-78 для ОС-51-03 зеленой: адгезия (ГОСТ 15140) — 1 балл, термостойкость 350°C , удельное объемное сопротивление (ГОСТ 50499) — 10^{16} Ом см. Анализ спектров отражения (ГОСТ Р 52662-2006) показал, что цвета покрытий соответствовали цветам использованных оксидов железа.

Количественная оценка цветовых характеристик. Измерение цветовых характеристик ОСП проводилось портативным спектрофотометром X-Rite Ci6X. Способ измерения с геометрией D/8, который включает составляющую блеска, но позволяет учитывать только цвет образца (который определяется, прежде всего, содержанием пигмента) и не позволяет фиксировать возможную разницу в блеске или текстуре поверхности. С помощью прибора определяют количество красной, зеленой и синей компоненты при каждом измерении и использует эти данные для определения местоположения цвета в цветовом пространстве, посредством применения $L^* a^* b^*$ метрики. При этом по оси L измеряется светлота (в диапазоне от 0 до 100%), отображая коэффициент спектрального отражения, по оси a — красный-зеленый оттенок, по оси b — желтый-синий оттенок (в диапазонах от -120 до $+120$). Цветовое пространство и результаты измерений могут отображаться как в виде объемной фигуры, так и в 2-х мерном измерении. Смещение цветового тона, которое является количественной ха-

Таблица 3. Метеорологические данные за период экспозиции в двух разных климатических зонах Вьетнама с января по ноябрь 2022 года

Место проведения	Значения	Солнечная радиация, МДж/м ²	Ультрафиолет, МДж/м ²	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Давление воздуха, мм рт. ст.	Количество осадков, мм
Нячанг	Среднее			27.1	80.4	755.9	
	Суммарное	6773.7	377.6				1128.4
Хошимин	Среднее			29.9	75.0	757.2	
	Суммарное	13357.6	305.8				1856.4

раактеристикой изменения цветовых параметров покрытия в процессе испытания, определяется величиной ΔE .

Оценка блеска покрытий. Измерение блеска органосиликатных покрытий осуществлялось портативным блескомером Novo-Gloss TRIO. Оценка блеска происходила на основе изменения интенсивности отраженного света при угле освещения/наблюдения 60°/60°.

Место и условия проведения испытаний. Натурные испытания ОСП проводились на климатических исследовательских станциях (КИС) Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Тропцентра) в окрестностях г. Нячанга (КИС Дам Бай) и г. Хошимина (КИС Кон Зо). Климатические условия на этих КИС отличались по интенсивности солнечной радиации, уровню ультрафиолетового излучения (УФ) и количеству выпавших осадков. Для КИС Дам Бай характерны большая интенсивность УФ при меньшем уровне солнечного излучения и более длительный сухой сезон, климат относится к тропическому саванному. На КИС Кон Зо климат субэкваториальный с длительным сезоном дождей и высокой интенсивностью УФ.

Время экспозиции составило 11 мес. на открытых бетонных площадках на КИС Дам Бай и КИС Кон Зо, метеорологические показатели для которых приведены в табл. 3.

Оценка защитных свойств покрытий проводилась визуально с ежемесячным фотографированием стендов с образцами. Декоративные свойства оценивались с помощью спектрофотометра и блескомера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав пигментов. По данным рентгенофазового анализа (рис. 1) выбранные для синтеза органосиликатных покрытий пигменты — оксиды железа природного происхождения, были идентифицированы следующим образом. Основными кристаллическими фазами, содержание которых более 5 мас. %, являются: для пигмента желтого цвета — α -FeO(OH) — минерал гетит (рис. 1. (1), номер карточки JCPDS No 29-713); для пигментов красного и коричневого цвета — α -Fe₂O₃ — минерал гематит (рис. 1. (2, 3), номер карточки JCPDS No 33-664) Железо в исследуемых оксидах имеет степень окисления 3⁺.

Желтый пигмент представляет собой гидрат оксида железа гетит — α -FeO(OH). Гетит достаточно устойчив к действию УФ излучения и атмосферных влияний, его укрывистость выше, чем у других желтых пигментов — 12–20 г/м², размер частиц 0.2–0.6 мкм (от дисперсности порошков, в том числе, может зависеть оттенок — лимонно-желтый, желтый, оранжевый) [13, 15], но при нагреве выше 180°С изменяет свой цвет на красный, переходя в α -Fe₂O₃.

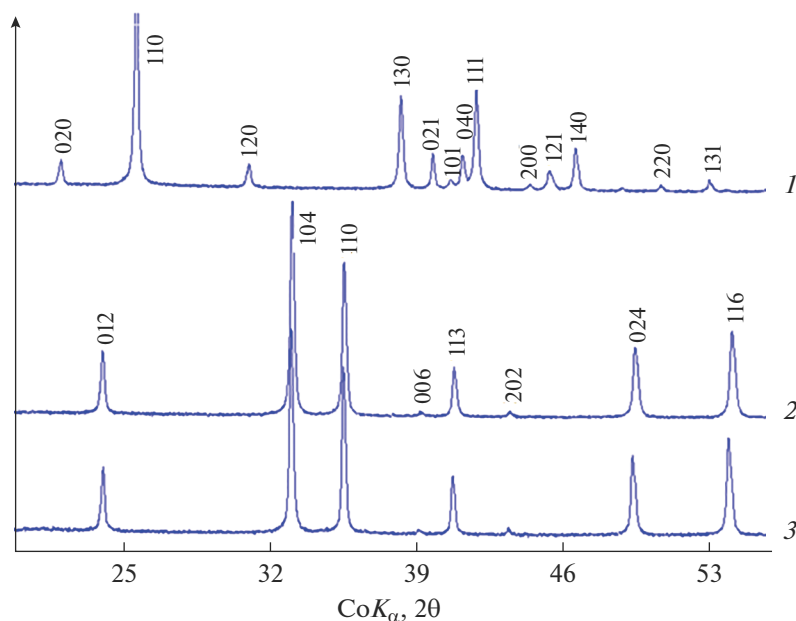


Рис. 1. Рентгенограммы использованных порошков природных пигментов на основе оксидов железа.

Оксид железа Fe_2O_3 может существовать в четырех полиморфных модификациях [16]. Самым стабильным является полиморф гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, который кристаллизуется в тригональной сингонии. Железо принимает октаэдрическую координационную геометрию, в которой каждый атом железа связан с шестью атомами кислорода. Расположение этих октаэдрических единиц в кристаллической решетке определяет ее структуру.

Гематит — амфотерный оксид с преобладанием основных свойств; главное его преимущество по сравнению со многими пигментами, особенно органическими, термическая стабильность. Кроме этого, оксид не реагирует с водой и непроницаем для влаги, непрозрачен для УФ лучей, благодаря высоким показателям плотности (см. табл. 2) и твердости он придает покрытиям механическую прочность. Цвет гематита находится в красном спектре. Возможные оттенки могут быть связаны с наличием в пигментах природного происхождения рентгенонеразличимых примесей.

В табл. 4 представлены результаты исследования состава пигментов методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Из табл. 4 показано малое содержание оксидов кремния и алюминия, которые являются примесью к природным оксидам железа в виде полевых шпатов (алюмосиликатов). Различное содержание оксида железа в случае красок на основе гематитов может приводить к цветовому отличию пигментов.

Цветовые характеристики покрытий. Результаты изменения цветовых характеристик органосиликатных покрытий за период натурных испытаний отображен на цветовых диаграммах CIELAB 1931 (рис. 2–4). На диаграммах показано смещение цветового оттенка (ΔE) за 11 мес. Каждый оттенок цвета был сопоставлен с каталогом цветов RAL Classic.

За период натурных испытаний в течение 11 мес. на исследуемых образцах визуально цвет покрытий остался прежним.

Таблица 4. Процентное содержание состава пигмента в пересчете на оксиды

Гетит	Гематит (красный)	Гематит (коричневый)
Fe_2O_3 – 57.18%	Fe_2O_3 – 40.04%	Fe_2O_3 – 63.1%
Al_2O_3 – 1.22%	Al_2O_3 – 0.78%	Al_2O_3 – 1.46%
SiO_2 – 0.41%	SiO_2 – 0.39%	SiO_2 – 0.4%
SO_2 – 0.097%	SO_2 – 0.09%	CaO – 0.16%
	Cr_2O_3 – 0.05%	SO_2 – 0.1%
		MnO – 0.09%

Из диаграммы цветности видно, что изменение тона цвета в субэкваториальном климате (г. Хошимине) происходит быстрее, чем в саванном тропическом (г. Нячанге). За весь период испытаний смещение цветового тона, $-\Delta E$, в Хошимине (13.53) в два раза больше, чем в Нячанге (6.53).

Контрольные образцы ОСП при постановке на натурные испытания имели оттенок цвета, близкий к RAL Classic 1011, который описывается как коричнево-бежевый. В течение 11 мес. натурных испытаний в саванном тропическом климате (КИС Дам Бай, г. Нячанг) оттенок покрытий сместился к RAL Classic 1004 (желто-золотой). Напротив, в условиях более экстремального субэкваториального климата (КИС Кон Зо, г. Хошимин) изменение цвета началось уже через 6 месяцев испытаний. За весь период экспозиции оттенок цвета был сопоставим RAL Classic 1004.

За период экспозиции в течение 11 мес. исследуемые образцы красного цвета визу-ально остались прежними.

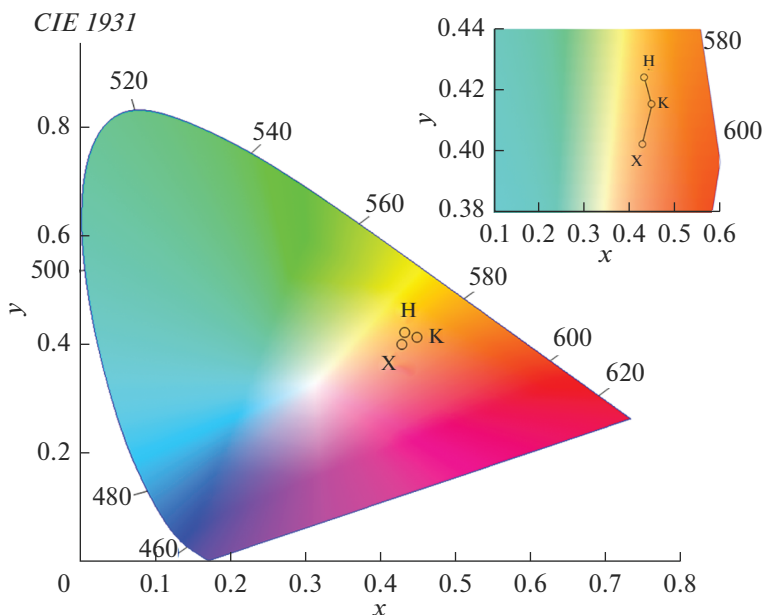


Рис. 2. Диаграмма цветности для покрытия желтого цвета. Вставка – увеличенная область расположения точек. Обозначение точек: К – контроль, Н – Нячанг, КИС Дам Бай, Х – Хошимин, КИС Кон Зо.

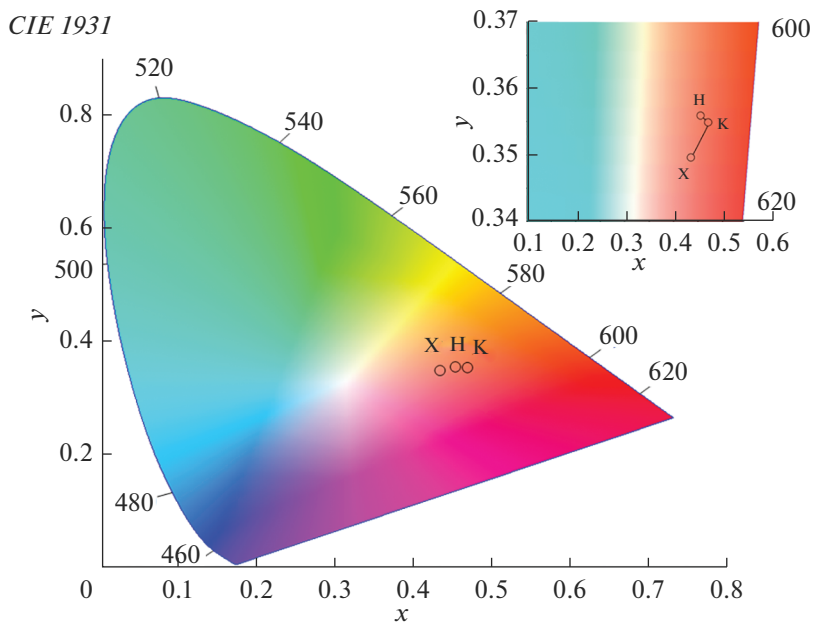


Рис. 3. Диаграмма цветности для покрытия красного цвета. Вставка – увеличенная область расположения точек. Обозначение точек: К – контроль, Н – Нячанг, КИС Дам Бай, Х – Хошимин, КИС Кон Зо.

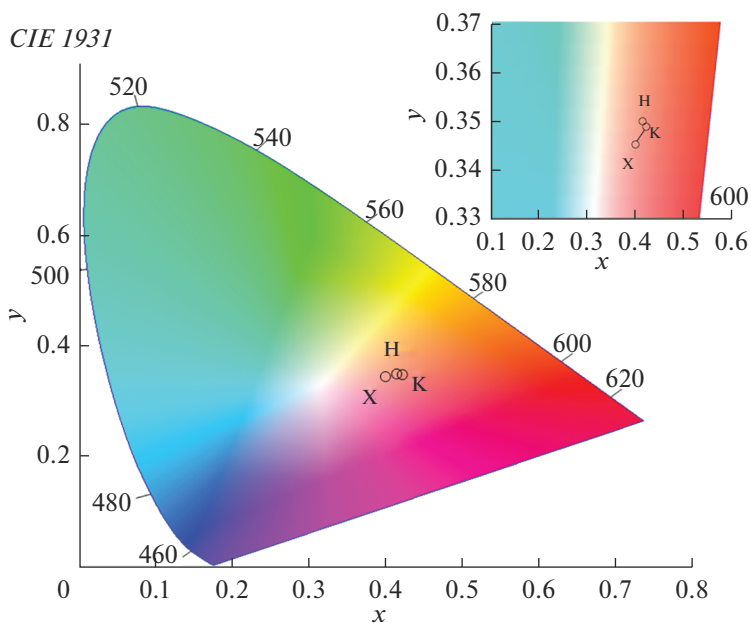


Рис. 4. Диаграмма цветности для покрытия коричневого цвета. Вставка – увеличенная область расположения точек. Обозначение точек: К – контроль, Н – Нячанг, КИС Дам Бай, Х – Хошимин, КИС Кон Зо.

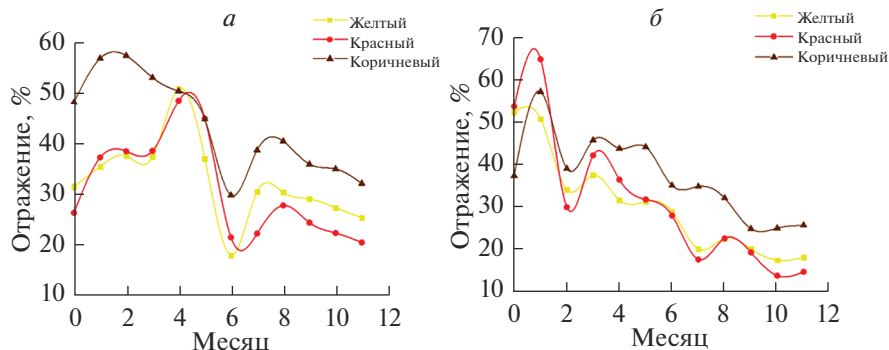


Рис. 5. Изменение блеска ОСП. Слева — г. Нячанг, КИС Дам Бай, справа — г. Хошимин, КИС Кон Зо.

Из диаграммы цветности видно, что изменение оттенка цвета в субэкваториальном климате (г. Хошимине) происходит быстрее, чем в саванном тропическом (г. Нячанге). ΔE меняется за период экспозиции в субэкваториальном климате в 2.4 раза быстрее, чем в саванном тропическом.

В начале испытаний ОСП красного цвета имели оттенок RAL Classic 8024 (бежево-коричневый). Уже после третьего месяца экспозиции в г. Нячанг оттенок сместился к RAL Classic 3033 (перламутрово-розовый). За весь период наблюдались перепады в оттенках цветов. За 11 мес. оттенок цвета остался бежево-коричневым. В г. Хошимине цвет покрытий также остался неизменным, за период испытаний были смещения по цвету.

За время проведения натурных испытаний в течение 11 мес. на исследуемых образцах коричневого цвета визуального изменения цвета не наблюдалось.

Из диаграммы цветности видно, что изменение оттенка цвета в субэкваториальном климате (г. Хошимине) происходит быстрее, чем в саванном тропическом (г. Нячанге). ΔE за период экспозиции в субэкваториальном климате (5.6) в 3 раза больше, чем в саванном тропическом (1.8).

При постановке ОСП коричневого цвета на натурные испытания образцы имели оттенок RAL Classic 8024 (бежево-коричневый). Через 11 мес. в саванном тропическом климате исследуемых ОСП, и в субэкваториальном климате оттенок цвета остался неизменным.

Изменение блеска ОСП. Результаты изменения блеска продемонстрированы на рис. 5.

Исходя из рис. 5 видно, что потеря блеска ОСП красного цвета происходит активнее. Второе место занимают ОСП желтого цвета. Потеря блеска коричневых образцов происходит медленнее, за 11 мес. блеск сохранился на 30–40%, в зависимости от КИС. Все ОСП, находящиеся в г. Хошимине, теряют блеск быстрее, чем ОСП в г. Нячанге. Отсутствие закономерности в потере блеска ОСП можно объяснить резкими изменениями метеорологических условий (солнечной радиации и осадков).

Атмосферная стойкость ОСП. В соответствии с ГОСТ 9.407, свойства атмосферостойкого покрытия оцениваются совокупностью защитных и декоративных характеристик по балльной системе. Покрытия, проходящие натурные испытания как в г. Нячанг, так и в г. Хошимин, показали хорошие защитные свойства. Но после 11-го мес. экспозиции покрытия желтого и коричневого цвета имели АЗ 1–2 балла (точка коррозии и отдельные пузыри на площади менее 5%) что может быть связано с повышенным уровнем осадков по сравнению с предыдущими месяцами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Натурные испытания органосиликатных покрытий разной цветовой гаммы в течение 11 мес. проведены на открытых площадках станций научно-исследовательского центра “Тропцентр” (СР Вьетнам) в районах с экваториальным (КИС Кон Зо) и саванным (КИС Дам Бай) тропическим климатом. Проанализировано влияние атмосферных факторов, характерных для каждой из климатических зон, на защитные и декоративные свойства покрытий.

Объектами исследований служили органосиликатные материалы, полимерной основой которых являются кремнийорганические полимеры, а в качестве пигментов использованы природные пигменты, основной составляющей которых являлись оксиды железа разных цветов – желтого – гидроксид железа (α -FeO(OH)), в природе известен как минерал гетит, красного – оксид железа (α -Fe₂O₃), минерал гематит и коричневого – оксид железа (α -Fe₂O₃), а также минерал гематит, но отличающийся от красного цвета размером и формой частиц и наличием примесей – соединений Mn.

Атмосферостойкость покрытий оценивалась визуально, с учетом требований ГОСТ 9.407. За период испытаний на открытых площадках станций Дам Бай и Кон Зо не были замечены дефекты на покрытиях в течение 10 мес.: трещины, пузыри, сыпь, отслаивание и др., появление очагов коррозии. Разрушение поверхностного слоя – точка коррозии и отдельные пузыри на поверхности менее 5% появилось на 11-ом месяце испытаний на обеих климатических станциях. Защитные свойства оценены в 1–2 балла.

Изменение декоративных свойств (по данным оптических свойств) в процессе натурных испытаний визуально не было обнаружено. Только с помощью инструментальных исследований оптических характеристик покрытий (цвета и блеска) удалось выявить незначительные изменения оттенков цвета и общую тенденцию к уменьшению блеска в зависимости от типа климатической зоны, где они экспонировались. Уменьшение блеска связано с изменением свойств полимерной матрицы, а изменение цвета характеризует степень устойчивости пигмента в условиях тропического климата. По проведенным исследованиям можно сказать, что изменения оптических свойств в экваториальном тропическом климате происходит быстрее, вне зависимости от выбора пигмента. По совокупности проведенных испытаний можно отметить наибольшую стабильность защитно-декоративных свойств у органосиликатных покрытий красного цвета, в которых в качестве пигмента использовался природный минерал на основе гематита α -Fe₂O₃.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены за счет средств темы НИР ИХС РАН 0081-2022-0006, а также субсидии Минобрнауки РФ; атмосферные натурные испытания выполнены на базе Российско-Вьетнамского научно-исследовательского и технологического тропического центра, рентгенофлуоресцентный анализ проведен на оборудовании Университета ИТМО.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликтов интересов в отношении содержания этой статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ицко Э.Ф. Экологические проблемы стойкости техники и материалов. Теория и практика натурных испытаний (Сб. докл. науч.-практ. конф. 29 октября–1 ноября 1996 г.). РАН. Ин-т проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцева. Субтропический испытательный центр. М. 1997. С. 126–130.
2. Андреева Н.П., Павлов М.Р., Николаев Е.В., Славин А.В. Влияние климатических факторов тропического и умеренного климата на свойства лакокрасочных покрытий на уретановой основе // Лакокрасочные материалы и их применение. 2018. № 4. С. 24–28.

3. Красильникова Л.Н., Макарова Ю.Н., Михалев В.А., *Nguyễn Văn Chi*, Шилова О.А. Исследование цветовых характеристик органосиликатных покрытий с различными пигментами в условиях морского тропического климата // Физика и химия стекла. 2021. Т. 47. № 6. С. 689–696. [Krasil'nikova L.N., Makarova Y.N., Mikhalev V.A., Chi Văn Nguyễn, Shilova O.A. Study of the Color Characteristics of Organosilicate Coatings with Various Pigments Under a Tropical Marine Climate. *Glass Phys Chem*. 2021. 47. 671–675].
4. Шевченко В.Я., Шилова О.А., Кочина Т.А., Барина Л.Д., Белый О.В. Экологически безопасные защитные покрытия для транспорта // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 6. С. 593–602.
5. Семенова Л.В., Новикова Т.А., Нефедов Н.И. Климатическая стойкость и старение лакокрасочных покрытий // Авиационные материалы и технологии. № 53. М. 2014. С. 31–34.
6. Антонова М.В., Божеевалов Д.Г., Котелевец Н.А., Обухов П.В., Соколов Ю.С. Анализ влияния экстремальных климатических условий на лакокрасочные покрытия и коррозионное поведение металлов // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. С. 105–112.
7. Николаев Е.В., Павлов М.Р., Андреева Н.П., Славин А.В., Скирта А.А. Исследование процессов старения полимерных композиционных материалов в натуральных условиях тропического климата Северной Америки. 2018. № 3–4 (20). С. 61–70.
8. Pauling L. T. The Nature of the Chemical Bond 3 rd ed. New York Cornell Univ. Press. 1960. 664 p.
9. Морозов А.Н. Синтез и каталитические свойства наноструктурированных покрытий диоксида титана. Дисс. ... канд. хим. наук. М. 2014. 127 с.
10. Берт Ван Хахт Г. Диоксид титана TUPURE R-931 – оптимальное решение проблемы повышения укрывистости лкм для матовых покрытий // Лакокрасочная промышленность. 2008. № 1 С. 20–23.
11. Rochelle M. Cornell, Udo Schwertman. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses, 2nd, Completely Revised and Extended Edition. 2004. 703 p.
12. Буслаев Г.С., Кочина Т.А., Красильникова Л.Н., Милюткина П.А., Шилова О.А. Теплостойкие защитные органосиликатные покрытия для атомной энергетики // Физика и химия стекла. 2020. Т. 46. № 4. С. 444–448. [Buslaev G.S., Kochina T.A., Krasil'nikova L.N., Milyutina P.A., Shilova O.A., Heat-Resistant Protective Organosilicate Coatings for Nuclear Energy // *Glass Phys Chem*. 2020. 46 (4). 357–359].
13. Гуревич М.М., Ицко Э.Ф., Середенко М.М. Оптические свойства лакокрасочных покрытий. СПб. Профессия. 2010. 220 с.
14. Кочергин А.В., Краснобай Н.Г. Состояние рынка железистых пигментов и пигментированных наполнителей и перспективы использования природного сырья // ЛКМ. 2003. № 1. С. 3–14.
15. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. СПб.: АНО НПО Профессионал, 2005. Ч. II. 1142 с.
16. Libor Machala, Jirí Tucek, Radek Zboril Polymorphous Transformations of Nanometric Iron(III) Oxide: A Review // *Chemistry of Materials*. 2011. P. 3255–3272.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52.
18. Нонг Куок Куанг, Нгуен Ван Чьеу, Май Ван Минь, Фан Ба Ты, Нгуен Ван Чи, Донг Ван Кьен, Ле Хонг Куан, Као Ньят Линь, Ануфриев Н.Г. Результаты натурных испытаний лакокрасочных покрытий для прибрежных сооружений и судов в тропическом климате Вьетнама // Журн. Практика Противокоррозионной Защиты. 2021. Т. 26. № 1. С. 17–27.