

СУПЕРГИДРОФОБИЗАЦИЯ ОКРАШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ И ПРИДАНИЯ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛАМ

© 2024 г. Е. А. Кузина¹, А. М. Емельяненко^{1,*}, академик РАН Л. Б. Бойнович¹

Поступила 12.12.2024 г.

После доработки 13.01.2025 г.

Принято к публикации 20.01.2025 г.

Предложен метод супергидрофобизации слоя эпоксидной эмали на основе применения импульсной лазерной обработки и хемосорбции на текстурированную поверхность эмали фторированного силана. Показано, что гибкое управление параметрами лазерного излучения позволяет текстурировать поверхность эмали без ее перегрева и последующего разрушения. Экспериментальные исследования показали, что в результате супергидрофобизирующей обработки улучшаются защитные свойства эмали и появляются новые функциональные свойства, такие как водоотталкивающие свойства с экстремальными углами смачивания и скатывания, повышенная стойкость как к абразивным нагрузкам, так и к поверхностным напряжениям, возникающим в зоне трехфазного контакта при кристаллизации воды и плавлении льда.

Ключевые слова: эмаль, супергидрофобность, смачивание, лазерная обработка, стойкость, абразивная нагрузка, защитные свойства, защита от коррозии, противообледенительные свойства

DOI: 10.31857/S2686953524060031, EDN: BOVJLP

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных защитных покрытий красочные покрытия занимают особое место благодаря своей способности придавать цвет и возможности маркировать изделия. Однако пигменты, необходимые для придания требуемого цвета поверхности изделий, одновременно могут в значительной степени ухудшать защитные свойства покрытия. В частности, гидрофильность поверхности пигментов будет приводить к активному взаимодействию окрашенной поверхности с водой, а низкие барьерные свойства к переносу заряда и ионов приведут к ухудшению противокоррозионной защиты таким покрытием. Наконец, физико-химические свойства поверхности красочного слоя, обеспечивающие сильные электростатические и ван-дерваальсовы взаимодействия между покрытием и водными средами, как жидкими, так и твер-

дыми, будут способствовать накоплению воды, снега и льда на поверхности окрашенных конструкций. Здесь необходимо подчеркнуть, что от слоя краски на конструкции, работающей в определенных климатических условиях (на открытом воздухе), требуется комплексная защита от различных атмосферных воздействий. Как показали последние исследования, придание поверхности супергидрофобных свойств позволяет обеспечить полифункциональную защиту [1–6]. Однако попытки супергидрофобизации поверхности красочных слоев для промышленных технологий пока нельзя рассматривать как вполне успешные. Связано это, в первую очередь, со сложностью нанесения таких слоев и их невысокой стойкостью в условиях эксплуатации на открытом воздухе [2, 7–9].

В данной работе предлагается новый подход к решению проблемы супергидрофобизации красочных слоев различного состава, основанный на применении импульсной лазерной обработки окрашенной поверхности. Далее будет показано, что к основным достоинствам данного подхода относится не только придание водоотталкивающих свойств поверхности исходно

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, 119071 Москва, Россия

*E-mail: ame@phyc.ac.ru

гидрофильных окрашенных поверхностей, но и значительное усиление других защитных свойств красочного слоя. На примере коммерчески производимой эмали ЭП-140 мы покажем, что это защитное покрытие с иерархической поверхностной шероховатостью характеризуется принципиально новым уровнем функциональной защиты. Полученные потребительские свойства включают высокую стойкость к абразивному износу, поверхностным напряжениям, возникающим при циклической кристаллизации/плавлении воды, и значительное повышение коррозионной стойкости при непосредственном контакте супергидрофобизованного окрашенного слоя с агрессивными хлоридсодержащими растворами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Супергидрофобные свойства красочному слою придавали импульсной лазерной обработкой эпоксидной двухкомпонентной эмали ЭП-140, очень широко применяемой в промышленности для нанесения на металлические поверхности. В качестве подложки в данной работе использовались пластины алюминиевого сплава Д16 (ООО “Продиэл”, Москва, Россия). Для окрашивания использовали компоненты эмали ЭП-140 – полуфабрикат эмали белого цвета с отвердителем № 2 (ЯЗЛМ, Россия) и грунт ЭП-0215 с аминопропилтриэтоксисилановым отвердителем АСОТ-2 (ЯЗЛМ, Россия). Грунтовочный слой толщиной ~100 мкм и слой эмали толщиной ~150 мкм наносили пневматическим распылением в соответствии с инструкцией производителя.

Чтобы поверхность эмали, нанесенной на металлическую подложку, приобрела супергидрофобные свойства, после полного высыхания (не менее 24 ч при комнатной температуре) ее обрабатывали наносекундным лазерным излучением для придания иерархической шероховатости. Для этого использовался лазерный комплекс Аргент-М (“Центр лазерных технологий”,

Россия) на основе иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1.064 мкм с возможностью выбора длительности импульсов в интервале от 4 до 200 нс, частоты импульсов от 20 до 100 кГц, с пиковой мощностью излучения до 0.95 мДж в моде ТЕМ₀₀. Фокальное пятно лазера размером 40 мкм перемещалось по слою краски с помощью двухосевой отклоняющей системы MS10 (Raylase, Германия). Особенностью большинства лакокрасочных покрытий, широко используемых в авиации и в городском хозяйстве, является их низкая стойкость при температурах выше 105–150°C. Для предотвращения разрушения слоя краски при создании супергидрофобного покрытия с применением лазера в данной работе подбирались режимы импульсной лазерной обработки, которые, с одной стороны, создают и упрочняют элементы текстуры красочного слоя, с другой стороны, исключают длительный нагрев поверхности на значительной площади. Удовлетворение таким требованиям становится возможным при использовании узких лазерных пучков с диаметром фокального пятна 30–40 мкм и небольшой длительностью лазерного импульса, не превышающей десятки наносекунд. Предварительно был подобран двухэтапный режим обработки, параметры которого представлены в табл. 1.

Применение указанного режима лазерной обработки не приводит к разрушению эмали и, как будет показано далее, способствует образованию износостойких микро- и наноэлементов текстуры. Полученная текстура имеет супергидрофильные свойства, способствующие быстрому растеканию и впитыванию капли воды при ее помещении на поверхность. Для достижения супергидрофобных свойств на поверхность текстурированного слоя эмали хемосорбировался гидрофобный агент, основным назначением которого является снижение поверхностной энергии краски и формирование двухмерной полимерной пленки. В качестве такого гидрофобного агента использовали триметокси-3[(пентадекафтороктил)-окси]-пропил-силан (ИНЭОС

Таблица 1. Параметры лазерной обработки красочного слоя для получения иерархической шероховатости поверхности

Этап	Относительная мощность, %	Скорость сканирования, мм с ⁻¹	Плотность сканирования, линий/мм	Частота импульсов, кГц	Длительность импульсов, нс
1	55	1500	20	300	20
2	65	7500	20	200	30

РАН, Россия), который в течение 1 ч наносили из паров при $T = 95^\circ\text{C}$ на поверхность, предварительно обработанную плазмой при помощи плазмотрона Plasma Cleaner PDC-030 (Zhengzhou CY Scientific Instrument, Китай). Термическая обработка при $T = 105^\circ\text{C}$ полученного текстурированного слоя краски с адсорбированным гидрофобным агентом приводила к поперечной сшивке слоя фторсилана силоксановыми связями [11].

Исследование параметров смачивания и скатывания капли воды объемом 15 мкл выполняли на установках, разработанных и детально описанных нами ранее [10, 11]. Углы смачивания определяли для 5 участков на поверхности, углы скатывания усредняли по 10 измерениям на каждом образце.

Стойкость иерархической текстуры полученного нами супергидрофобного красочного слоя к абразивному износу, сопровождающему эксплуатацию окрашенных деталей на открытом воздухе, испытывали согласно стандарту ASTM F735. Для этого исследуемый образец размером 20×15 мм закрепляли на дне емкости, засыпали слоем калиброванного песка (фракция от 500 до 800 мкм) высотой 20 мм. Емкость с песком помещали на платформу вибрационного шейкера Vibramax 100 (Heidolph, Германия), которая совершала возвратно-поступательные движения с частотой 1050 мин^{-1} и амплитудой 3 мм. Силы инерции заставляют всю массу песка перемещаться внутри емкости и оказывать значительное абразивное воздействие на поверхность образца, закрепленного на дне емкости. Абразивная нагрузка длилась 120 мин. При этом каждые 5 мин образец доставали из емкости с песком, промывали в дистиллированной воде и сушили на нагретой до 50°C платформе в течение 10 мин. Затем измеряли углы смачивания и скатывания капель воды: эволюция величин углов позволяла оценить степень разрушения иерархической текстуры.

Поскольку одним из основных факторов, способствующих разрушению окрашенных слоев, контактирующих с атмосферными осадками, являются поверхностные механические напряжения, возникающие в зоне трехфазного контакта (покрытие/водная фаза/пар) во время кристаллизации водной фазы, нами была исследована стойкость покрытий к таким напряжениям. Для этого образец с супергидрофобным красочным слоем опускали в пластиковый контейнер, заполненный водой. Затем контейнер помещался

в климатическую камеру (Binder MK53, Германия), в которой при циклическом изменении температуры покрытие подвергалось воздействию тангенциальных поверхностных напряжений, возникающих при кристаллизации и плавлении воды в контейнере. Каждый цикл включал охлаждение камеры от 30 до -40°C в течение 45 мин, выдержку при этой температуре в течение 30 мин, нагрев камеры до $+30^\circ\text{C}$ в течение 30 мин и выдержку при этой температуре в течение 30 мин. Для отслеживания изменений свойств покрытия после определенного количества (10–30) циклов кристаллизации/плавления льда образец вынимали из контейнера и сушили в течение 10 мин на нагревательной платформе при 50°C . Далее измеряли углы смачивания и скатывания, значения которых использовались для оценки деградации покрытия под действием возникающих напряжений.

Для исследования противокоррозионных свойств супергидрофобизированного слоя эмали на алюминиевом сплаве Д16 исследуемый образец помещали в трехэлектродную ячейку, заполненную 0.5 М водным раствором NaCl, в качестве рабочего электрода. Образец контактировал с раствором по круговой зоне площадью 1 см^2 . Электродом сравнения служил хлорсеребряный электрод, заполненный насыщенным раствором KCl, а противоэлектродом служила платиновая сетка. Для приготовления электролитов использовали деионизированную воду сопротивлением 18 МОм см и хлориды Na и K марки “х. ч.”. Потенциодинамические поляризационные кривые и спектры импеданса регистрировали на электрохимической рабочей станции Elns P45X (Элинс, Россия) со встроенным модулем электрохимической импедансной спектроскопии FRA 24M. Измерения проводили при комнатной температуре ($24 \pm 2^\circ\text{C}$). Потенциодинамические поляризационные кривые снимали путем развертки потенциала со скоростью 1 мВ с^{-1} в сторону положительных значений. Спектр электрохимического импеданса регистрировали при потенциале разомкнутой цепи в диапазоне частот от 100 000 до 0.05 Гц с логарифмической разверткой 20 точек на декаду. Использовался возмущающий синусоидальный сигнал амплитудой 20 мВ . Электрохимические исследования проводили при непрерывном контакте с двумя типами образцов. Это образец алюминиевого сплава Д 16 с исходным красочным покрытием эмали ЭП-140 и такой же образец, покрытый супергидрофобизованной эмалью. Такой выбор объектов исследования позволял оценить за-

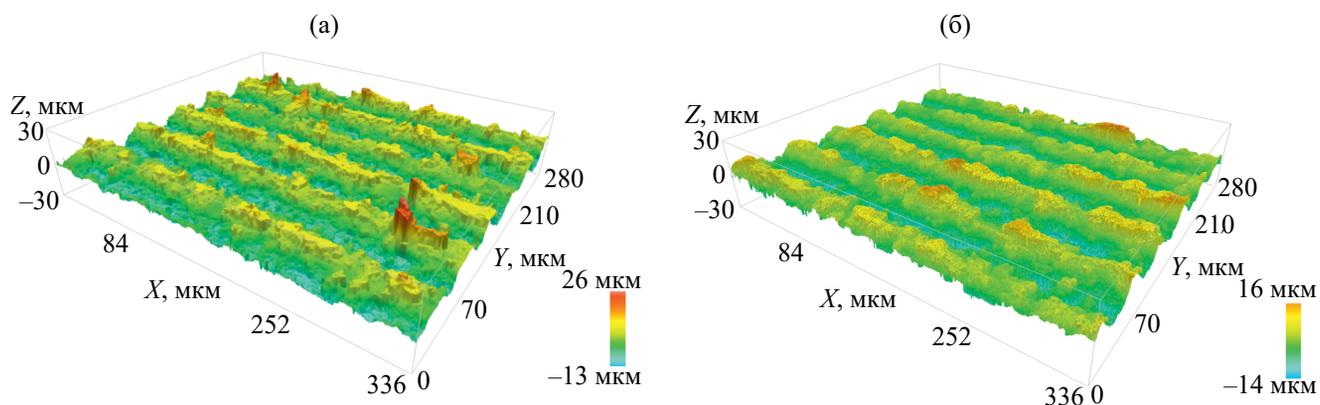


Рис. 1. Полученные методом конфокальной микроскопии трехмерные изображения профиля поверхности супергидрофобизованной краски до (а) и после (б) 120 мин абразивного воздействия под слоем вибрирующего песка.

щитный эффект, возникающий за счет супергидрофобизации эмали, как описано выше.

Наконец, морфологию поверхности краски после ее супергидрофобизации или после экспериментов по абразивному износу исследовали методом конфокальной микроскопии на приборе S neox (Sensofar Metrology, Испания).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Покрyтия, получаемые после нанесения эпоксидной эмали, обладают гидрофильными свойствами, поскольку угол смачивания, образуемый водной каплей на поверхности красочного покрытия, составляет $74^\circ \pm 2.4^\circ$. При этом соскальзывания капли с поверхности покрытия не происходит даже при угле наклона 90° , что указывает на большой гистерезис смачивания. Экстремально водоотталкивающие свойства супергидрофобизованного покрытия, полученного в результате обработки поверхности эмали лазерным излучением с последующей гидрофобизацией фторсиланом, подтверждаются углами смачивания и скатывания, которые составили $172.5^\circ \pm 0.4^\circ$ и $1.5^\circ \pm 0.5^\circ$ соответственно. Такие параметры покрытия однозначно указывают на достижение супергидрофобных свойств поверхности. Исследование морфологии полученных покрытий методом конфокальной микроскопии подтвердило формирование иерархической текстуры на поверхности покрытия (рис. 1а).

Отсутствие значимых изменений величин углов смачивания и скатывания при длительном контакте покрытия с водой или насыщенным водяным паром указывает на химическую стойкость красочного покрытия в водных средах и отсутствие гидратации поверхности при взаимодействии покрытия с водой.

Изменение супергидрофобных свойств окрашенной поверхности при многократных циклах замораживания воды/расплавления льда, описанных выше, оценивали по изменению углов смачивания и скатывания водных капель на двух образцах, приготовленных одинаково. На рис. 2 представлены графики изменения углов смачивания и скатывания на протяжении 100 циклов кристаллизации/плавления. Близкие значения углов, получаемые после одинакового количества циклов на разных супергидрофобных образцах, указывают на хорошую воспроизводимость измерений. Выше было показано, что химиче-

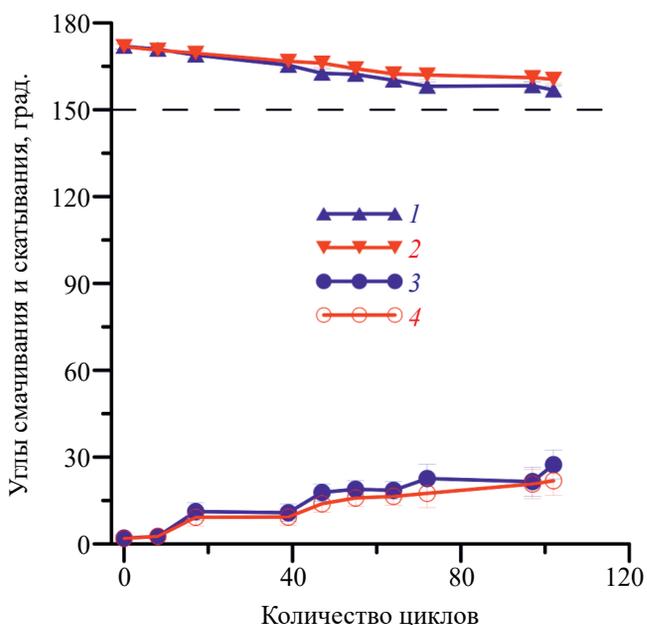


Рис. 2. Изменение углов смачивания (1, 2) и скатывания (3, 4) для поверхности двух супергидрофобных образцов под воздействием циклов кристаллизации воды/расплавления льда.

ская стойкость супергидрофобного покрытия к воздействию воды замедляет деградацию супергидрофобных свойств, поэтому наблюдаемые на рис. 2 изменения углов смачивания и скатывания следует отнести к постепенному незначительному разрушению иерархической текстуры под действием механических напряжений, возникающих при циклической кристаллизации воды/плавлении льда.

Установлено, что величина разрушающего напряжения, возникающего при замерзании в капиллярно-пористой системе, каковой является иерархическая текстура супергидрофобизированной эмали, зависит от соотношения скорости образования льда и релаксации избыточных локальных давлений, возникающих при кристаллизации [12]. Согласно работе [12], эти давления изменяются в диапазоне от 5×10^4 до 2×10^8 Па. Полученные в нашем исследовании данные позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на жесткие условия испытания образца, поверхность эмали после 100 циклов сохраняет супергидрофобные свойства с углами смачивания не менее 157° . Даже после завершения испытаний сохраняется скатывание водных капель с покрытия, что указывает на сохранение гетерогенного режима смачивания.

Рассмотрим теперь поведение созданных нами супергидрофобизированных эмалевых покрытий в условиях абразивных нагрузок. Количественно износ покрытия под действием абразивной нагрузки осциллирующим песком характеризовался изменением углов смачивания и скатывания на покрытии после определенного времени приложения нагрузки. На рис. 3 красными (2, 4) и синими (1, 3) символами показана эволюция параметров смачивания двух образцов супергидрофобизированной эмали при двухчасовом абразивном износе.

Анализ зависимости величин углов смачивания/скатывания от времени абразивного воздействия (рис. 3) показал наличие двух стадий разрушения текстуры. На первой стадии в течение первых 30 мин приложения абразивной нагрузки угол смачивания падает со 171.2° до 157.7° , а угол скатывания возрастает от 1.5° до 28.2° . По-видимому, именно на этом временном интервале с супергидрофобизированной поверхности удаляются единичные, сильно выступающие пики (рис. 1a). На второй стадии абразивная обработка не приводит к значимой дальнейшей деградации слоя супергидрофобной эмали, поскольку с увеличением времени износа по параметрам смачивания наблюдается выход

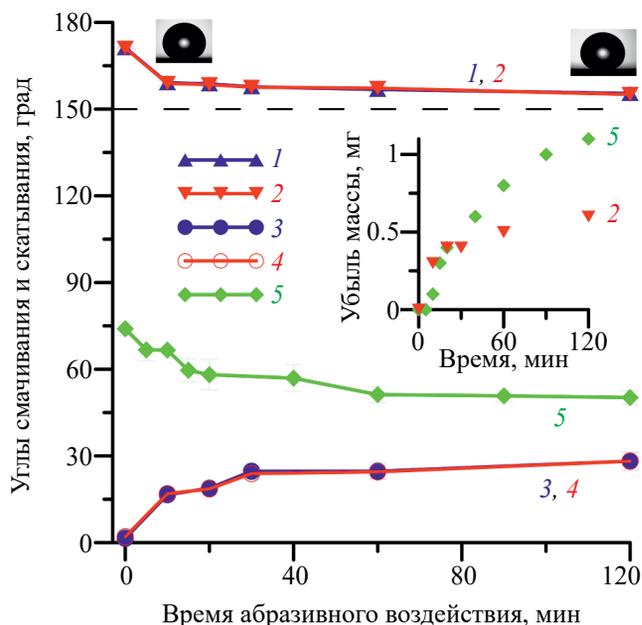


Рис. 3. Изменение углов смачивания (1, 2) и скатывания (3, 4) для поверхности двух супергидрофобных образцов, а также угла смачивания для поверхности окрашенного образца без последующей обработки (5) в зависимости от времени абразивного воздействия на образцы. Изображения капель у кривых (1, 2) соответствуют сидящим каплям до абразивной нагрузки (слева) и после 120 мин абразивного воздействия (справа). На врезке показано изменение массы окрашенных образцов после обработки лазерным излучением (2) и без обработки (5) в результате абразивного воздействия.

на плато. При этом даже после 2 ч эксперимента по абразивному износу сохраняется скатывание водных капель с поверхности, что свидетельствует о сохранении преимущественно гетерогенного режима смачивания окрашенного слоя с супергидрофобной обработкой.

Анализ эволюции угла смачивания для исходной эмали (рис. 3, кривая 5), позволяет выделить временной интервал 0–60 мин, в котором износ исходной эмали идет с большей скоростью. Дальнейшая абразивная обработка сопровождается медленным падением угла смачивания, что, по-видимому, связано с ростом шероховатости, который, согласно закону Венцеля [13], должен для гидрофильных материалов приводить к падению угла смачивания. Сравнение углов смачивания и скатывания для исходной и супергидрофобизированных эмалей позволяет сделать вывод о повышении стойкости к истиранию при супергидрофобизации поверхности. К такому же выводу можно прийти, анализируя убыль массы эмалевых покрытий при истирании песком. На врезке рис. 3 показана убыль массы образца с необработанной эмалью (кривая 5) и с

супергидрофобизированной эмалью (кривая 2) в зависимости от времени истирания. Эти данные указывают на снижение скорости потери веса через 30 мин после начала абразивного воздействия именно для образца с супергидрофобной эмалью. Здесь следует указать две возможные причины такого явления. Это упрочнение поверхности эмали при ее лазерной обработке и/или снижение коэффициента трения песка по поверхности с адсорбированными фторорганическими соединениями. Второй фактор хорошо известен в литературе [14–16]. Что касается лазерного упрочнения поверхности эмали, то конфокальное изображение супергидрофобизированной эмали после абразивного износа (рис. 16), на котором видно сохранение значительной доли текстуры, согласуется с этим предположением.

Рассмотрим теперь, как супергидрофобизация поверхности эмали ЭП-140 влияет на противокоррозионные свойства покрытия. Исследования электрохимических свойств проводились при непрерывном контакте образца с покрытием с коррозионно-активной средой в течение длительного времени, составлявшего для исходной эмали 42 дня, а для супергидрофобизированной эмали 62 дня. Прекращение эксперимента на образце с исходной эмалью ЭП-140 было связано с явным проявлением деградации противокоррозионных свойств.

Значения потенциала коррозии E_{corr} и тока коррозии i_{corr} вычисляли из кривых потенциоди-

намической поляризации с применением процедуры экстраполяции по Тафелю [17].

На рис. 4а представлена эволюция тока коррозии и поляризационного сопротивления покрытия для супергидрофобного красочного слоя ЭП-140 и для исходного красочного слоя. Полученные данные указывают, что для слоя эмали, нанесенного на образец сплава Д16 без применения супергидрофобизации поверхности (красные символы, кривые 1, 1'), в первые дни контакта эмали с электролитом ток коррозии также был экстремально низким, порядка 10^{-11} А см⁻², а поляризационное сопротивление высоким, порядка 10^9 Ом см². Однако уже после 30 дней контакта с раствором NaCl наблюдается вначале постепенное, а затем и резкое возрастание тока коррозии и падение поляризационного сопротивления. Так, на 42 день контакта с раствором величина тока коррозии оказывается на три порядка выше, чем в первые дни контакта, указывая на деградацию защитных свойств эмали. Напротив, данные для супергидрофобизированной краски (синие символы, кривые 2, 2') соответствуют экстремально низкому току коррозии (порядка 10^{-12} – 10^{-13} А см⁻²) и высокому поляризационному сопротивлению (10^{10} – 10^{11} Ом см²) в течение всех 60 сут непрерывного контакта покрытия с коррозионно-агрессивным раствором хлорида натрия. Таким образом, для супергидрофобизированной краски можно говорить о длительных и очень высоких противокоррозионных свойствах покрытия.

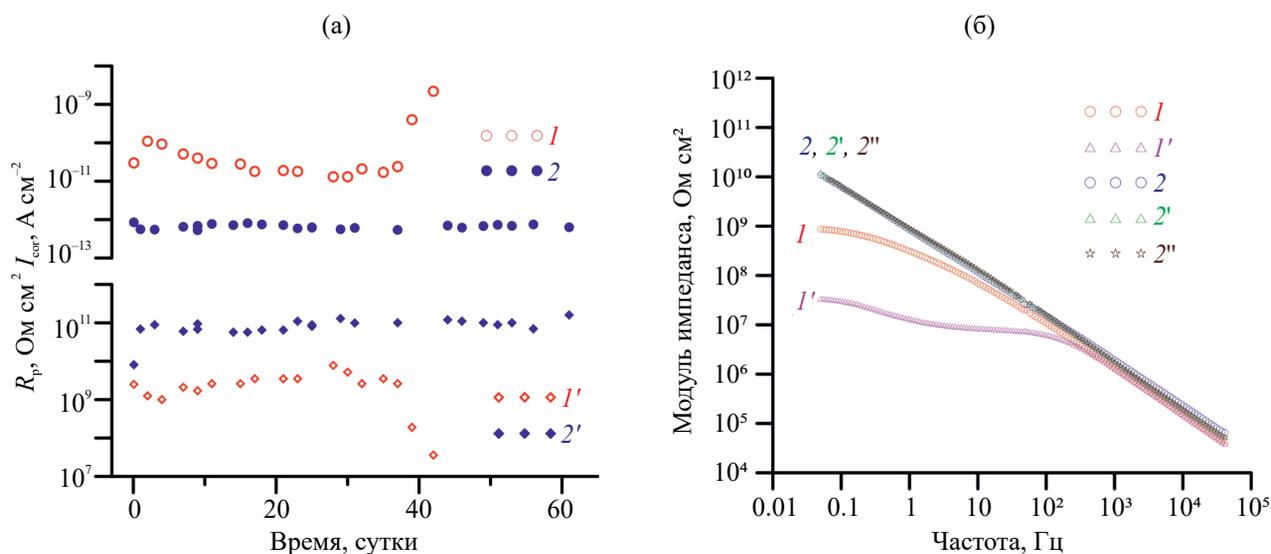


Рис. 4. Изменение электрохимических характеристик образца сплава Д16 с исходным (1, 1') и супергидрофобизированным (2, 2', 2'') красочными слоями эмали ЭП-140 при длительном контакте с 0.5 М раствором NaCl: (а) эволюция тока коррозии (1, 2) и поляризационного сопротивления (1', 2') покрытия; (б) частотные зависимости модуля импеданса для разных времен контакта: 24 ч (1, 2); 42 дня (1', 2'); 60 дней (2'').

Эти выводы подтверждаются и характером спектров модуля импеданса, представленных на рис. 4б. Здесь следует упомянуть, что спектр модуля импеданса при низких частотах ($f \approx 0.05$ Гц) дает информацию о барьерных свойствах покрытия по отношению переноса электронов, ионов и молекул воды через покрытие. Представленные на рис. 4б данные позволяют сделать два вывода. Во-первых, барьерные свойства супергидрофобного красочного покрытия оставались неизменными на протяжении всего времени эксперимента (60 сут). Во-вторых, для супергидрофобной краски эти свойства выше и на начальном периоде контакта с агрессивным раствором. Уже после 42 сут контакта слой эмали, не подвергавшийся супергидрофобной обработке, имеет модуль импеданса при низких частотах почти на 2 порядка ниже, чем при коротких временах контакта с электролитом и на 3 порядка ниже, чем супергидрофобное покрытие. Таким образом, представленные здесь результаты исследования электрохимических характеристик созданного нами супергидрофобного красочного покрытия указывают на значительное повышение противокоррозионных свойств и долговечности эпоксидных красок при их супергидрофобизации.

Здесь также следует упомянуть, что при контакте с коррозионно-активной средой сохраняются не только противокоррозионные свойства супергидрофобной краски, но и гетерогенный режим смачивания. Так, до начала электрохимического эксперимента углы смачивания и скатывания на супергидрофобной поверхности были $172.7^\circ \pm 0.3^\circ$ и $1.5^\circ \pm 0.5^\circ$ соответственно. После 62 дней контакта с электролитом поверхность покрытия характеризовалась углами смачивания и скатывания $157.7^\circ \pm 1.3^\circ$ и $46.2^\circ \pm 16.5^\circ$ соответственно. И хотя углы значительно изменились, самопроизвольное скатывание капель с покрытия при его наклоне и сохранение величин углов смачивания, превышающих 150° , доказывают установление именно гетерогенного режима смачивания, и, значит, сохранение супергидрофобных свойств покрытия. Интересно отметить, что на слое эмали без дополнительной обработки угол смачивания изменился от $73.7^\circ \pm 0.7^\circ$ до $77.6^\circ \pm 0.5^\circ$.

ВЫВОДЫ

В данной работе мы показали возможность придания поверхности эпоксидной эмали супергидрофобных свойств в результате лазерной обработки и хемосорбции на образующуюся тек-

стуру фторированных силанов. Здесь важно напомнить, что эпоксидные эмали не выдерживают нагрева до высоких температур и для исходной эмали ЭП-140 превышение температуры поверхности 150°C должно было бы приводить к разрушению окрашивающего слоя. Известно, что взаимодействие лазерного излучения с твердой абсорбирующей излучение поверхностью способствует значительному локальному разогреву поверхности [18]. Однако, как показали наши исследования, гибкое управление параметрами импульсного лазерного излучения позволяет текстурировать лазером поверхность без ее перегрева и последующего разрушения в условиях эксплуатации. Исследование защитных свойств полученного покрытия показало, что предложенная супергидрофобизирующая обработка позволяет значительно повысить защитные свойства эмали и придать ей новые функциональные свойства, такие как водоотталкивающие свойства с экстремальными углами смачивания и скатывания, повышенная стойкость как к абразивным нагрузкам, так и к поверхностным напряжениям, возникающим в зоне трехфазного контакта при кристаллизации воды и плавлении льда. Эти свойства значительно повысят ресурс покрытия и сохранения его функциональных свойств при эксплуатации на открытом воздухе.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Коллектив авторов благодарит академика РАН А.М. Музафарова за предоставление гидрофобизатора.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-73-30004, <https://rscf.ru/project/23-73-30004/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойнович Л.Б.* // Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 1. С. 10–22.
<https://doi.org/10.7868/S0869587313010039>
2. *Ogihara H., Okagaki J., Saji T.* // Langmuir. 2011. V. 27. № 15. P. 9069–9072.
<https://doi.org/10.1021/la200898z>
3. *Manabe K., Saikawa M., Sato I., Loo C.S., Takashita K., Norikane Y.* // ACS Appl. Polym. Mater. 2024. V. 6. № 22. P. 13701–13709.
<https://doi.org/10.1021/acsapm.4c02416>
4. *Бузник В.М.* // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1 (26). С. 29–34.
5. *Бойнович Л.Б., Бузник В.М., Гракович П.Н., Грязнов В.И., Пашинин А.С., Юрков Г.Ю.* // Докл. АН. 2015. Т. 462. № 4. С. 431–434.
<https://doi.org/10.7868/S0869565215160124>

6. Кондрашов Э.К., Нефедов Н.И., Веренинова Н.П., Куц П.П., Кичигина Г.А., Кирюхин Д.П., Бузник В.М. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 1. С. 2–10.
7. Кузина Е.А., Емельяненко К.А., Домантовский А.Г., Емельяненко А. М., Бойнович Л.Б. // Коллоид. журн. 2022. Т. 84. № 4. С. 453–464.
<https://doi.org/10.31857/S0023291222040097>
8. Diker C.Ö., Duman O., Tunç S. // Appl. Clay Sci. 2023. V. 244. P. 107109.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107109>
9. Diker C.Ö., Duman O., Tunç S. // Appl. Clay Sci. 2024. V. 262. P. 107626.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107626>
10. Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. // Приборы и техника эксперимента. 2002. Т. 45. С. 52–57.
11. Кузина Е.А., Омран Ф.Ш., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. // Коллоид. журн. 2023. Т. 85. № 1. С. 63–70.
<https://doi.org/10.31857/S0023291222600614>
12. Залесский Б.В., Флоренский К.П. // Труды института геологических наук. АН СССР. 1952. Т. 146. № 42. С. 39–50.
13. Wenzel R.N. // Ind. Eng. Chem. 1936. V. 287 № 8. P. 988–994.
<https://doi.org/10.1021/ie50320a024>
14. Prorokova N.P., Vavilova S.Y., Bouzник V.M. // J. Fluorine Chem. 2017. V. 204. P. 50–58.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2017.10.009>
15. Севостьянов Н.В., Розен А.Е., Бузник В.М., Логинов О.Н., Усатый С.Г., Болсуновская Т.А. // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 1. С. 55–62.
16. Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П., Бузник В.М. // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 6. С. 671–674.
17. Stern M., Geary A.L. // J. Electrochem. Soc. 1957. V. 104. P. 56–63.
<https://doi.org/10.1149/1.2428496>
18. Bäuerle D. Material transformations, laser cleaning. In: Laser processing and chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. P. 535–559.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-17613-5_23

Dedicated to the jubilee of Vyacheslav Buznik, Academician of the RAS

SUPERHYDROPHOBISATION OF PAINTED SURFACES TO IMPROVE THEIR PROTECTIVE PROPERTIES AND IMPART NEW FUNCTIONAL PROPERTIES TO MATERIALS

E. A. Kuzina^a, A. M. Emelyanenko^{a,*}, Academician of the RAS L. B. Boinovich^a

^a*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, 119071 Moscow, Russian Federation*

^{*}*E-mail: ame@phyche.ac.ru*

The method of superhydrophobization of the epoxy enamel layer based on the use of pulsed laser treatment and chemisorption of fluorinated silane on the textured enamel surface is proposed. It is shown that flexible control of laser irradiation parameters makes it possible to texture the enamel surface without overheating and subsequent destruction. Experimental studies have shown that the proposed superhydrophobic treatment can significantly improve the protective properties of enamel and impart it new functional properties, such as water-repellent properties with extreme contact and roll-off angles, increased resistance to both abrasive loads and surface stresses arising in the three-phase contact zone during water crystallization and ice melting.

Keywords: enamel, superhydrophobicity, wetting, laser processing, durability, abrasive load, protective properties, corrosion protection, anti-icing properties