

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ
И ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 620.197.3

СУПЕРГИДРОФОБИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА Д16
ОРГАНИЧЕСКИМИ КИСЛОТАМИ И ЕГО ЗАЩИТА
ОТ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ

© 2023 г. А. М. Семилетов^{a,*}, А. А. Куделина^{a,b}, Ю.И. Кузнецов^a

^aИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, 119071, Москва, Россия

^bРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, Москва, Россия

*e-mail: semal1990@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

Рассматривается возможность получения супергидрофобных (СГФ) защитных пленок на поверхности алюминиевого сплава Д16. Показано, что лазерная обработка сплава и его последующая модификация в растворах карбоновых и фосфоновых кислот приводит к супергидрофобизации поверхности. Защитную способность СГФ-покрытий оценивали поляризационными измерениями и коррозионными испытаниями в камере соляного тумана и в условиях городской атмосферы. Электрохимические испытания образцов сплава Д16 в растворе хлорида натрия показали, что СГФ-пленки эффективно предотвращают его локальную депассивацию. Установлено, что СГФ-пленки, сформированные из растворов октадецилфосфоновой и стеариновой кислот, эффективно предотвращают коррозию сплава в атмосферных условиях.

Ключевые слова: алюминий и его сплавы, атмосферная коррозия, супергидрофобизация, карбоновые и фосфоновые кислоты

DOI: 10.31857/S0044453723020243, EDN: ELQAWA

Алюминий и его сплавы активно применяются в качестве конструкционных материалов в судостроении, авиа- и аэрокосмической отрасли благодаря хорошим механическим свойствам, электро- и теплопроводности, а также невысокому удельному весу.

На воздухе алюминий и его сплавы покрыты тонким слоем естественного оксида, который препятствует возникновению коррозии на поверхности. Однако во влажной атмосфере при наличии солевых загрязнений, например агрессивных анионов Cl^- , естественно сформированный оксидный слой разрушается, что существенно сокращает срок службы металлоизделий и конструкций, а также вызывает отказы оборудования. Таким образом, в настоящее время существует большая потребность в создании эффективных ингибиторов коррозии и защитных покрытий на алюминии и его сплавах для расширения областей их применения и увеличения срока службы металлических изделий [1, 2].

В последние годы предложен ряд методов и технологий получения супергидрофобных (СГФ) антикоррозионных покрытий на алюминии и его сплавах [3–5]. СГФ-покрытия могут быть получены, учитывая одновременное действие двух факто-

ров: создания определенного типа иерархической микронаноструктуры на поверхности металла и последующая ее модификация соединениями с низкой поверхностной энергией [6]. Механизм защитного действия получаемых СГФ-покрытий, основан на подавлении активационных процессов коррозии за счет наличия слоя воздуха, захваченного внутрь канавок текстурированной поверхности, который отделяет поверхность сплава от воздействия агрессивных ионов, растворенных в воде.

Известны различные методы изменения морфологии поверхности: золь-гель-технологии [7, 8], темплатный синтез [9], гидротермальная обработка [10], лазерное текстурирование [11, 12], травление [13, 14] и анодирование [15]. В работах [16, 17] изучено влияние различных методов (механические, термические и химические) изменения текстуры поверхности на размер и состав получаемых микро-наноструктур с последующей СГФ. Несколько из этих методов относительно просты и экономичны, но для некоторых из них характерны ограничения, связанные с низкой масштабируемостью получаемых микроструктур, длительной и сложной технологией подготовки и высокой стоимостью реактивов.

На практике эффективным методом изменения шероховатости металлической поверхности является лазерная абляция. Размер получаемых таким способом микроструктур может варьироваться регулировкой параметров лазерной обработки: мощность лазера, частота излучения, длительность импульса и скорость обработки. В [11] показано, что после лазерной обработки на поверхности алюминиевого сплава АМг3 формируются упорядоченные структуры оксида алюминия; дальнейшая модификация в растворе фторалкоксисилана приводит к формированию СГФ-покрытия с высоким значением краевого угла (Θ_c) 173.4° и малым углом скатывания 2.1° . Авторы [18] получили СГФ-покрытие триэтоксид-1Н,1Н,2Н,2Н-перфтороктилсилана на сплаве Al–Mg–Si варьируя параметры наносекундной лазерной обработки при изменении микроструктурной шероховатости поверхности.

Несмотря на то, что фторсодержащие соединения оказываются весьма эффективными для снижения поверхностной энергии в достижении СГФ-состояния, они могут наносить вред окружающей среде и здоровью человека из-за токсичности [19]. Альтернативой использованию фторсодержащих соединений при получении СГФ-покрытий являются нетоксичные высшие карбоновые [20–22] и фосфоновые кислоты [23–25]. Эффективность фосфоновых кислот может быть обусловлена взаимодействием с окисленной поверхностью металлов путем образования устойчивой Me–O–P-связи. По мнению Ю. Телегди с соавт. [26], другим фактором, влияющим на высокую противокоррозионную стойкость слоев фосфоновых кислот – их способность образовывать плотноупакованные молекулярные структуры. В то же время, доступность и невысокая стоимость карбоновых кислот делает их конкурентоспособными в возможности создания защитных СГФ-покрытий.

Антикоррозионные свойства покрытий на основе органических кислот зависят не только от реакционной способности функциональной (фосфоновой, карбоксильной) группы взаимодействовать с поверхностью металла, но также и от размера в молекуле гидрофобной части. Короткая углеродная цепь обеспечивает менее эффективное ингибирование, чем более длинная. Согласно [27], если функциональная группа находится не только в α , но и в ω -положении, защитная способность соединения может увеличиться. Однако в [28] обратили внимание на другую особенность адсорбции α , ω -дикарбоксилатов, которая, по-видимому, реализовалась на поверхности пассивного железа. Поскольку адсорбция может происходить через две разделенные между собой карбоксильные группы, то адсорбированный анион дикарбоксилата принимает “форму петли”. Это препятствует плотной упаковке защит-

ной пленки и, чтобы улучшить ее рекомендовали использовать, например себацинат натрия совместно с монокарбоксилатом, т.е. капринатом.

Полярные головные группы взаимодействуют с металлической подложкой путем хемосорбции или физической адсорбции. Другим фактором, определяющим формирование самоорганизующихся молекулярных слоев, является наличие водородных связей и Ван-дер-ваальсовых взаимодействий в монослое между гидрофобными частями молекул, главным образом, между длинными углеродными цепями [29]. Для формирования плотно упакованного монослоя необходимо минимум 11–12 атомов углерода в основной цепи молекулы, а любое нарушение в алкильной цепи, особенно вблизи головной группы, препятствует образованию упорядоченной наноструктуры [26].

Следует отметить, что рассмотренные выше работы по возможности придания поверхности алюминиевых сплавов СГФ-свойств показали, что разработка стабильных СГФ-покрытий может стать многообещающей технологией защиты от коррозии, и быть одной из альтернатив пассивации растворами высокотоксичных соединений шестивалентного хрома.

В настоящей статье приведены результаты исследования по формированию на алюминиевом сплаве Д16 СГФ-слоев, сформированных из этанольных растворов карбоновых и фосфоновых кислот, для его защиты от коррозии в условиях камеры солевого тумана (КСТ) и промышленной городской атмосферы, а также приведено сравнение эффективности получаемых покрытий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили на алюминиевом сплаве Д16, состава (мас. %): Cu – 3.8–4.9, Fe – до 0.5, Si – до 0.5, Mn – 0.3–0.9, Cr – до 0.1, Ti – до 0.15, Mg – 1.2–1.8, Zn – до 2.5, Al – основа. Образцы сплава Д16, представляющие собой прямоугольные пластины размерами $30 \times 40 \times 2$ мм, зачищали наждачной бумагой различной зернистости (до 1500), далее их обезжиривали ацетоном, промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе.

Для получения равномерно-неоднородной шероховатой поверхности образцы сплава Д16 подвергали обработке оптоволоконным лазерным маркировщиком с воздушным охлаждением ХМ-30 (Россия). При следующих параметрах лазерной обработки (ЛО): λ – длина волны 1.064 мкм, ν – частота излучения (20 кГц), d – диаметр луча лазера (0.01 мм), l – расстояние между линейными траекториями (0.01 мм), v – скорость перемещения лазерного луча (1000 мм/с) и W – мощность лазера (12 Вт). Далее, для удаления металлической пыли, образующейся в процессе ЛО,

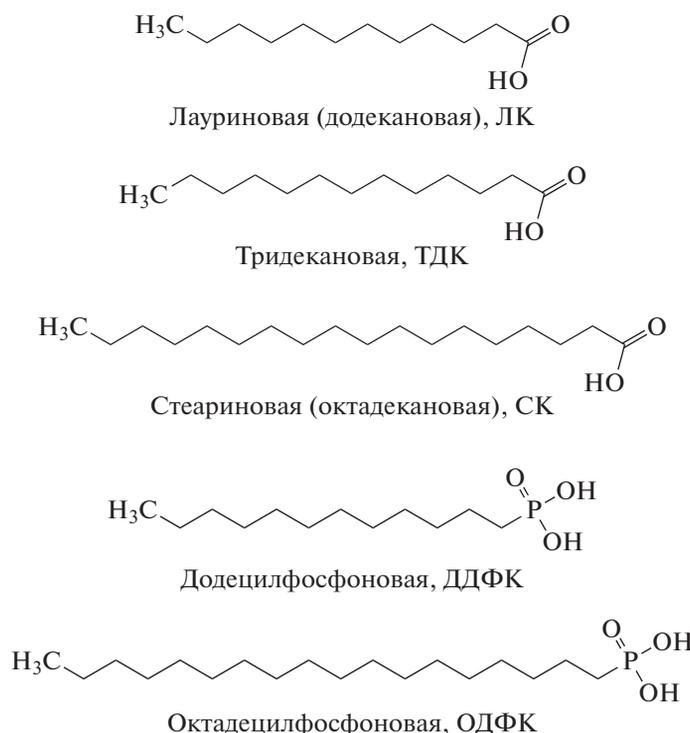


Рис. 1. Структурные формулы и названия исследованных органических кислот.

образцы промывали этанолом и сушили на воздухе при $t = 65^\circ\text{C}$.

Микрофотографии поверхности сплава Д16 после механической полировки и ЛО были получены с помощью оптического микроскопа Био-мед-3 (Россия) снабженного фотокамерой при $\times 100$ увеличении.

Для оценки параметров неровности поверхности использовали профилометр модели 130 (АО «Завод ПРОТОН», Россия) и рассчитывали показатель – шероховатость поверхности по системе средних линий. Для каждого образца проводили не менее пяти измерений профиля поверхности (длина трассы измерения 12.5 мм). Класс шероховатости определяли согласно ГОСТ 2789-73 и рассчитывали средние значения параметров: высота неровности профиля R_z , мкм, максимальная высота неровности профиля R_{max} , мкм.

В качестве гидрофобных (ГФ) агентов использовали этанольные растворы карбоновых: лауриновой (ЛК; 98%), тридекановой (ТДК; 97.7%) и стеариновой (СК; Sigma Aldrich, 98.5%) кислот $C = 10$ ммоль/л, и фосфоновых с $C = 1$ ммоль/л: додецилфосфоновая (ДДФК; AlfaAesar, 95%) и октадецилфосфоновая (ОДФК; Sigma Aldrich, 97%), кислот (рис. 1). ГФ-обработку алюминиевых образцов проводили при комнатной температуре $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, далее образцы 1 ч сушили воздухом при 65°C и промывали дистиллированной во-

дой для удаления физически адсорбированных слоев.

Для измерения значений краевого угла (Θ_c) статическим методом образцы помещали в лабораторную установку с встроенной фотокамерой Levenhuk M 1000 Plus (Китай) и наносили на исследуемую поверхность каплю дистиллированной воды (объемом 3–5 мкл). Определение Θ_c проводили из фотоизображений капли с помощью графического редактора «Corel R.A.V.E. 2.0». Для получения достоверной характеристики смачивания, начальные Θ_c измеряли через 5–10 с после посадки капли на пяти различных участках поверхности каждого образца. Среднее значение угла определялось для 10 последовательных изображений капли.

Исследования толщин сформированных СГФ-пленок проводили на ручном эллипсометре фирмы Гартнер с модуляцией светового пучка и усовершенствованной регистрацией светового излучения. Источником излучения служил твердотельный лазер с диодной накачкой, модель LSM-S-111-10-NNP25 с длиной волны $\lambda = 540$ нм. Угол падения 68.5° . Точность в определении углов поляризатора и анализатора составляла $\pm 0.05^\circ$. Экспериментально определялись углы – сдвиг фаз Δ и угол восстановленной поляризации Ψ . Определение углов Δ и Ψ проводили по нулевой схеме: поочередно вращая поляризатор и анализатор, добивались минимума интенсивности

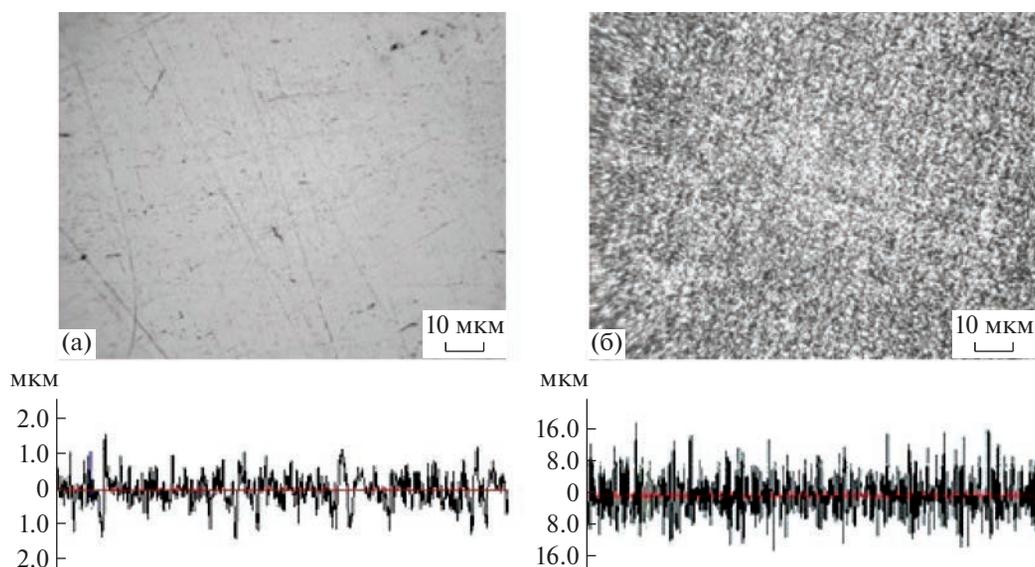


Рис. 2. Микрофотографии и профилограммы поверхности сплава Д16 после механической полировки (а) и ЛО (б).

на регистрирующем приборе. Величины Δ и Ψ вычисляли из угловых значений поляризатора и анализатора при минимуме интенсивности (в положении гашения).

Для описания экспериментальных данных пользовались изменениями углов: $\delta\Delta = \Delta - \Delta_0$ и $\delta\Psi = \Psi - \Psi_0$, где Δ_0 и Ψ_0 относятся к исходной поверхности Al-пластины, Δ и Ψ – величины углов после обработки гидрофобизирующими реагентами. Эти углы зависят от показателей преломления пластины (N_{Al}) и пленки ($N_{пл}$) на ее поверхности, а также толщины пленки, и связаны основным уравнением эллипсометрии. Решая основное уравнение эллипсометрии по стандартной программе Мак Кракина [30], определяли толщину покрытия d .

Поляризационные измерения образцов проводили в прижимной ячейке с помощью потенциостата ИРС-Про (Россия). Фоновым раствором при электрохимических испытаниях служил 0.05 М NaCl с pH 6.5. Потенциалы электрода (E) измеряли относительно насыщенного хлорид серебряного электрода и пересчитывали на нормальную водородную шкалу. Вспомогательный электрод – платина. Во избежание нарушения сформированной на поверхности СГФ-пленки, выдержку электрода в фоновом растворе до установления $E_{кор}$ не проводили, а сразу осуществляли анодную развертку потенциала. Защитные свойства СГФ-слоев оценивали по увеличению потенциала локальной депассивации $E_{пт}$ в сравнении с аналогичной величиной, измеренной в отсутствие СГФ-обработки электрода, $\Delta E_{пт} = E_{пт}^{СГФ} - E_{пт}^{фон}$.

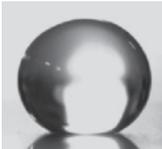
Защитная способность сформированных СГФ-покрытий определялась ускоренными испытаниями образцов в КСТ Weiss SC/KWT 450 (Германия). В качестве солевого раствора в КСТ использовали 5% NaCl (pH 6.9). Камера работала непрерывно в циклическом режиме (один цикл – 15 мин распыления солевого раствора, затем 45 мин камера отключена, далее повторение цикла). Испытания проводили при $t = 35^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 100%, осмотр образцов 3 раза в сутки для установления времени до появления первых признаков коррозии $\tau_{кор}$.

Натурные испытания образцов сплава Д16 с СГФ-покрытиями в атмосферных условиях проводили на московской коррозионной станции ИФХЭ РАН согласно ГОСТ 9.909-86. Образцы подвешивали на стенде в жалюзийном хранилище, осмотр проводили сначала один раз в месяц, а затем один раз в три месяца, при этом контролировали изменения в состоянии образцов (продолжительность испытаний – 1 год).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 представлены микрофотографии поверхности сплава Д16, подвергнутого механической полировке и ЛО. На фотографии шлифованной поверхности сплава видны небольшие дефекты и следы от механической зачистки (а), высота неровности профиля полированной поверхности $R_z = 0.78$ мкм, при максимальной высоте 1.05 мкм. После ЛО на поверхности сплава формируется шероховатая равномерно-неоднородная структура (б), согласно результатам профилометрических измерений высота неровностей по-

Таблица 1. Значения краевых углов (Θ_c) и изображения капель воды на гладкой и ЛО-поверхности образцов сплава Д16, модифицированных в этанольных растворах органических кислот

Θ_c , град	
Гладкая поверхность	Текстурированная поверхность
Без обработки	
 36	0
ЛК	
 107	 155
ТДК	
 107	 157
СК	
 109	 159
ДДФК	
 106	 158
ОДФК	
 114	 159

сле лазерного текстурирования R_z не превышает 8–12 мкм, а $R_{\max} = 16.4$ мкм.

Поверхность сплава Д16 после механической полировки оказывается гидрофильной и характеризуется малым значением краевого угла $\Theta_c = 36^\circ$ (табл. 1). Адсорбционная способность органических соединений, зависит от гидрофобности молекулы, количественно характеризуемая логарифмом коэффициента распределения вещества в системе несмешивающихся жидкостей октанол-вода – $\lg P$. Величина $\lg P$ может быть получена как экспериментально, так и расчетным методом, с использованием f -констант гидрофобности заместителей [31]. Величины $\lg P$, рассчитанные при помощи программы ACD/LABS 12.0, для исследованных органических кислот приведены в табл. 2, таким образом, наиболее гидрофобной является СК $\lg P = 8.22$.

Нетрудно заметить, что гидрофобность молекул карбоновых кислот увеличивается в ряду ЛК < ТДК < СК, что обусловлено ростом длины алкила при переходе от ЛК к СК, аналогично это справедливо и для фосфоновых кислот, гидрофобные свойства ОДФК $\lg P = 7.01$ оказываются выше ДДФК $\lg P = 3.83$.

Модификация гладкой поверхности сплава Д16 этанольными растворами карбоновых кислот приводит к гидрофобизации поверхности (табл. 1), однако, величины Θ_c невысоки и не превышают 110° , даже для наиболее гидрофобной – СК, $\Theta_c = 109^\circ$. Гидрофобная обработка в растворе ОДФК оказывается эффективнее, $\Theta_c = 114^\circ$.

Эллипсометрическим методом определены толщины покрытий, сформированные на гладкой поверхности сплава из растворов СК и ОДФК (табл. 3). Величина слоя СК составляет $\approx 10.0 \pm 2.0$ нм, однако после ультразвуковой (УЗ) отмывки, толщина пленки снижается до $\approx 3.0 \pm 0.5$ нм, что обусловлено частичным удалением физически адсорбированных молекул. Существенно, что воздействие УЗ на образцы с покрытием ОДФК практически не влияет на толщину слоев, что является косвенным доказательством о значительной необратимости ее адсорбции на поверхности сплава.

После ЛО поверхность алюминиевого сплава становится супергидрофильной (табл. 1). Обработка текстурированной поверхности сплава Д16 в растворах органических кислот приводит к его СГФ. Среди исследованных карбоновых кислот наибольшее значение $\Theta_c = 159^\circ$ наблюдается для СК, ЛК и ТДК немного уступают ей, а $\Theta_c = 155^\circ$ и 157° , соответственно. Полученные значения краевых углов согласуются с рассчитанным рядом величин $\lg P$, свидетельствующим о большей гидрофобности СК. Модификация образцов в растворах фосфоновых кислот даже при их меньшей

Таблица 2. Значения $\lg P$ рассчитанные при помощи программы ACDLABS 12.0 для исследованных органических кислот

Название кислоты	ЛК	ТДК	СК	ДДФК	ОДФК
$\lg P$	5.03	5.56	8.22	3.83	7.01

Таблица 3. Толщины пленок, сформированные на поверхности сплава Д16

Название кислоты	d , нм	
	Толщина покрытия, нм	Толщина покрытия после УЗ-отмывки, нм
СК	10.0 ± 2.0	3.0 ± 0.5
ОДФК	4.0 ± 1.5	3.5 ± 1.0

концентрации $C = 1$ мМ не уступает наиболее гидрофобной СК, а $\Theta_c = 158\text{--}159^\circ$.

Для быстрой оценки защитной способности и устойчивости, формируемых СГФ-слоев, могут быть полезны результаты поляризационных измерений. На рис. 3 показаны анодные поляризационные кривые сплава Д16 в 0.05 М растворе NaCl. Начальный потенциал гладкой поверхности электрода сплава Д16 при погружении его в 0.05 М NaCl $E_n = -0.41$ В, при наложении анодной поляризации происходит постепенное увеличение тока $i_a = 6\text{--}8$ мкА/см², и далее, при $E_{пт} = -0.32$ В наблюдается быстрый рост i_a свидетельствующий об образовании питтинга на поверхности электрода.

ЛО сплава Д16 не приводит к смещению значения E_n , а $E_{пт}$ немного увеличивается, $\Delta E_{пт} = 40$ мВ. Последующая СГФ-обработка сплава в этанольных растворах карбоновых кислот, снижает i_a в пассивной области $i_a \leq 2$ мкА/см². После модификации сплава в растворах ЛК и ТДК $\Delta E_{пт} = 170$ и 190 мВ соответственно, а обработка в растворе СК оказывается эффективнее $\Delta E_{пт} = 220$ мВ. Согласно результатам поляризационных измерений, модификация ЛО поверхности сплава в растворе ОДФК обеспечивает лучшую защиту сплава от воздействия хлоридов – величина $\Delta E_{пт} = 270$ В, для ДДФК ниже $\Delta E_{пт} = 180$ мВ. Таким образом, электрохимические измерения в хлоридном растворе свидетельствуют о лучшей защитной способности СГФ-покрытий, сформированных из растворов фосфоновых кислот, чем карбоновых при одинаковых длинах гидрофобного хвоста. Возможно, это объясняется более сильным взаимодействием фосфоновой группы с поверхностью, по сравнению с карбоксильной, за счет большей полярности, что может иметь определяющее значение на устойчивость СГФ-слоев в условиях воздействия хлоридов.

Результаты ускоренных коррозионных испытаний образцов алюминиевого сплава в жестких условиях КСТ показывают его невысокую коррозионную устойчивость $\tau_{кор} = 2.5$ ч (рис. 4). Лазерное текстурирование и последующая модификация поверхности в растворах органических кислот значительно повышает его стойкость. Так, для образцов, модифицированных СК, время до появления первых коррозионных поражений составляет 16 сут для ЛК и ТДК $\tau_{кор}$ несколько меньше – 10 и 11 сут соответственно. ДДФК повышает

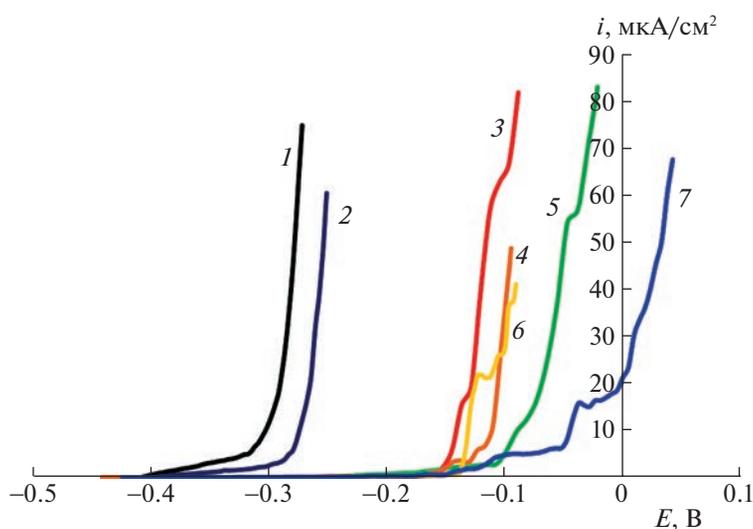


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые сплава Д16 в 0.05 М NaCl, без (1) и предварительно подвергнутого ЛО (2) и затем модифицированного в этанольных растворах органических кислот: 3 – ЛК, 4 – ТДК, 5 – СК, 6 – ДДФК, 7 – ОДФК.

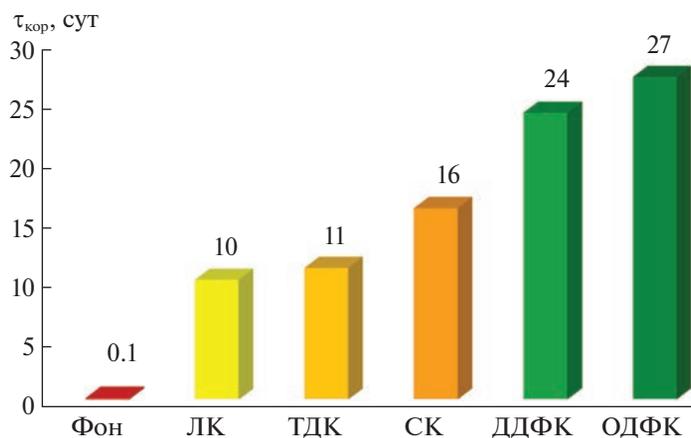


Рис. 4. Время до появления первых коррозионных поражений $\tau_{кор}$ на образцах сплава Д16 с СГФ-покрытиями в камере солевого тумана.

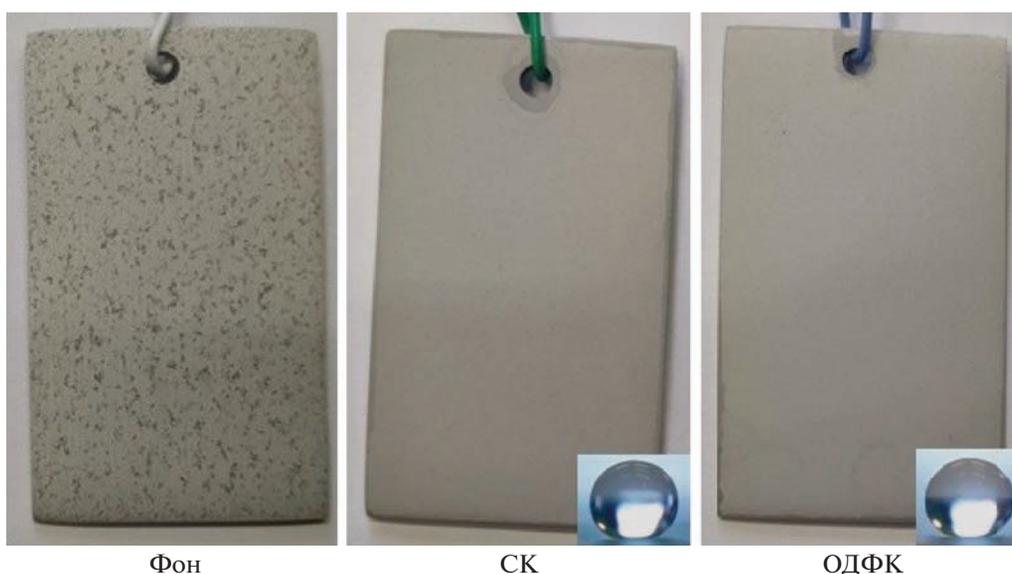


Рис. 5. Фотографии образцов сплава Д16 после 1 года натуральных испытаний на Московской коррозионной станции.

$\tau_{кор}$ до 24 сут, пленки ОДФК характеризуются наибольшей устойчивостью $\tau_{кор} = 27$ сут, таким образом, получаемые из растворов фосфоновых кислот СГФ-покрытия по защитным свойствам оказываются в 1.7–2.7 раза эффективнее, сформированных из растворов карбоновых. Интересно то, что ДДФК, уступая существенно в гидрофобности СК, формирует более устойчивые тонкие покрытия на сплаве, чем лучший карбоксилатный гидрофобизатор.

На рис. 5 представлены фотографии образцов сплава Д16 через 1 год натуральных испытаний на Московской коррозионной станции. На поверхности образцов без СГФ-покрытия первые очаги коррозии обнаруживаются через 1 мес испытаний, во времени площадь и размер поражений увеличивается. На поверхности образцов с СГФ-

покрытиями (СК и ОДФК) за год экспозиции в жалюзийной будке видимые коррозионные поражения не обнаружены, что свидетельствует о высокой защитной способности СГФ-слоев в условиях промышленной городской атмосферы. Измерения величин краевых углов свидетельствуют о сохранении СГФ-свойств покрытий во времени, даже через год испытаний для СК $\theta_c = 154^\circ$, а для ОДФК $\theta_c = 158^\circ$ соответственно.

ВЫВОДЫ

1. СГФ-покрытия на поверхности алюминиевого сплава Д16 получены с использованием его лазерной обработки и последующей ее модификацией в этанольных растворах высших органических (карбоновых и фосфоновых) кислот. Со-

гласно профилометрическим измерениям, высота неровностей после текстурирования поверхности сплава составляет 8–12 мкм.

2. Фосфоновые кислоты, особенно октадецилфосфоновая (ОЭДФК), эффективнее карбоновых, в том числе лучшую из них стеариновую кислоту (СК) в достижении СГФ-покрытий. Результаты эллипсометрических измерений доказали значительную необратимость адсорбции ОДФК на поверхности сплава.

3. Электрохимические испытания образцов сплава Д16 в хлоридном растворе показали, что СГФ-слои органических кислот эффективно препятствуют его локальной депассивации, причем лучшие результаты показывают ОЭДФК.

4. Результаты испытаний образцов с СГФ-покрытиями в камере солевого тумана подтверждают преимущество фосфоновых кислот, в первую очередь ОЭДФК, перед карбоновыми в антикоррозионной защите сплава Д16. Натурные испытания образцов со слоями СК и ОДФК демонстрируют сохранение СГФ-свойств покрытий в течение 1 года в условиях городской атмосферы.

Исследование выполнено в рамках НИОКТР (2022–2024 гг.): “Химическое сопротивление материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления” (регистрационный номер в ЕГИСУ 122011300078-1, инвентарный номер FFZS-2022-0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А.А., Панченко Ю.М., Кузнецов Ю.И. Атмосферная коррозия и защита металлов. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016. 555 с.
2. Xhanari Kl., Finsgar M. // Arab. J. Chem. 2019. V. 12. № 8. P. 4646.
3. Zhang D., Wang L., Qian H. et al. // J. Coat. Technol. Res. 2016. V. 13. P. 11.
4. Ellinas K., Dimitrakellis P., Sarkiris P. et al. // Processes. 2021. V. 9. P. 666.
5. Liu X., Wang P., Zhang D. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. V. 13. P. 25438.
6. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. // Russ. Chem. Rev. 2008. V. 77. № 7. P. 583.
7. Wankhede R.G., Morey S., Khanna A. et al. // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 283. P. 1051.
8. El Fouhaili B., Ibrahim A., Dietlin C. et al. // Prog. Org. Coat. 2019. V. 137. P. 105293.
9. Sun J., Li Y., Liu G. et al. // Langmuir. 2020. V. 36. P. 9952.
10. Wang F., Guo Z. // J. Alloys Compd. 2018. V. 767. P. 382.
11. Boinovich L.B., Modin E.B., Sayfutdinova A.R. et al. // ACS Nano. 2017. V. 11. P. 10113.
12. Trdan U., Sano T., Klobcar D. et al. // Corr. Sci. 2018. V. 143. P. 46.
13. Li X., Zhang Q., Guo Z. et al. // Appl. Surf. Sci. 2015. V. 342. P. 76.
14. Li X., Zhang L., Shi T. et al. // Mat. Corr. 2019. V. 70. P. 558.
15. Zheng S.L., Li C., Fu Q.T. et al. // Surf. Coat. Technol. 2015. V. 276. P. 341.
16. Zheng S., Li C., Fu Q. et al. // Mater. Des. 2016. V. 93. P. 261.
17. Xiang T., Han Y., Guo Z. et al. // ACS Sustain. Chem. Eng. 2018. V. 6. P. 5598.
18. Lei Z.L., Tian Z., Chen X. et al. // Surf. Coat. Technol. 2019. V. 361. P. 249.
19. Bharti V.K., Giri A., Kumar K. et al. // An Environ Sci Toxicol. 2017. V. 2. № 1. P. 21.
20. Semiletov A.M., Chirkunov A.A., Kuznetsov Yu.I. // Mat. Corr. 2020. V. 71. № 1. P. 77.
21. He T., Wang Y., Zhang Y. et al. // Corr. Sci. 2009. V. 51. P. 1757.
22. Zang D., Zhu R., Zhang W. et al. // Ibid. 2014. V. 83. P. 86.
23. Attavar S., Diwekar M., Linford M.R. et al. // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256. № 23. P. 7146.
24. Zhao R., Rupper P., Gaan S. // Coatings 2017. V. 7. P. 133.
25. Luschtinetz R., Oliveira A., Duarte H.A. // J. In. Gen. Chem. 2010. V. 636. P. 1506.
26. Telegdi J. // Int. J. Corros. Scale Inhib. 2016. V. 5. № 2. P. 183.
27. Felhosi I., Kalman E. // Corros. Sci. 2005. V. 47. № 3. P. 695.
28. Aramaki K., Shimura T. // Ibid. 2004. V. 46. P. 313.
29. Costa J.M., Mercer A.D. Progress in the understanding and prevention of corrosion. London: Institute of Materials, 1993. 844 p.
30. McCrackin F.L. Fortran program for analysis of ellipsometer measurements // NBS Technical Note 479. National Bureau of Standards. 1969. P. 79.
31. Hanch C., Leo A. Substituent constants for correlation analysis in chemistry and biology. New York: Wiley-Interscience, 1979. 339 p.