

УДК 620.197.3

Защита алюминиевых сплавов АМгб и Д16 от атмосферной коррозии водными растворами ингибиторов¹

А.М. Семилетов

ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский пр., д. 31/4, 119071, Москва, Россия
E-mail: semal1990@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены возможности защиты алюминиевых сплавов АМгб и Д16 водными растворами ингибиторов коррозии типа карбоксилатов и триалкоксисиланов. Исследована эффективность ингибирования ими анодного растворения сплава АМгб в нейтральном боратном буферном растворе (рН 7,4). Защитная способность получаемых слоев оценена методом капельной пробы, испытаниями в термовлагокамере и камере солевого тумана. Эффективность обработки алюминиевых сплавов в водных растворах органических ингибиторов соотнесена с защитной способностью хроматных пленок. Показано, что модификация сплавов алюминия смесью олеилсаркозината и аминоэтиламинопропилтриметоксисилана при соотношении 3:1 является наиболее эффективным методом защиты от атмосферной коррозии.

Ключевые слова: коррозия, алюминий и его сплавы, ингибиторы коррозии, триалкоксисиланы, карбоксилаты.

Статья поступила в редакцию 10.10.2023 г., После доработки 10.10.2023 г.; Принята к публикации 10.10.2023 г.

Введение

Сплавы алюминия широко применяются в авиационной промышленности, автомобилестроении и судостроении. В настоящее время для их защиты от коррозии используют конверсионные и лакокрасочные покрытия [1]. Ранее для повышения защитных свойств покрытий на алюминиевых сплавах в качестве ингибиторов коррозии (ИК) широко использовали соединения шестивалентного хрома. Их высокая эффективность обусловлена не только способностью восстанавливаться с образованием труднорастворимых соединений, но и залечивать дефекты покрытия, образующиеся при эксплуатации изделия.

¹Исследование выполнено в рамках НИОКТР (2022–2024 гг): «Химическое сопротивление материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления».

Проблема самозалечивания защитных покрытий для алюминиевых сплавов, как и других металлов, при отказе от использования хроматов стоит достаточно остро.

В некоторых случаях на смену хроматам пришли нетоксичные органические ИК, обеспечивающие даже более высокую защиту [2–4]. Адсорбция органических ИК на алюминиевых сплавах, чаще всего исследовалась на примере поверхностно-активных соединений, например солей олеиновой кислоты [2] или диоктилового эфира фосфорной кислоты (ДОФ) [5, 6]. Во многом это связано с трудностями экспериментального разделения эффектов окисления сплава, которое происходит в водных растворах, и непосредственно адсорбцией ингибитора.

Ранее было показано, что в качестве эффективных пассиваторов весьма привлекательны не только высшие аминокислоты, карбоксилаты и алкилфосфонаты, но и кремнийорганические соединения – триалкоксисиланы (ТАС) [7]. В ряде работ продемонстрирована высокая эффективность ТАС при защите алюминия и его сплавов [8–10]. В [8] изучена адсорбция винилтриэтоксисилана (ВТЭС) и аминопропилтриэтоксисилана из водных растворов на поверхности алюминия. Показано, что эти ТАС хемосорбируются на поверхности. Коррозионные испытания в 0,01 М NaCl, показали, что силоксановый слой ВТЭС препятствует возникновению очагов коррозии в течение 10 сут.

В [9] установлено, что пленка, сформированная метакрилоксипропилтриметоксисиланом, ингибирует общую и локальную коррозию чистого алюминия в 3,5% NaCl за счет формирования Al-силоксановой полимерной пленки.

В качестве эффективных ИК алюминия и его сплавов широкое применение нашли высшие карбоновые кислоты жирного ряда и их соли, в том числе и для придания поверхности гидрофобных свойств. Авторами [11] в качестве ИК алюминиевого сплава 2024 использовался деканоат натрия, который при $C_{ин} = 0,05$ моль/л в растворе, содержащем 0,1 моль/л Na_2SO_4 демонстрировал не только высокие защитные свойства, но и после 1 ч выдержки придавал поверхности сплава гидрофобность (краевой угол смачивания $\Theta_c = 115^\circ$).

В работе [12] показана высокая эффективность ингибитора ИФХАН-25 на основе карбоксилатов при защите алюминиевых сплавов после химического или плазменного оксидирования, способного повысить защитные свойства покрытий в хлоридных растворах. Сделано предположение, что модификация покрытий ИК обеспечивает увеличение вклада гидрофобизации в повышение защитных свойств покрытий.

Цель настоящей работы показать возможность защиты от атмосферной коррозии алюминиевых сплавов АМгб и Д16 тонкими пассивирующими слоями, нанесенными из водных растворов солей карбоновых кислот и ТАС, и сравнить их эффективность с пленками, сформированными в хроматном растворе.

Методика эксперимента

Коррозионные и электрохимические испытания проводились на образцах из

алюминиевых сплавов АМг6 и Д16 состав которых представлен в Таблице 1. Перед началом опытов образцы зачищали наждачной бумагой различной зернистости до «зеркального» блеска и обезжиривали ацетоном.

Таблица 1. Состав Al сплавов.

	Al	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Be
АМг6	91,1–93,68	до 0,4	до 0,4	0,5–0,8	–	0,02–0,1	до 0,1	5,8–6,8	до 0,2	0,0002–0,005
Д16	90,9–94,7	до 0,5	до 0,5	0,3–0,9	до 0,1	до 0,15	3,8–4,9	1,2–1,8	до 0,25	–

В качестве ИК исследованы натриевые соли высших карбоновых кислот: олеиновой $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COONa}]$ (ОЛН) и олеил-саркозина $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CON}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{COONa}]$ (ОСН); и ТАС: винилтриметоксисилан (ВС) $[\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]$ и аминоэтиламинопропилтриметоксисилан (АЭАПТС) $[\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_3-\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]$.

ОЛН исследовали в виде порошка натриевой соли (ч), а ОСН – концентрированного (60%) раствора натриевой соли. Рабочие концентраты ТАС готовили растворением в дистиллированной воде (АЭАПТС) и изопропанолем (ВС) при постоянном перемешивании в течение 30 мин.

Формирование защитных слоев на металлах проводилось в водных растворах в течение 10 мин, при комнатной температуре $t=20\pm 2$ или 60°C и постоянном перемешивании, с последующей сушкой образцов на воздухе. В ряде случаев, при обработке алюминиевых сплавов, раствор нейтрализовали, чтобы pH не превышал 8,2, поскольку при $\text{pH}\geq 8,2$ возможно частичное подтравливание пленки оксида.

В электрохимических исследованиях фоновым раствором служил боратный буферный раствор с $\text{pH}=7,4$, содержащий 0,01 моль/л NaCl. Анодные поляризационные кривые алюминиевых сплавов снимали в стеклянной ячейке с разделенными электродными пространствами с помощью потенциостата IPC-Pro. Потенциалы электродов (E) измеряли относительно насыщенного хлорид серебряного электрода и пересчитывали на нормальную водородную шкалу. Вспомогательный электрод – платина.

Рабочие электроды не подвергались предварительной активации, их выдерживали 1 ч в фоновом растворе. После установления потенциала свободной коррозии ($E_{\text{кор}}$) в ячейку вводили исследуемый ИК. При новом значении $E_{\text{кор}}$ (через 15 мин) включали потенциостат и проводили анодную поляризацию электрода. Потенциал питтингообразования ($E_{\text{пт}}$) фиксировали на анодных поляризационных кривых по скачку плотности тока (i_a) с последующей визуальной идентификацией питтинга на электроде.

Кроме того, определяли $E_{\text{пт}}$ на электродах, обработанных в течение 10 мин в пассивирующих растворах ИК. Анодные поляризационные кривые снимали в боратном буферном растворе (pH 7,4), содержащем 1 ммоль/л NaCl, обработанный в растворе ИК электрод высушивали на воздухе, а затем погружали в раствор и

сразу включали анодную поляризацию. Защитные свойства пассивирующих слоев ИК оценивали по увеличению $E_{пт}$ в сравнении с аналогичной величиной, измеренной в отсутствие ингибиторной обработки электрода.

Защитная способность покрытий определялась тремя методами: капельной пробы, экспозиции в термовлагокамере и камере солевого тумана. В первых (ускоренных) испытаниях на изучаемую поверхность алюминиевых сплавов наносилась капля раствора 30 г/л двуххромовокислого калия в 2,0 М HCl. Затем определялось время до появления первых изменений окраски капли (τ_1) и достижения полного изменения окраски капли с оранжевого до зеленого цвета (τ_2). Стойкость покрытия оценивалась по времени прошедшему до изменения цвета. Испытание проводили в 3 различных участках образца и рассчитывали среднее значение.

Испытания в условиях повышенной влажности проводили в термовлагокамере. В камере поддерживали 100%-ную относительную влажность воздуха, а температура 8 ч в сутки составляла $t=(40\pm 2)^\circ\text{C}$, а затем нагрев выключали, в результате чего происходила обильная конденсация воды на образцах. В процессе испытаний проводили осмотр пластинок через равные промежутки времени от начала испытаний, но не реже одного раза в сутки для установления времени появления первого коррозионного очага ($\tau_{кор}$).

Испытаниям в камере солевого тумана подвергались образцы, обработанные лишь растворами наиболее эффективных пассиваторов, предварительно выявленных описанными выше испытаниями. В качестве солевого раствора использовали 5% NaCl (рН=6,5÷7,2). Солевой раствор распылялся внутри камеры с испытуемыми образцами в виде тумана. Камера работала непрерывно в циклическом режиме (один цикл – распыление солевого раствора в течение 15 мин, затем камера отключена в течение 45 мин, далее повторение цикла). Испытания проводили при $t=35^\circ\text{C}$ и влажности 95–100%. Осмотр образцов проводили три раза в сутки для установления времени появления первого коррозионного поражения ($\tau_{кор}$).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Сплав АМгб

В боратном буферном растворе, содержащем 10 ммоль/л NaCl, электрод сплава АМгб, благодаря наличию на поверхности оксидной пленки, находится в пассивном состоянии. Через 1 ч выдержки в таком растворе его $E_{кор}=-0,54$ В (Рисунок 1). При анодной поляризации электрод подвергается локальной депассивации хлоридами, а $E_{пт}=-0,40$ В. При добавлении 1,0 мМ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ потенциал свободной коррозии $E_{кор}$ смещается в сторону более отрицательных величин, а $E_{пт}$ меняется мало ($-0,38$ В). Однако противопиттинговый базис, т.е. разность $E_{пт}-E_{кор}=0,30$ В, что заметно выше аналогичной величины для фонового раствора (0,14 В). Это свидетельствует об ингибирующем действии хромата и торможении им и катодной реакции на сплаве.

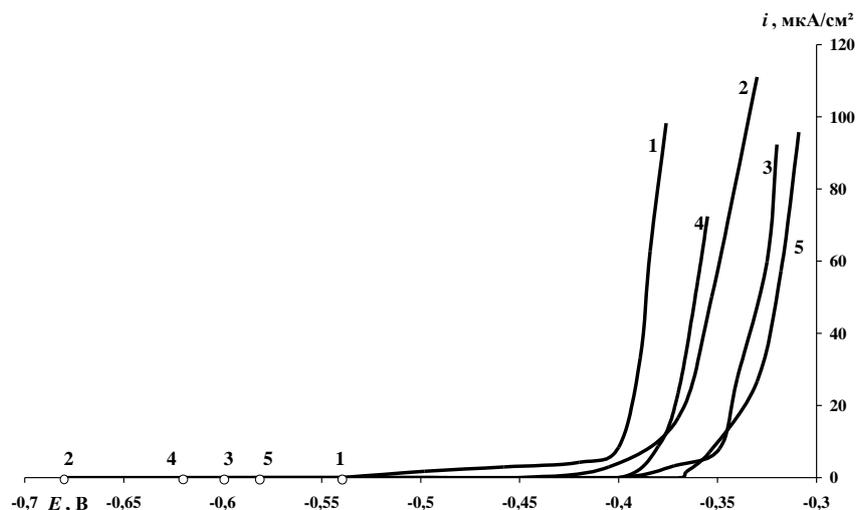


Рисунок 1. Анодные поляризационные кривые сплава АМг6 в боратном буферном растворе с рН 7,36, содержащем 10 ммоль/л NaCl и добавки 1,0 ммоль/л ИК: 1 – 0; 2 – $K_2Cr_2O_7$; 3 – ОСН; 4 – ОЛН; 5 – ОСН + АЭАПТС (3:1).

Известно [2], что весьма эффективными ИК при пассивации черных и цветных металлов являются высшие карбоксилаты ОЛН и ОСН. Добавка 1,0 мМ ОЛН или 1,0 мМ ОСН также смещает $E_{кор}$ в отрицательную сторону, но $E_{пт}$ несколько увеличивается, и для ОСН $E_{пт} = -0,35$ В. Вместе с тем, противопиттинговый базис, наблюдаемый в присутствии ОЛН и ОСН меньше, чем в случае хромата: 0,24 и 0,25 В, соответственно. Добавка 1,0 мМ смесового ИК ОСН+АЭАПТС (соотношение компонентов 3:1) не уступает по эффективности ОСН.

Однако обычно пассивацию металлов проводят в более концентрированных растворах с дальнейшей сушкой поверхности [13]. В связи с этим, во второй серии опытов, анодную поляризацию электрода АМг6 осуществляли после его обработки в пассивирующем растворе, содержащем 16 мМ ИК и сушкой на воздухе.

После пассивации в водном растворе, содержащем 16 мМ ИК защитный эффект в более разбавленном растворе хлорида (1,0 ммоль/л NaCl) виден вполне отчетливо (Рисунок 2). Увеличение $E_{пт}$ по сравнению с аналогичной величиной без пассивирующей обработки составляет для $K_2Cr_2O_7$, ОЛН и ОСН соответственно 0,17, 0,33 и 0,43 В.

Для усиления эффективности карбоксилатных ИК, как показано ранее [13], можно использовать ТАС, которые сами недостаточно эффективны при предотвращении локальной активации сплава АМг6. Так, величина после обработки водным раствором ВС и АЭАПТС увеличивается лишь на 0,18 и 0,26 В, соответственно. Однако, если пассивацию провести в растворе смеси ОСН с ВС или АЭАПТС (3:1), то значения $\Delta E = E_{пт}^{ин} - E_{пт}^{фон}$ достигают соответственно 0,53 и 0,59 В. Этот эффект позволяет предположить, что обработка сплава АМг6 в водном растворе композиции ОСН с АЭАПТС способна превзойти по защите хроматную пассивацию.

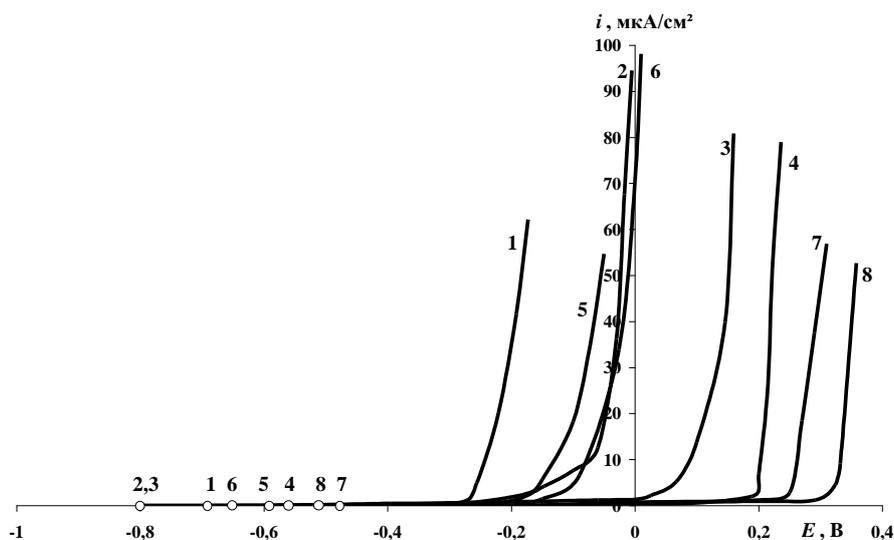


Рисунок 2. Анодные поляризационные кривые сплава АМг6, предварительно обработанного (10 мин) в растворах ИК (16 ммоль/л), в боратном буферном растворе с рН 7,4, содержащем 1 ммоль/л NaCl: **1** – без обработки; **2** – $K_2Cr_2O_7$; **3** – ОЛН; **4** – ОСН; **5** – ВС; **6** – АЭАПТС; **7** – ОСН+ВС (3:1); **8** – ОСН+АЭАПТС (3:1).

Для проверки этого предположения были проведены ускоренные коррозионные испытания капельным методом. Как видно из результатов, представленных в Таблице 2, обработка в растворе бихромата калия даёт лучшие результаты при $t \approx 20^\circ C$. Повышение t до 60° не улучшает, а ослабляет защитные свойства хроматной пленки. На негативное влияние повышения t указывают и результаты коррозионных испытаний в камере тепла и влаги.

Обработка сплава АМг6 в водных растворах самих ТАС выявила существенное различие между ними. Менее устойчивый и легко подвергающийся даже в нейтральном растворе химическим превращениям ВС, обладает пассивирующим действием, даже несколько превосходящим по защите сплава эффект обработки раствором бихромата при одинаковой концентрации ИК – 16 ммоль/л. Это подтверждают и результаты испытаний в камере тепла и влаги. Недостатком раствора является его низкая стабильность, особенно при $60^\circ C$, в котором ВС из-за его химических превращений может образовать труднорастворимые соединения, выпадающие в осадок. Значительно более стабилен водный раствор АЭАПТС, пассивация в котором не столь эффективна, но и она в случае частичной нейтрализации этого раствора улучшается: хотя капельная проба показывает несколько худший результат, чем хроматная пассивация, но в камере тепла и влаги, обработанные водным раствором образцы АЭАПТС, демонстрируют даже лучший защитный эффект.

Растворы самого ОЛН также могут быть весьма эффективными при защите алюминиевых сплавов [2]. Неудивительно, что испытания по кабельной пробе и в камере тепла и влаги после обработки образцов сплава АМг6 водным раствором, содержащем 16 мМ ОЛН демонстрирует лучшую коррозионную стойкость, чем после хроматной пассивации. Замена одной трети ОЛН на ВС, по-видимому,

ослабляет защиту сплава в отличие от аналогичной замены на АЭАПТС.

Таблица 2. Результаты коррозионных испытаний (методом капельной пробы, в камере тепла и влаги, камере солевого тумана) образцов сплава АМгб, предварительно обработанных в водных растворах ингибиторов коррозии.

№	Состав пассивирующего водного раствора, ммоль/л	t обра- ботки, °С	рН раст- вора	Капельная проба		Время до появ- ления первого коррозионного поражения, τ _{кор} , ч	
				τ ₁ , мин:с	τ ₂ , мин:с	КТВ	КСТ
1	Без обработки	–	–	1:00	2:15	18	10
2	16 К ₂ Cr ₂ O ₇	20	4,2	2:00	3:05	100	40
3	–“–	60	4,2	1:10	2:30	76	–
4	4 ВС	20	6,5	1:00	2:00	72	–
5	16 ВС	20	6,6	2:30	4:00	170	15
6	4 АЭАПТС	20	8,7	0:50	1:50	50	–
7	16 АЭАПТС	20	9,0	1:00	2:10	96	–
8	–“–	20	8,2	1:40	2:30	120	10
9	16 ОЛН	60	8,0	3:00	5:10	128	50
10	12 ОЛН+4 ВС	60	7,7	2:50	4:00	78	–
11	12 ОЛН+4 АЭАПТС	60	8,3	1:10	2:50	176	–
12	1 ОСН	60	8,0	1:00	2:00	–	–
13	4 ОСН	60	8,0	1:30	4:00	–	–
14	8 ОСН	60	8,0	3:30	8:20	–	–
15	16 ОСН	60	7,9	4:20	10:00	200	56
16	12 ОСН+4 ВС	60	8,0	4:00	12:45	240	80
17	12 ОСН+4 АЭАПТС	60	9,4	3:00	11:20	304	–
18	–“–	60	8,2	3:30	13:40	390	110

Лучшим ИК, судя по капельной пробе и испытаниям в камере тепла и влаги, является ОСН. Уже при вдвое меньшей $C_{\text{ОСН}}=8$ мМ обработка раствором этого ИК заметно превосходит хроматную пассивацию, а увеличение $C_{\text{ОСН}}$ до 16 мМ еще больше усиливает защиту сплава. Интересно, что в этом случае замены части ОСН на ВС и особенно АЭАПТС придаёт обработке сплава АМгб более высокую эффективность. Так, в камере тепла и влаги пленки, сформированные в растворе, содержащем 12 мМ ОСН+ 4 мМ АЭАПТС с рН 8,2, почти в 4 раза дольше не допускают появления первого коррозионного поражения в условиях камеры тепла и влаги. Судя по капельной пробе, развитие коррозии после появления ее первого проявления также успешней замедляется, чем при хроматной пассивации. На это

указывает величина отношения τ_1/τ_2 , которое достигает 4,0 вместо 1,5 для хроматной обработки.

Коррозионные испытания образцов в камере соляного тумана, конечно, являются наиболее жестким методом. Однако и в этом случае можно заметить, что обработка водным раствором ОСН в 1,4 раза превосходит эффективность хроматной пассивации Таблица 2. Несколько слабее действие ОЛН, но и он не уступает в эффективности хромату. Напротив, обработка водными растворами самих ТАС для условий соляного тумана значительно слабее хроматной пассивации, и даже в случае обработки водным раствором ВС не превышает 15 ч. Использование же композиций ОСН с ТАС позволяет существенно увеличить эффективность защиты сплава АМгб. Так, время до появления первого коррозионного поражения при обработке в смеси ОСН+ВС (3:1), и ОСН+АЭАПТС (3:1) составляет 80 и 110 ч, соответственно.

При более длительных испытаниях в камере соляного тумана замечено, что ОСН и его композиция с АЭАПТС продолжает тормозить развитие очагов коррозии во времени. Как видно на фотографиях образцов, полученных после 240 ч испытаний (Рисунок 3), обработка раствором, содержащим 12 мМ ОСН+4 мМ АЭАПТС намного эффективнее пассивации растворами его компонентов при той же концентрации.

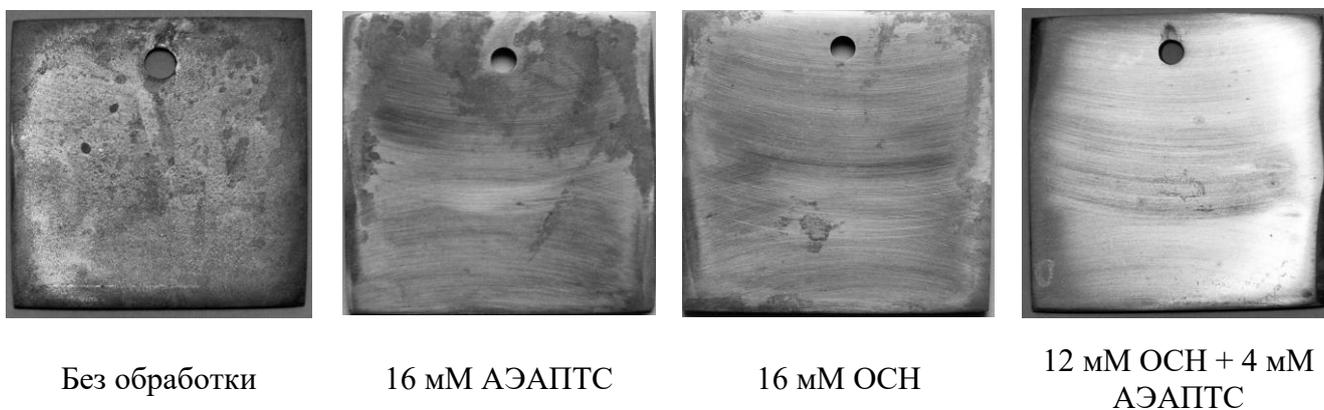


Рисунок 3. Фотографии внешнего вида образцов сплава АМгб после 240 ч испытаний в камере солевого тумана.

Сплав Д16

В условиях камеры влажности на образцах сплава Д16 появляются первые очаги коррозионных поражений через 8 ч испытаний (Рисунок 4). Обработка сплава в растворе хромата при 20°C обеспечивает $\tau_{\text{кор}}=150$ ч, повышение t негативно влияет на защитные свойства получаемой защитной пленки $\tau_{\text{кор}}=98$ ч.

Испытания в камере тепла и влаги показали, что обработка образцов водным раствором ОЛН с $C_{\text{олн}}=16$ мМ уступает хроматной пассивации, а $\tau_{\text{кор}}=80$ ч. Гораздо лучшей защитной способностью, чем ОЛН, обладает ОСН, а $\tau_{\text{кор}}=194$ ч, который превосходит по защитной способности хромат в 1,3 раза.

Обработка сплава Д16 в водных растворах ТАС выявила преимущество ВС перед АЭАПТС. Модификация сплава в растворе ВС, который легко подвергается

гидролизу, обеспечивает $\tau_{\text{кор}} = 126$ ч и немного уступает раствору хромата. Обработка в водном растворе более стабильного ТАС – АЭАПТС, не столь эффективна, при этом $\tau_{\text{кор}}$ не превышает $\tau_{\text{кор}} = 50$ ч.

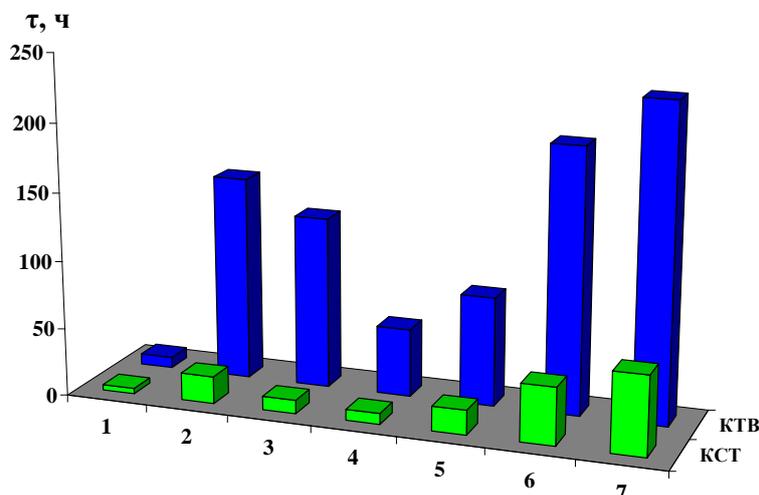


Рисунок 4. Время до появления первого коррозионного поражения ($\tau_{\text{кор}}$) на образцах из сплава Д16, помещенных в камеру солевого тумана и термовлагокамеру без (1) и подвергнутых предварительно пассивации (2-7) в водных растворах ингибиторов коррозии (16 ммоль/л) содержащих: 2 – $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$; 3 – ВС; 4 – АЭАПТС; 5 – ОЛН; 6 – ОСН; 7 - ОСН+АЭАПТС (3:1).

Пассивация в растворе смесового ингибитора с $C_{\text{ин}} = 16$ мМ ОСН+АЭАПТС (3:1) позволяет получать пленки с наилучшими защитными свойствами, а $\tau_{\text{кор}} = 230$ ч.

Преимущество смесовой обработки сплава Д16 подтверждается и электрохимической оценкой предварительно сформированных защитных слоев ИК в боратном буферном растворе с 1 ммоль/л NaCl (Рисунок 5). Пассивация раствором $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ с $C_{\text{ин}} = 16$ мМ смещает потенциал $E_{\text{кор}}$ на 0,2 В, по сравнению с $E_{\text{кор}}$ фонового образца, а значение $\Delta E_{\text{пт}}$ меняется мало и составляет $\Delta E_{\text{пт}} \leq 0,1$ В. Обработка в растворах АЭАПТС и ОСН при той же концентрации слабо изменяет $E_{\text{кор}}$, но величина $E_{\text{пт}}$ выше, чем для хроматной обработки. Смещение $\Delta E_{\text{пт}}$ составляет для ОСН и для его смеси с АЭАПТС (3:1) соответственно 0,3 и 0,4 В.

Коррозионные испытания в условиях камеры солевого тумана показали, что обработка в водных растворах органических ИК не уступает по эффективности защиты сплава Д16 хроматной пассивации ($\tau_{\text{кор}} = 20$ ч). Обработка в водном растворе ОСН с $C_{\text{ин}} = 16$ мМ эффективнее хромата в условиях нейтрального солевого тумана в 2,1 раза ($\tau_{\text{кор}} = 42$ ч). Небольшие добавки ВС и АЭАПТС к ОСН увеличивают защитные свойства пленок, а время до появления первого коррозионного поражения возрастает до $\tau_{\text{кор}} = 55$ и 58 ч.

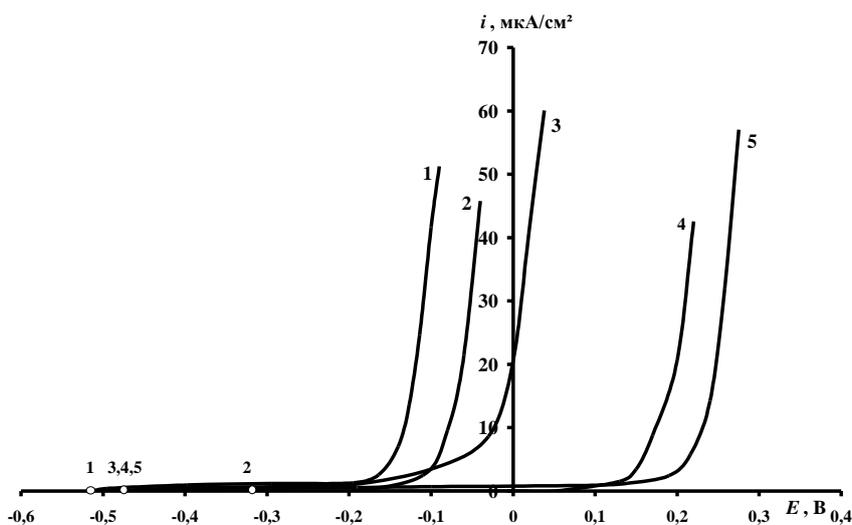


Рисунок 5. Анодные поляризационные кривые сплава Д16, предварительно обработанного (10 мин) в растворах ИК (16 ммоль/л), в боратном буферном растворе с рН 7,4, содержащем 1 ммоль/л NaCl: **1** – без обработки; **2** – $K_2Cr_2O_7$; **3** – АЭАПТС; **4** – ОСН; **5** – ОСН+АЭАПТС (3:1).

Выводы

1. Результаты поляризационных исследований показали способность органических ИК: ОЛН и ОСН замедлять анодное растворение сплава АМгб в нейтральном боратном буферном растворе, содержащем 10 ммоль/л NaCl.
2. Обработка поверхности алюминиевых сплавов АМгб и Д16 в растворах ОЛН и ОСН позволяет сформировать пленки, не уступающие по защитным свойствам хроматным в условиях камер тепла и влаги или соляного тумана.
3. Хотя ВС и АЭАПТС обладают некоторым защитным действием по отношению к алюминиевым сплавам, но оно слабее хромата, особенно для условий соляного тумана. Однако эти ТАС способны усиливать защитные свойства натриевых солей высших карбоновых кислот.
4. Обработка алюминиевых сплавов в водном растворе смесового ингибитора ОСН и АЭАПТС при соотношении компонентов 3:1 и суммарной $C_{ин} = 16$ мМ является наиболее эффективным методом предотвращения коррозии не только в условиях ежесуточной конденсации влаги на образцах, но и в особенно жестких условиях атмосферы соляного тумана.

Литература

1. M.W. Kendig and R.G. Buchheit, Corrosion inhibition of aluminum and aluminum alloys by soluble chromates, chromate coatings, and chromate-free coatings, *Corrosion*, 2003, 59, 379–400. doi:[10.5006/1.3277570](https://doi.org/10.5006/1.3277570)
2. Yu.I. Kuznetsov, *Organic Inhibitors of Corrosion of Metals*, 1996, New York and London, Plenum Press, 283 pp.

3. A.M. Semiletov, A.A. Chirkunov and Yu.I. Kuznetsov, Protection of D16 Alloy against corrosion in neutral aqueous solutions and in an aggressive atmosphere using organic inhibitors, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2020, 56, 1285–1292. doi:[10.1134/S2070205120070163](https://doi.org/10.1134/S2070205120070163)
4. Kl. Khanari and M. Finsgar, Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions: A review, *Arabian J. Chem.*, 2019, 12, 4646–4663. doi: [10.1016/j.arabjc.2016.08.009](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.08.009)
5. Yu.I. Kuznetsov, N.P. Andreeva and G.Yu. Kazanskaya, On the inhibition effect of dialkyl phosphates in the depassivation of metals, *Prot. Met.*, 2000, 36, 351–355. doi:[10.1007/BF02758507](https://doi.org/10.1007/BF02758507)
6. С.В. Олейник, Ю.А. Кузенков, Н.П. Андреева и Ю.И. Кузнецов, Бесхроматные пигменты для защиты алюминиевого сплава Д16, *Коррозия: материалы, защита*, 2008, № 3, 29–34.
7. A.A. Chirkunov, A.M. Semiletov, Yu.I. Kuznetsov and N.P. Andreeva, Passivation of steel with aqueous solutions of trialkoxysilanes, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2015, 51, 1154–1159. doi: [10.1134/S2070205115070059](https://doi.org/10.1134/S2070205115070059)
8. М.А. Petrunin, L.B. Maksaeva, Т.А. Yurasova, E.V. Terekhova, V.A. Kotenev and A.Yu. Tsivadze, Adsorption of alkoxy silanes on aluminum surface from aqueous solutions, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2013, 49, 655–661. doi: [10.1134/S2070205113060117](https://doi.org/10.1134/S2070205113060117)
9. A.M. Beccaria and L. Chiaruttini, The inhibitive action of metacryloxypropylmethoxysilane (MAOS) on aluminium corrosion in NaCl solutions, *Corros. Sci.*, 1999, 41, 885–899. doi: [10.1016/S0010-938X\(98\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00161-9)
10. F. Frignani, F. Zucci, G. Trabanelli and V. Grassi, Protective action towards aluminium corrosion by silanes with a long aliphatic chain, *Corros. Sci.*, 2006, 48, 2258–2273. doi: [10.1016/j.corsci.2005.06.018](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.018)
11. G. Boiser, N. Portail and N. Pebere, Corrosion inhibition of 2024 aluminium alloy by sodium decanoate, *Electrochim. Acta*, 2010, 55, 6182–6189. doi: [10.1016/j.electacta.2009.10.080](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.10.080)
12. С.В. Олейник, В.С. Руднев, Ю.А. Кузенков, Т.П. Яровая, Л.Ф. Трубецкая и П.М. Недозоров, Модифицирование ПЭО–покрытий на алюминиевых сплавах ингибиторами коррозии, *Коррозия: материалы, защита*, 2012, № 11, 36–41.
13. A.M. Semiletov, A.A. Chirkunov, Yu.I. Kuznetsov and N.P. Andreeva, Improving steel passivation with aqueous solutions of [3-(2-Aminoethylamino)propyl]trimethoxysilane, *Russ. J. Phys. Chem. A.*, 2015, 89, 2271–2277. doi: [10.1134/S0036024415120262](https://doi.org/10.1134/S0036024415120262)

Protection of aluminum alloys AMg6 and D16 from atmospheric corrosion with aqueous solutions of inhibitors

A.M. Semiletov

*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Leninsky av. 31/4, 119071 Moscow, Russian Federation
e-mail: semal1990@mail.ru*

Abstract

The article discusses the possibilities of protecting aluminum alloys AMg6 and D16 with aqueous solutions of corrosion inhibitors such as carboxylates and trialkoxysilanes. The effectiveness of their inhibition of anodic dissolution of the AMg6 alloy in a neutral borate buffer solution (pH 7.4) was studied. The protective ability of the layers was assessed using the drop test method, tests in a thermal moisture chamber and a salt fog chamber. The effectiveness of processing aluminum alloys in aqueous solutions of organic inhibitors is correlated with the protective ability of chromate films. It has been shown that modification of aluminum alloys with a mixture of oleyl sarcosinate and aminoethylaminopropyltrimethoxysilane at a ratio of 3:1 is the most effective method of protection against atmospheric corrosion.

Key words: *corrosion, aluminum and its alloys, corrosion inhibitors, trialkoxysilanes, carboxylates.*