КОЛЛОИДНЫЙ ЖУРНАЛ, 2025, том 87, № 3, с. 223–232

УДК 620.197.6:620.179.11

СУПЕРГИДРОФОБНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ ЭМАЛИ ЭП-140: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2025 г. Е. А. Кузина[1], М. А. Теплоногова[2], А. В. Буглак[1], К. А. Емельяненко[1, *]

[1] Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Ленинский просп., 31, корп. 4, 119071 Россия

[2] Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Ленинский просп., 31, 119071 Россия

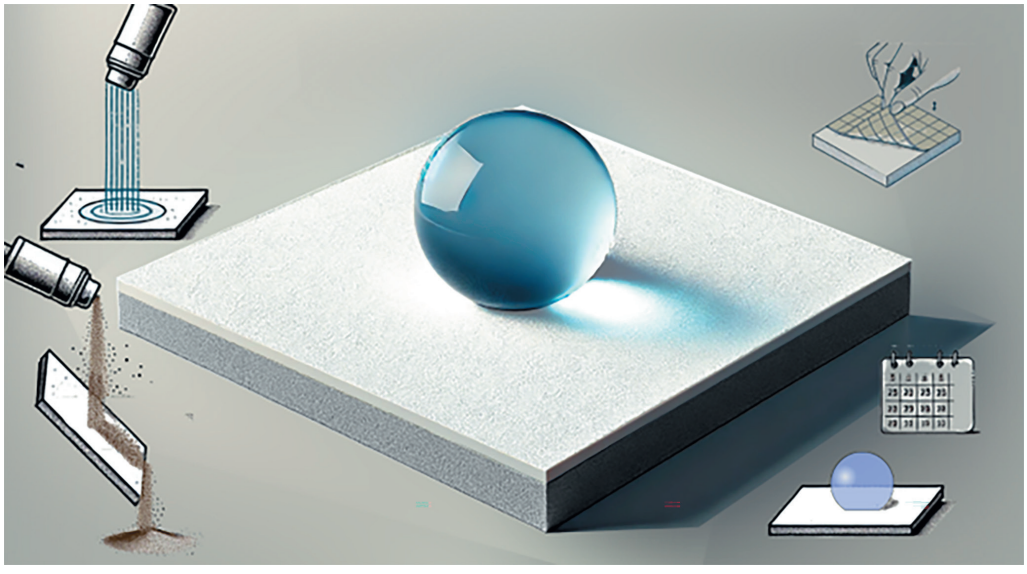
**e-mail: emelyanenko.kirill@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.03.2025 г.
После доработки 26.03.2025 г.
Принята к публикации 27.03.2025 г.

В данной работе исследована механическая стойкость супергидрофобного покрытия, созданного на основе промышленной эпоксидной эмали ЭП-140. Для достижения супергидрофобного состояния нанесенное покрытие модифицировали методом импульсного лазерного текстурирования и хемосорбции фторсилана. Целью исследования была оценка устойчивости покрытия к различным механическим воздействиям, характерным для эксплуатации в открытой атмосфере: длительному контакту с водой, воздействию высокоскоростной струи воды, абразивному износу падающим песком и многократному отрыву липкой ленты. Показано, что комбинированный подход, используемый при супергидрофобизации, обеспечивает не только высокие водоотталкивающие свойства, но и значительную устойчивость к деградации. Так, эксперименты выявили лишь незначительное снижение характеристик смачивания при сохранении гетерогенного режима смачивания, что подтверждает сохранение функциональности покрытия даже при экстремальных механических воздействиях. Полученные данные указывают на перспективность применения разработанного покрытия в промышленности, где требуется сочетание высокой износостойкости и экономической эффективности.

Ключевые слова: супергидрофобность, эпоксидная эмаль, лазерная обработка, долговечность покрытий

DOI: 10.31857/S0023291225030046, **EDN:** TASBBR



ВВЕДЕНИЕ

Улучшение защитных свойств эмалевых покрытий, наносимых на поверхности, работающие в открытых атмосферных условиях, является важной задачей, которая обусловлена несколькими ключевыми факторами. Во-первых, поверхности, эксплуатирующиеся в открытой атмосфере, постоянно подвергаются воздействию различных внешних факторов, таких как ультрафиолетовое излучение, высокая влажность и осадки, перепады температур, химические и механические загрязнения. Во-вторых, усовершенствование свойств покрытий позволяет значительно увеличить экономическую эффективность применения покрытий за счет увеличения срока службы материалов и снижения потребности в их замене. Важными являются и экологические аспекты, включающие уменьшение количества отходов, связанных с заменой старых покрытий, сокращением выбросов вредных веществ при производстве и нанесении новых материалов. Наконец, улучшение свойств покрытий предполагает также и расширение их функциональности, например, обеспечение антимикробных, противообледенительных свойств и свойств самоочистки.

В последние годы внимание исследователей привлекают супергидрофобные покрытия, которые обладают такими уникальными особенностями, как минимизация контакта поверхности с жидкостью за счет водоотталкивающих свойств, само- очистка поверхности при взаимодействии с атмосферными осадками, полифункциональность, когда одно покрытие позволяет одновременно обеспечить целый ряд различных защитных функций [1–4]. Однако из литературы известно, что у многих типов супергидрофобных покрытий оказывается недостаточно высокая износостойкость в эксплуатационных условиях [5, 6], что сильно ограничивает область их применения. Целью данной работы было создание механически прочных модифицированных супергидрофобных эмалевых покрытий и исследование их эксплуатационной стойкости к абразивному износу, воздействию высокоскоростного водяного потока и многократному отрыву липкой ленты.

В данной работе мы покажем, что супергидрофобизация нанесенных на металлы покрытий на основе широко используемой в промышленности эмали ЭП-140, с одной стороны, улучшает функциональные свойства поверхности. С другой стороны, такие покрытия оказываются достаточно стойкими в условиях различных разрушающих механических воздействий. Используемый нами подход к супергидрофобизации эмалевого покрытия, нанесенного на поверхность алюминиевого сплава, комбинирует создание иерархической текстуры импульсной лазерной обработкой с адсорбцией из паров на поверхность веществ с низкой поверхностной энергией. Будет показана высокая стойкость текстурированного покрытия к износу песком, контакту с высокоскоростным потоком воды и многократному отрыву липкой ленты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе исследовались свойства супергидрофобных покрытий, получаемых на поверхности слоя эмали, нанесенного на образцы алюминиевого сплава Д16 (ООО «Продиэл», Москва, Россия) размером 15 × 20 × 2 мм. Использовалась эпоксидная двухкомпонентная эмаль ЭП-140 с отвердителем № 2 (ЯЗЛМ, Ярославль, Россия), которая наносилась на предварительно отвержденный грунт ЭП-0215 с аминопропилтриэтоксисилановым отвердителем АСОТ-2 (ЯЗЛМ, Ярославль, Россия). Нанесение грунтовочного слоя и слоя эмали выполняли пневматическим распылением. Толщины слоев составляли ~100 и ~150 мкм для грунта и эмали, соответственно. Для достижения супергидрофобного состояния подложку с эмалевым слоем после полного высыхания эмали обрабатывали импульсным лазерным излучением, как описано в [7]. Для лазерной обработки использовался лазерный комплекс Аргент-М на основе иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1.064 мкм. В работе [7] были подобраны длительность и частоты импульсов, для которых при пиковой мощности излучения 0.95 мДж в моде TEM00 и фокальном пятне размером 40 мкм удавалось получать стойкую иерархическую текстуру на поверхности эмали без ее термического разрушения. Поскольку исходная эмаль была гидрофильна, проводили нанесение на поверхность текстуры вещества с низкой поверхностной энергией. В качестве такого вещества использовался метокси-{3 [(2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-пентадекафтороктил)-окси]-пропил}-силан, который хемосорбировался из паров на предварительно обработанную в кислородной плазме поверхность элементов текстуры с адсорбционно-активными центрами при температуре $T = 95$°C [7].

Смачивание полученной поверхности характеризовали величинами углов смачивания и скатывания для капель воды. Эти углы, а также поверхностное натяжение капель определяли на разработанных в лаборатории установках, подробно описанных в [8–11], при этом для получения конечных величин данные по углам смачивания и скатывания усреднялись по измерениям на пяти и десяти разных участках, соответственно.

Одним из наиболее широко используемых подходов для анализа химической и механической стойкости текстурированной поверхности является исследование углов смачивания на покрытии,

длительное время находящемся под воздействием струи воды [12–15]. В нашей работе образцы помещали под струю воды диаметром 1 см, скоростью течения воды 1.2 л/мин с высоты 6.5 см. Струя воздействовала на образец в течение 3 ч, при этом каждые 10 мин в начале эксперимента и каждые 30 мин на последних стадиях эксперимента, поток воды прерывали. Образец сушили на воздухе в течение 10 мин и проводились измерения углов смачивания и скатывания.

Стойкость полученных супергидрофобных слоев на эмали к абразивному износу, сопровождающему эксплуатацию окрашенных деталей в открытой атмосфере, испытывали согласно стандарту ASTM D968. Согласно этому стандарту, для определения стойкости к износу исследуемый образец закреплялся на платформе, наклоненной к горизонту под углом 45°. Из цилиндрической колбы на поверхность образца с высоты 20 см сыпался калиброванный песок размером от 500 до 800 мкм. Высыпание 50 г песка определялось, как один цикл абразивной обработки. После каждого цикла образец тщательно промывался водой от песка и затем сушился на нагретой до 50 градусов платформе в течение 10 мин. После этого для оценки степени деградации иерархической текстуры при абразивном износе на образце измерялись углы смачивания и скатывания. Такой метод испытаний на стойкость к износу оказывается более жестким, чем, например, тест, основанный на истирании колеблющимся песком, который был использован нами ранее [7]. Здесь следует подчеркнуть, что в методе падающего песка падающие частицы песка оказывают не только абразивную, но и ударную нагрузку на испытываемую поверхность. Такая нагрузка может быть особенно разрушительной для хрупких элементов текстуры.

Еще один метод, примененный нами для оценки стойкости полученной текстуры и адгезии клеев к созданному покрытию, проводился по методу испытаний ASTM D 3359-09, с применением липкой ленты (Scotch-550, 3M). Липкая лента наклеивалась на супергидрофобное эмалевое покрытие, прокатывалась валиком и далее прижималась к супергидрофобной поверхности размером 15 × 20 мм грузом в 500 г, и после 90 с контакта груз снимался, а липкая лента отрывалась от поверхности. Было выполнено 50 циклов приклеивания и отрыва липкой ленты и после каждых 10 циклов отрыва измерялись углы смачивания и скатывания на поверхности покрытия, по эволюции которых можно сделать вывод о механической стойкости супергидрофобного состояния в условиях отрыва липкой ленты.

Морфологию супергидрофобизованной эмали, как свежеприготовленной, так и после разрушающих механических воздействий исследовали методами растровой электронной микроскопии с использованием микроскопа Tescan Amber GMH (Tescan, Чехия) и конфокальной микроскопии (S neox, Sensofar Metrology, Испания). РЭМ-изображения получали при ускоряющем напряжении 1 кВ с использованием детектора вторичных электронов Эверхарта-Торнли при рабочем расстоянии 3 мм и увеличении ×1000–100000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После обработки лазерным излучением наносекундной длительности и хемосорбции метокси-{3[(2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-пентадекафтороктил)-окси]-пропил}-силана, как описано выше, исходно гладкая поверхность эмалевого покрытия приобретает иерархическую шероховатость и экстремально водоотталкивающие свойства. Особенности получающейся на поверхности текстуры, представленные на рис. 1, подтверждают наличие элементов с характерными размерами порядка микрометров и десятков/сотен нанометров.

Исследование смачивания поверхности супергидрофобизованной эмали различными жидкостями показало, что для жидкостей с поверхностным натяжением, превышающим 36 мН/м, углы смачивания превышают 150°, и капли таких жидкостей скатываются с поверхности покрытия. В качестве примера в табл. 1 представлены результаты измерения углов смачивания супергидрофобизованной эмали деионизованной водой и тремя техническими жидкостями. В таблице также указаны величины поверхностного натяжения, измеренные непосредственно для сидящих капель этих жидкостей. Вид таких капель на покрытии представлен на рис. 2. Поверхностное натяжение капель указанных жидкостей определялось путем цифровой обработки видеоизображения капли, сидящей на поверхности [8–11].

Спонтанное удаление капель всех исследованных здесь жидкостей даже при небольшом наклоне подложки с супергидрофобизованным эмалевым покрытием и отсутствие остатков жидкости на поверхности указывают на то, что все жидкости сразу после нанесения капель на поверхность смачивают покрытие в гетерогенном режиме. В то же время нельзя было заранее исключить тот факт, что большие углы смачивания, определенные в указанном выше эксперименте с жидкостями, имеющими достаточно низкое поверхностное натяжение, относятся к метастабильному состоянию капли. Для проверки этой гипотезы мы следовали методу, предложенному в [16]. Самым низким поверхностным натяжением среди исследованных четырех жидкостей обладает техническая жидкость № 3, которая одновременно является низколетучей. Она была разбавлена ацетоном в соотношении 1:3, и после этого капля смеси нанесена на поверхность супергидрофобизованной краски. Растекание смеси по поверхности эмали привело

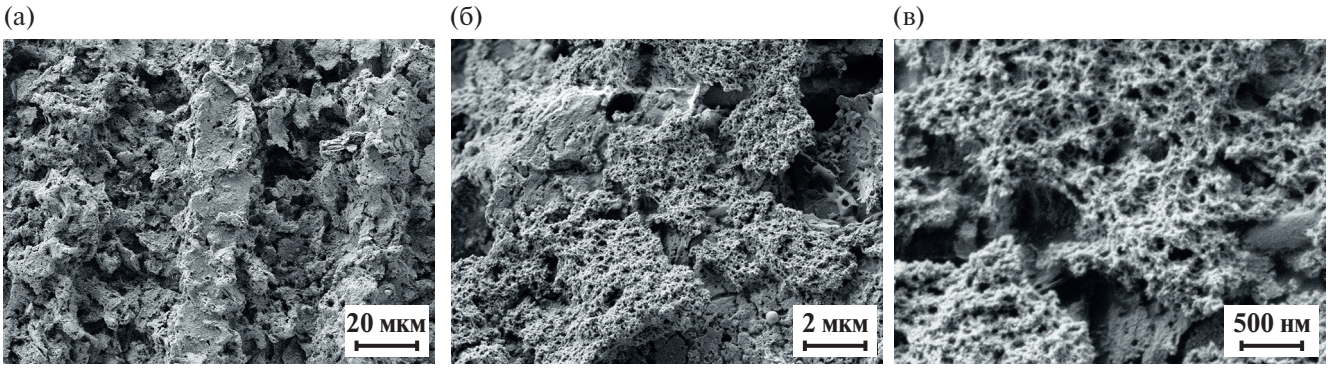


Рис. 1. РЭМ-изображения свежеприготовленной поверхности супергидрофобной эмали при различных увеличениях.

к пропитке текстурированной поверхности супергидрофобизованной эмали и образованию толстой смачивающей пленки раствора жидкости № 3 в ацетоне на поверхности покрытия. Далее образец помещался в камеру, в которой давление газа снижалось до 0.02 бар. По мере испарения ацетона из пленки раствора происходил переход жидкости из состояния толстой смачивающей пленки в каплю с выделением жидкости из пор покрытия. Такое явление указывает на энергетическую невыгодность пропитки текстурированной поверхности жидкостью № 3, не разбавленной ацетоном. В то же время, угол смачивания после двух дней выдержки образовавшейся капли на поверхности в условиях открытой атмосферы оставался ниже 90°. Отклонение формы капли от осесимметричной после сжатия ее периметра не позволило аккуратно измерить угол смачивания. Результаты представленного здесь простого эксперимента позволяют сделать вывод о том, что как начальный угол чистой жидкости № 3, так и угол капли, сформированной при сжатии пленки раствора, очевидно, являются метастабильными углами смачивания, что, по-видимому, связано с большим барьером для растекания жидкостей с достаточно низкими поверхностными натяжениями по супергидрофобизованной поверхности эмали. Наличие такого барьера оказывается очень полезным свойством при защите эмали от загрязнения различными техническими жидкостями при случайном попадании капель этих жидкостей на окрашенную поверхность.

Как отмечалось выше, механическую стойкость супергидрофобизованной эмали исследовали тремя различными методами. Данные по изменению параметров смачивания супергидрофобизованной эмали при длительном контакте со струей воды показаны на рис. 3а. Анализ этих данных показывает, что, хотя в течение 3 ч происходит некоторое снижение углов смачивания и рост углов скатывания, после 2 ч контакта со струей для углов смачивания наблюдается выход на плато, при этом супергидрофобные свойства покрытия сохраняются. Чтобы разделить вклады в деградацию покрытия, связанные с механическим разрушением текстуры покрытия и десорбцией гидрофобного агента при контакте покрытия с водой, на рис. 3б показано изменение углов смачивания и поверхностного натяжения капли воды, длительное время контактирующей с супергидрофобизованной эмалью в условиях 100% влажности паров. Снижение угла смачивания с 173.6 ± 0.6 до 167.3 ± 0.8° за 5 сут, сопровождающееся одновременным понижением поверхностного натяжения капли с 72.4 до 71.75 мН/м, указывает на низкую склонность слоя гидрофобизатора к десорбции фторсилана и, соответственно, на высокую стойкость супергидрофобного состояния при непрерывном контакте с неподвижной водой. Сравнение падения углов смачивания за 3 ч контакта со струей воды и с неподвижной каплей воды (160.2 ± 0.7° и 171.3 ± 0.8°) позволяет сделать вывод, что наблюдающееся снижение угла смачивания при контакте

Таблица 1. Углы смачивания и поверхностное натяжение жидкостей на супергидрофобизованной эмали ЭП-140. Измерения характеристик технических жидкостей и воды выполнены при $T = 23.5 \pm 0.5$, °C

Жидкость	Поверхностное натяжение, мН/м	Угол смачивания, °
Вода	72.1 ± 0.1	172.5 ± 0.4
Техническая жидкость № 1	43.9 ± 0.3	169.7 ± 0.5
Техническая жидкость № 2	40.6 ± 0.2	152.9 ± 0.4
Техническая жидкость № 3	36.1 ± 0.3	151.7 ± 0.8

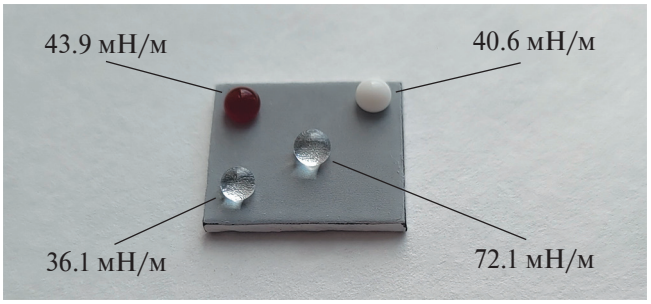


Рис. 2. Фотографии капель жидкостей с различными поверхностными натяжениями на супергидрофобной эмали.

со струей связано с некоторым разрушением текстуры скоростным потоком воды. В то же время следует подчеркнуть, что сравнение скорости деградации супергидрофобизованной эмали с аналогичными исследованиями, выполненными, например, в [12] на супергидрофобном покрытии SiO_2/ПДМС, однозначно указывает на значительно более высокую механическую стойкость супергидрофобного состояния, полученного в данной работе. Учитывая высокую скорость водного потока и длительное время испытания, можно сделать вывод о практической применимости разработанного здесь супергидрофобного покрытия при эксплуатации в открытой атмосфере в условиях выпадения осадков.

Одним из наиболее разрушающих факторов для покрытий, работающих в открытых атмосферных условиях, является абразивный износ частицами пыли. Исследование созданного покрытия на стойкость к абразивному износу и одновременно на хрупкость текстуры выполнялось методом падающего песка. Оценка скорости с учетом трения о воздух, с которой частицы песка диаметром от 500 до 800 мкм ударяются о поверхность супергидрофобизованной эмали, падая с высоты 20 см, дает скорость $v \approx 1.87 \div 1.91$ м/с, что соответствует достаточно высоким значениям кинетической энергии удара для каждой частицы $E \approx 3.0 \cdot 10^{-7} \div 1.4 \cdot 10^{-6}$ Дж. Данный тест, имитирующий условия, близкие к условиям пылевых бурь, является суровым методом проверки механической устойчивости покрытия и, как правило, применяется для исследования металлических покрытий [17] или полимерных покрытий, усиленных наполнителями [18, 19]. Эволюция углов смачивания и скатывания супергидрофобизованной эмали при проведении 4-х циклов абразивной обработки представлена на рис. 4. Представленные данные показывают, что, хотя имеет место деградация покрытия, частично гетерогенный режим смачивания сохраняется даже после высыпания на поверхность 200 г песка. Учитывая, что концентрация пыли в атмосферном воздухе, как правило, не очень высока, результаты данного теста подтверждают применимость покрытия для длительной эксплуатации в открытой атмосфере. Сравнение с результатами близких по параметрам испытаний также указывает на стойкость исследованных в работе покрытий. Так, вольфрамовое покрытие, полученное методом лазерной обработки [17], демонстрирует стойкость, сравнимую с представленными данными на рис. 4, а именно снижение угла смачивания с 170–175 до 150–155° при высыпании на поверхность 200 г песка. При этом для супергидрофобного покрытия из пористого кремнезема [20] характерна заметно меньшая прочность, поскольку падение 20 г песка с энергией на порядок меньшей ($2.4 \cdot 10^{-8}$ Дж), чем использованная в нашей работе, приводит к разрушению покрытия.

Морфология текстурированных поверхностей с иерархической шероховатостью при эксплуатации

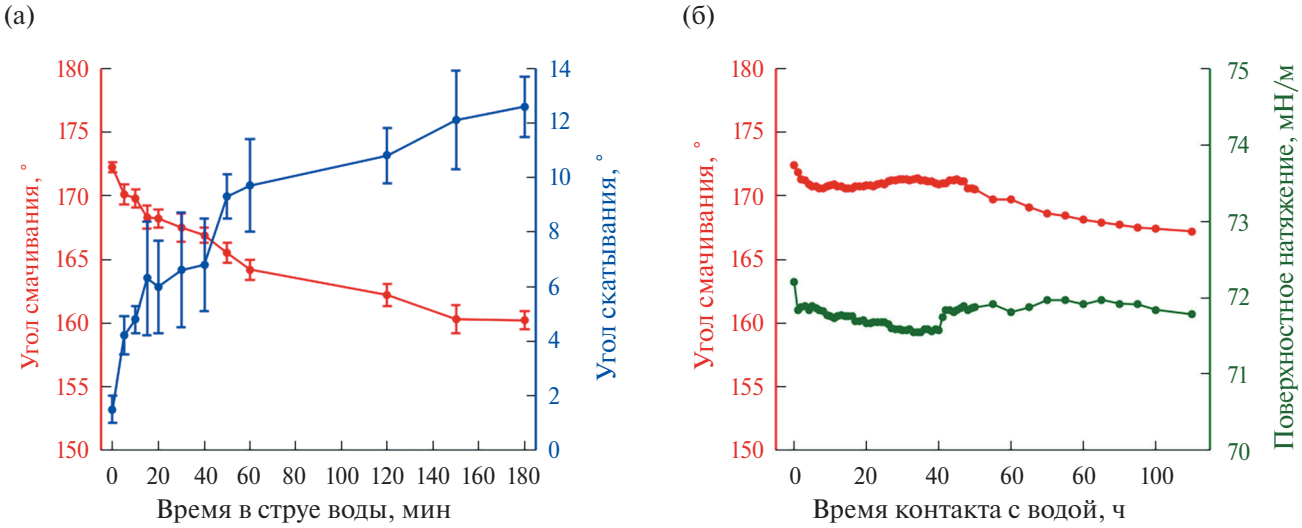


Рис. 3. (а) Эволюция углов смачивания и скатывания при экспозиции в струе воды; (б) изменение угла смачивания и поверхностного натяжения при контакте с каплей воды.

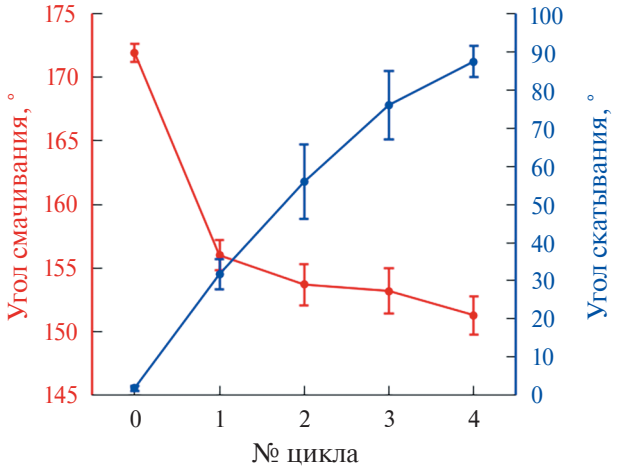


Рис. 4. Эволюция углов смачивания и скатывания под действием циклов абразивного износа падающего песка.

в открытой атмосфере часто изменяется при формировании адгезионного контакта с различными средами и последующем его разрыве. Например, при осаждении на поверхность полимеризующихся веществ или льда разрыв по межфазной поверхности супергидрофобное покрытие/осажденная фаза сопровождается удалением нано- и микротекстуры. Для оценки стойкости покрытия к таким воздействиям в литературе широко используется тест с липкой лентой [21–23]. Данные, полученные нами для супергидрофобизованной эмали ЭП-140, при многократных циклах формирования контакта и отрыва липкой ленты от покрытия показаны на рис. 5.

Представляло интерес детально проанализировать причину некоторой деградации супергидрофобного состояния при отрыве липкой ленты от покрытия. Для этого были исследованы конфокальные изображения поверхности (рис. 6)

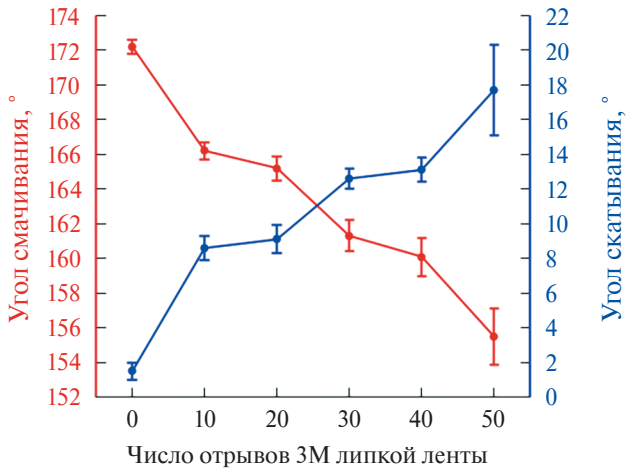


Рис. 5. Эволюция углов смачивания и скатывания под действием циклов отрыва липкой ленты.

и определены параметры шероховатости покрытия (табл. 2) до и после теста на отрыв ленты.

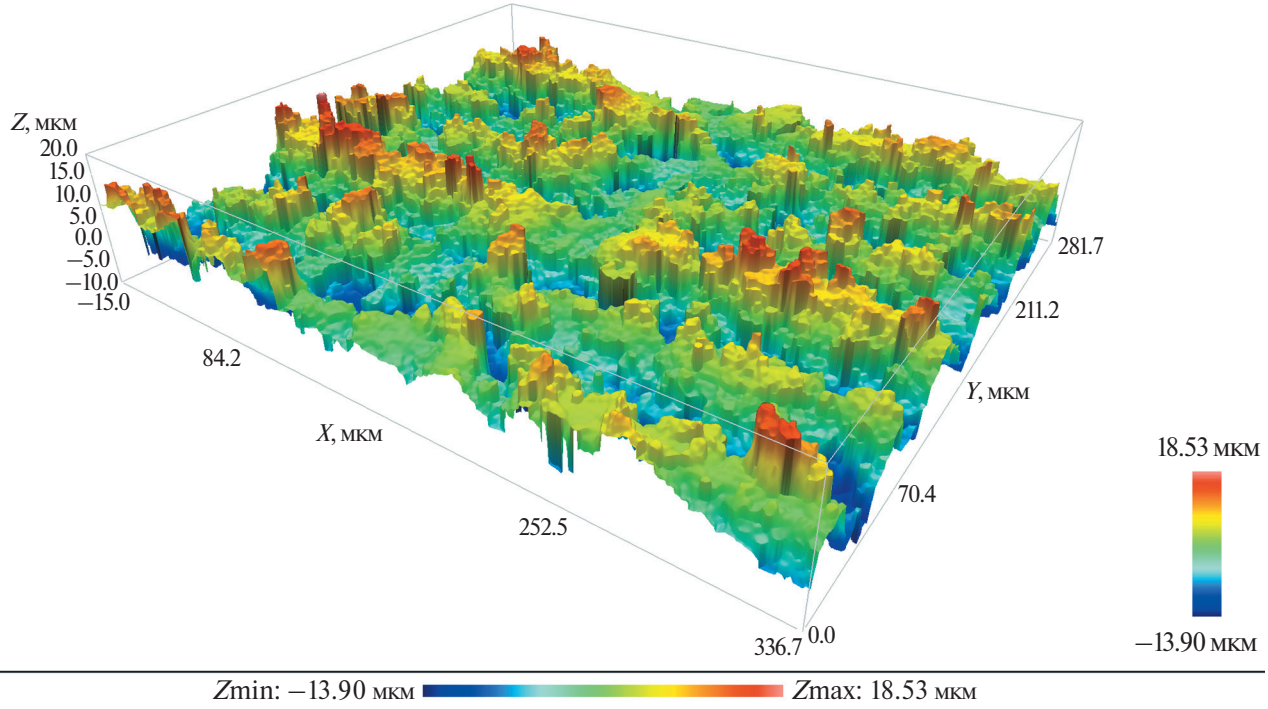
Сравнение изображений на рис. 6а и 6б однозначно указывает на то, что при прижиме липкой ленты к текстуре эмали адгезия по выступающим элементам эмали на межфазной поверхности супергидрофобная текстура/липкая лента оказывается выше когезии самой текстуры. В таких условиях отрыв ленты сопровождается частичным разрушением выступающих элементов текстуры и, как показывают данные, представленные в табл. 2, к снижению всех параметров, характеризующих шероховатость поверхности.

Из анализа топографий поверхности до и после экспериментов с липкой лентой (рис. 6) можно сделать вывод, что при отрыве липкой ленты происходило отламывание наиболее выступающих над поверхностью элементов текстуры при сохранении глубины впадин. Такой характер изменения поверхности согласуется с изменениями параметров шероховатости (табл. 2), а именно заметно менее выраженным уменьшением величин максимального перепада и отношения между фактической и проецируемой площадью, по сравнению с изменением среднеарифметической и среднеквадратичной шероховатостей. Кроме того, это согласуется с эволюцией углов смачивания и скатывания (рис. 5). При отламывании вершин выступов появляются гидрофильные участки в месте разрушения текстуры, которые работают как центры зацепления капли воды при ее скатывании с наклонной поверхности покрытия, что, в свою очередь, отражается на возрастании углов скатывания. Наличие гетерогенного контакта капли с гидрофобными участками поверхности и небольшим количеством гидрофильных пятен проявляется в снижении угла смачивания, по отношению к углам, характерным для свежеприготовленной поверхности. Однако в целом обнаруженные здесь изменения смачивания и шероховатости поверхности, происходящие при периодическом многократном отрыве липкой ленты, говорят скорее о достаточно высокой стойкости к разрушающим процессам, моделируемым отрывом липкой ленты.

ВЫВОДЫ

В этой работе проанализировано смачивание различными жидкостями коммерчески производимой эпоксидной эмали ЭП-140 после ее супергидрофобизации с применением лазерного текстурирования и хемосорбции фторсилана. Ранее нами было показано, что супергидрофобизация эмали позволяет значительно усилить защитные свойства исходного эмалевого покрытия [7]. В этой работе мы основное внимание уделили изучению стойкости полученного супергидрофобного покрытия к механическим разрушающим воздействиям.

(а)



(б)

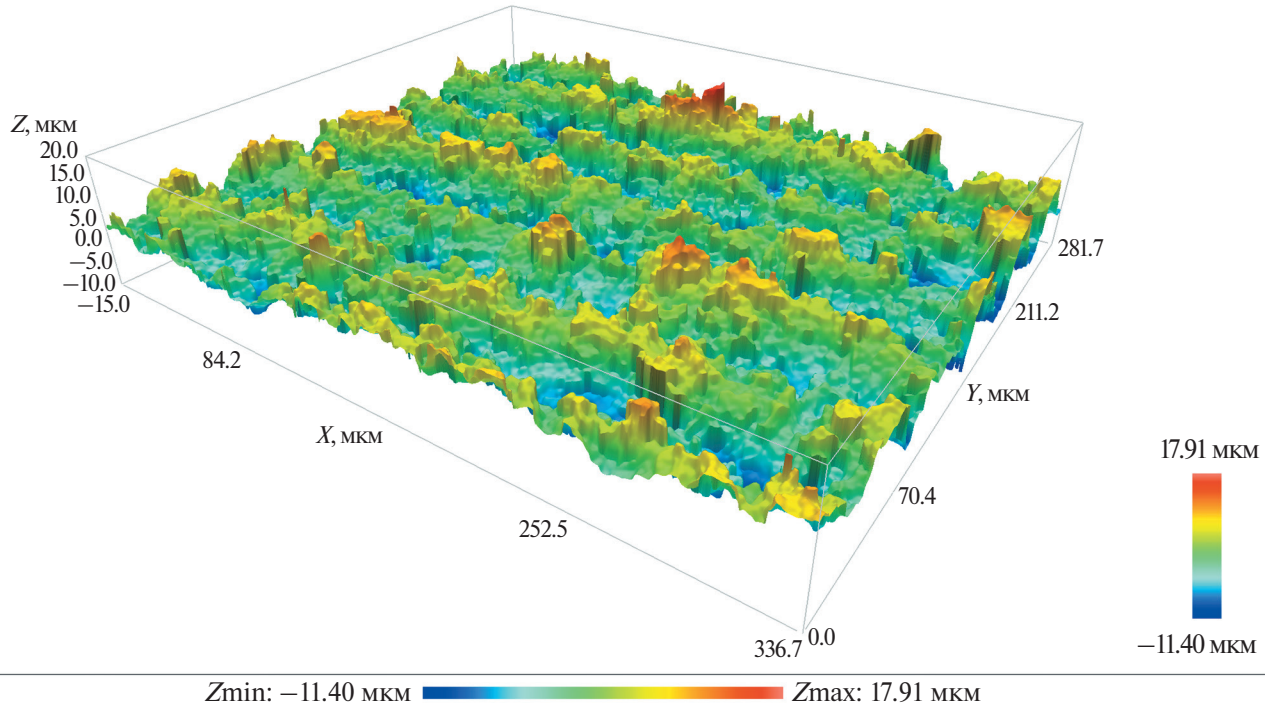


Рис. 6. 3D-топографические изображения поверхности супергидрофобной эмали до (а) и после (б) теста на отрыв липкой ленты, полученные на конфокальном микроскопе.

Таблица 2. Параметры шероховатости супергидрофобной эмали до и после многократного отрыва липкой ленты

Параметр*	Свежеприготовленное покрытие	После 50 отрывов липкой ленты
S_a, мкм	5.1 ± 0.2	3.6 ± 0.1
S_q, мкм	6.2 ± 0.3	4.5 ± 0.1
S_z, мкм	32.9 ± 0.4	29.4 ± 0.1
S_{ratio}	2.0 ± 0.06	1.7 ± 0.1

*S_a – представляет собой среднее арифметическое абсолютных значений высот всех точек поверхности относительно средней плоскости, дает общее представление о средней шероховатости поверхности, S_q – среднеквадратичное значение высот всех точек поверхности относительно средней плоскости, S_z – разница между максимальной высотой пика и минимальной глубиной впадины на поверхности, характеризует общий диапазон высот на поверхности, S_{ratio} – отношение между фактической и проецируемой площадью, .

Была исследована эволюция смачивания супергидрофобизованной эмали при ее длительном контакте с каплей воды, с высокоскоростной струей воды, при взаимодействии с падающим песком и при многократном отрыве липкой ленты от поверхности покрытия. Несмотря на обнаруженную незначительную деградацию супергидрофобных свойств в проведенных экспериментах, результаты наших исследований указывают на высокую механическую стойкость супергидрофобизованного эмалевого покрытия. В свою очередь, это означает возможность длительной непрерывной эксплуатации в открытой атмосфере, в том числе в условиях выпадения осадков, без потери функциональных свойств.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-73-30004, https://rscf.ru/project/23-73-30004/.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Бойнович Л.Б. за детальное обсуждение этой работы. Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M.* Hydrophobic materials and coatings: principles of design, properties and applications // Russ. Chem. Rev. 2008. V. 77. № 7. P. 583–600.
https://doi.org/10.1070/RC2008v077n07ABEH003775
2. *Tian X., Verho T., Ras R.H.A.* Moving superhydrophobic surfaces toward real-world applications // Science. 2016. V. 352. № 6282. P. 142–143.
https://doi.org/10.1126/science.aaf2073
3. *Darmanin T., Guittard F.* Recent advances in the potential applications of bioinspired superhydrophobic materials // J. Mater. Chem. A. 2014. V. 2. № 39. P. 16319–16359.
https://doi.org/10.1039/C4TA02071E
4. *Jeevahan J., Chandrasekaran M., Britto Joseph G., Durairaj R.B., Mageshwaran G.* Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges // J. Coat. Technol. Res. 2018. V. 15. № 2. P. 231–250.
https://doi.org/10.1007/s11998-017-0011-x
5. *Milionis A., Loth E., Bayer I.S.* Recent advances in the mechanical durability of superhydrophobic materials // Adv. Colloid Interface Sci. 2016. V. 229. P. 57–79.
https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.007
6. *Verho T., Bower C., Andrew P., Franssila S., Ikkala O., Ras R.H.A.* Mechanically durable superhydrophobic surfaces // Adv. Mater. 2011. V. 23. № 5. P. 673–678.
https://doi.org/10.1002/adma.201003129
7. *Кузина Е.А., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б.* Супергидрофобизация окрашенных поверхностей для повышения их защитных свойств и придания новых функциональных свойств материалам // Доклады Академии Наук Серия химическая. 2025. № 1.
8. *Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* Application of dynamic thresholding of video images for measuring the interfacial tension of liquids and contact angles //

Instruments and Experimental Techniques. 2002. V. 45. № 1. P. 44–49.
https://doi.org/10.1023/A:1014544124713

9. *Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* Analysis of wetting as an efficient method for studying the characteristics of coatings and surfaces and the processes that occur on them: A review // Inorg. Mater. 2011. V. 47. № 15. P. 1667–1675.
https://doi.org/10.1134/S0020168511150064
10. *Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б.* Применение цифровой обработки видеоизображений для определения параметров сидящих и висящих капель // Коллоидный журнал. 2001. Т. 63. № 2. С. 178–193.
11. *Кузина Е.А., Омран Ф.Ш., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б.* О важности подбора режима гидрофобизации для получения стойких супергидрофобных покрытий // Коллоидный журнал. 2023. Т. 85. № 1. С. 63–67.
https://doi.org/10.31857/S0023291222600614
12. *He S., Chen J., Lu Y., Huang S., Feng K.* Enhanced waterproof performance of superhydrophobic SiO_2/PDMS coating // Prog. Org. Coat. 2024. V. 197. P. 108845.
https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108845
13. *Kumar A., Meena M.K.* Fabrication of durable corrosion-resistant polyurethane/SiO_2 nanoparticle composite coating on aluminium // Colloid Polym. Sci. 2021. V. 299. № 6. P. 915–924.
https://doi.org/10.1007/s00396-021-04814-9
14. *Mousavi S.M.A., Pitchumani R.* A comparative study of mechanical and chemical durability of non-wetting superhydrophobic and lubricant-infused surfaces // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 2022. V. 643. P. 128711.
https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128711
15. *Li T., Lu C., Yuan Z., Liu C., Li Y., Liu Y.* Mechanical stability and anti-icing performance of robust aluminum-based superhydrophobic coating // Surface Technology. 2022. V. 51. № 11. P. 385–394.
https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.11.036
16. *Golubitchenko T.V., Emelyanenko K.A., Krasovsky V.G., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* Are the imidazole ionic liquids suitable lubricants for slippery coatings? // Langmuir. 2025. V. 41. № 4. P. 2724–2734.
https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04543
17. *Kuzina E.A., Emelyanenko K.A., Teplonogova M.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* Durable superhydrophobic coatings on tungsten surface by nanosecond laser ablation and fluorooxysilane modification // Materials. 2025. V. 16. № 1. P. 196.
https://doi.org/10.3390/ma16010196
18. *Liu J.J., He C.Y., Liu B.H., Wang Z.Q., Zhao S.J., Lu Z.W., Zhang Y.Z., Tang Z.Q., Gao X.H., Aday X.* A robust photo-thermal and electro-thermal superhydrphobic surface for all-weather anti-icing/deicing // Chem. Eng. J. 2024. V. 489. P. 151338.
https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151338
19. *Zhou X., Ou J., Hu Y., Wang F., Fang X., Li W., Chini S.F., Amirfazli A.* Robust superhydrophobic coating for photothermal anti-icing and de-icing via electrostatic powder spraying // Prog. Org. Coat. 2024. V. 197. P.108778.
https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108778
20. *Deng X., Mammen L., Zhao Y., Lellig P., Müllen K., Li C., Butt H.J., Vollmer D.* Transparent, thermally stable and mechanically robust superhydrophobic surfaces made from porous silica capsules // Adv. Mater. (Weinheim). V. 23. № 26. P. 2962–2965.
https://doi.org/10.1002/adma.201100410
21. *Birlik Demirel G., Aygül E.* Robust and flexible superhydrophobic/superoleophilic melamine sponges for oil-water separation // C Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 2019. V. 577. P. 613–621.
https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.081
22. *Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Ivanov V.K., Pashinin A.S.* Durable icephobic coating for stainless steel // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. № 7. P. 2549–2554.
https://doi.org/10.1021/am3031272
23. *Allahdini A., Jafari R., Momen G.* Transparent non-fluorinated superhydrophobic coating with enhanced anti-icing performance // Prog. Org. Coat. 2022. V. 165. P. 106758.
https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106758

SUPERHYDROPHOBIC COATING BASED ON EP-140 EPOXY ENAMEL: A STUDY OF MECHANICAL ENDURANCE UNDER EXTERNAL ACTIONS

E. A. Kuzina[a], M. A. Teplonogova[b], A. V. Buglak[a], K. A. Emelyanenko[a],

[a] *Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

[b] *Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

In this study, the mechanical durability of a superhydrophobic coating fabricated on the basis of industrial epoxy enamel EP-140 was investigated. To achieve a superhydrophobic state, the applied coating was modified by pulsed laser texturing and fluorosilane chemisorption. The aim of the research was to evaluate the coating's resistance to various mechanical loads typical for outdoor use: prolonged water contact, exposure to high-speed water jets, abrasive wear from falling sand, and multiple removals of adhesive tape. It was shown that the combined approach used in superhydrophobic treatment not only provides high water repellency but also significant resistance to degradation. Experiments revealed only a slight decrease in wetting characteristics, while the heterogeneous wetting regime was maintained, confirming that the coating retains its functionality even under extreme mechanical impacts. The obtained data indicate the promising application of the developed coating in industries that require a combination of high wear resistance and cost-effectiveness.

Keywords: superhydrophobicity, epoxy enamel, laser treatment, durability of coatings