

УДК 541.138.2

## АНОДНОЕ РАСТВОРЕНIE И КОРРОЗИЯ AI В РАСТВОРАХ KOH В 90%-НОМ ЭТАНОЛЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ДОБАВКИ СОЕДИНЕНИЙ ГАЛЛИЯ И ИНДИЯ. ИНГИБИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ЛИМОННОЙ КИСЛОТЫ

© 2025 г. К. В. Рыбалка<sup>a</sup>, \*, Л. А. Бекетаева<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

\*e-mail: mamaison2000@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.10.2024 г.

После доработки 01.11.2024 г.

Принята к публикации 02.11.2024 г.

Рассмотрено влияние добавки моногидрата лимонной кислоты на анодное растворение и скорость коррозии алюминия в растворах KOH в 90%-ном этаноле, содержащем добавки соединений галлия и индия. Показано, что введение в раствор моногидрата лимонной кислоты позволяет уменьшить величину тока коррозии алюминия, не снижая при этом скорости его анодного растворения. Эффективность ингибирования моногидрата лимонной кислоты при введении его в раствор в концентрации  $5 \cdot 10^{-4}$  М составляет 58%. Гальваностатические разрядные кривые в указанном электролите демонстрируют плато разряда вплоть до плотности тока 16  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

**Ключевые слова:** алюминий, KOH, этанол, анодное растворение, выделение водорода, ток коррозии

**DOI:** 10.31857/S0424857025010079, **EDN:** DKOTBU

## ANODIC DISSOLUTION AND CORROSION OF AI IN KOH SOLUTIONS IN 90% ETHANOL CONTAINING ADDITIVES OF GALLIUM AND INDIUM COMPOUNDS. INHIBITORY EFFECT OF CITRIC ACID

© 2025 K. V. Rybalka<sup>a</sup>, \* and L. A. Beketaeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: mamaison2000@yandex.ru

The influence of addition of citric acid monohydrate on anodic dissolution and corrosion rate of aluminium in KOH solutions in 90% ethanol containing additives of gallium and indium compounds has been considered. It is shown that the introduction of citric acid monohydrate into the solution allows to reduce the magnitude of aluminium corrosion current without reducing the rate of its anodic dissolution. The inhibition efficiency of citric acid monohydrate when introduced into the solution at a concentration of  $5 \cdot 10^{-4}$  M is 58%. The discharge galvanostatic curves in the above electrolyte show a flat discharge plateau up to a discharge current density of 16  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

**Keywords:** aluminium, KOH, ethanol, anodic dissolution, hydrogen release, corrosion current

### ВВЕДЕНИЕ

Алюминий благодаря его высокой объемной удельной емкости ( $8.04 \text{ mA ch}/\text{cm}^3$ ) и величине стандартного электродного потенциала ( $-1.66 \text{ В}$ ) является перспективным анодным материалом для создания энергоемких источников тока. Эти особенности алюминия и его широкая распространенность в земной коре давно при-

влекают внимание исследователей, работающих в области химических источников тока. Элемент с алюминиевым анодом в растворе азотной кислоты в качестве электролита был предложен Баффом (Buff) еще в 1897 г. ЭДС этого источника тока равна 1.377 В [1]. В дальнейшем в работах по созданию источников тока с алюминиевым анодом рассматривались различные солевые,

кислотные и щелочные электролиты на водной основе [2–4].

Существенное ограничение использования алюминия в качестве анода в источниках тока с водным электролитом обусловлено значительным саморастворением алюминия, вызванным активным выделением водорода. Для преодоления этого осложнения многие исследователи перешли к использованию неводных электролитов [5–9].

Электрохимическое поведение алюминия зависит не только от применяемого электролита, но и от предварительной обработки его поверхности. Использование алюминия в качестве анода в неводных электролитах требует применения трудоемкой предварительной обработки, необходимой для удаления оксидной пленки на электроде [7, 9]. Это обстоятельство затрудняет практическое использование алюминия в качестве анода в источниках тока.

Использование щелочных водно-спиртовых растворов [10–16] позволяет преодолеть это осложнение, так как разрушение изолирующего оксидного слоя на электроде происходит непосредственно при контакте алюминия с рабочим электролитом. Электрохимическая активность алюминиевого электрода в этих растворах зависит от содержания воды в электролите, возрастаая с увеличением ее концентрации [11, 12, 15]. Одновременно с ростом активности алюминия увеличение содержания воды приводит к росту скорости его коррозии.

Ряд ингибиторов коррозии, применявшихся в водных растворах, оказались эффективными и в водно-спиртовых электролитах. В [13] исследовано влияние  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$  на анодное поведение алюминия и скорость его коррозии в 4 М растворе KOH в смешанном растворителе метанол/вода (соотношение по объему 4/1). Введение стянната натрия существенно замедляет коррозию алюминия за счет осаждения олова на его поверхности. Авторы [13] установили, что при значительном увеличении концентрации стянната натрия в электролите осадок олова на поверхности алюминиевого электрода растрескивается, приводя к снижению ингибирующего влияния стянната. Введение  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$  одновременно приводит к улучшению разрядных характеристик алюминия за счет ингибирования процесса образования плотного осадка продуктов реакции на поверхности электрода. Этот эффект возрастает с ростом концентрации стянната в электролите. При концентрации стянната натрия 10.0 мМ/л гальвано-

статические кривые при плотности разрядного тока вплоть до 20  $\text{mA}/\text{см}^2$  демонстрируют плато разряда. При одной и той же плотности тока разрядные кривые в растворах, содержащих стяннат, смещены в сторону отрицательных значений потенциала по сравнению с кривыми, полученными в растворах без ингибитора. В [17] для воздушно-алюминиевых источников тока предложен гибридный ингибитор, включающий стяннат натрия и казеин. Введение 0.05 М  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$  и 0.6 г/л казеина в 4 М раствор NaOH позволяет снизить на порядок скорость коррозии алюминия и увеличить на 89.3% разрядную емкость источника тока. Присутствие этиленгликоля в гибридном ингибиторе  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$  / этиленгликоль [18] способствует более равномерному и плотному осаждению олова на поверхности алюминиевого электрода, что позволяет усилить ингибирующее воздействие стянната натрия. Одновременно улучшаются разрядные характеристики анода. Наилучшие результаты обеспечивает применение 10% этиленгликоля (массовая доля) и 0.05 М  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$ . Проведенное в [18] исследование коррозионного поведения 1060 Al сплава в 4 М водном растворе NaOH показало, что использование указанного выше гибридного ингибитора позволяет увеличить использование анода от 16 до 43%, а удельную плотность энергии от 543 до 1577 Вт ч/кг.

Известно, что оксид цинка является эффективным ингибитором коррозии алюминия в щелочных электролитах. Эффективность ингибирования коррозии алюминия в растворах KOH зависит как от концентрации  $\text{ZnO}$ , так и от концентрации KOH [19]. Авторы [19] установили, что в растворах KOH, насыщенных оксидом цинка, на поверхности алюминия образуется плотная цинковая пленка, обладающая сильно выраженной адгезией и максимальными защитными свойствами. Потенциал разомкнутой цепи алюминиевого электрода при введении  $\text{ZnO}$  смещается в сторону положительных значений. В 55%-ном растворе KOH, насыщенном  $\text{ZnO}$ , это смещение составляет  $\sim 200$  мВ. При анодной поляризации расходжение между поляризационными кривыми в чистом растворе KOH и в присутствии добавок  $\text{ZnO}$  уменьшается. Скорость коррозии алюминия в указанном выше электролите уменьшается на 2 порядка по сравнению с тем, что наблюдается в отсутствие добавки  $\text{ZnO}$ .

Рядом исследователей предложены гибридные ингибиторы, основанные на совместном использовании оксида цинка и специально подобранных органических соединений. Влияние добавок

$\text{ZnO}$  на коррозионное поведение алюминия в 4 М растворе КОН в смешанном растворителе метанол/вода (соотношение 3/2 по объему) рассмотрено в [14]. Скорость коррозии алюминия в этом растворе ( $6.46 \text{ mA/cm}^2$ ) значительно меньше, чем в соответствующем 4 М водном растворе КОН. Добавка  $\text{ZnO}$  в электролит позволяет дополнительно уменьшить скорость коррозии алюминия, причем этот эффект может быть усилен за счет одновременного введения в раствор гидрокситриптамина. Введение в раствор 0.2 М  $\text{ZnO}$  и 1.0 мл/л гидрокситриптамина позволяет уменьшить ток коррозии алюминия в 82 раза, снизив его от 6.46 до  $0.079 \text{ mA/cm}^2$ . Вместе с тем наличие цинката в растворе приводит к смещению потенциала разомкнутой цепи алюминиевого электрода на 300 мВ в сторону положительных значений. В [20] рассмотрено влияние совместного использования оксида цинка и полиэтиленгликоля (ПЭГ) на электрохимическое поведение и скорость коррозии алюминия в 4 М растворе КОН. Авторы [20] отмечают, что в отсутствие ПЭГ осадок цинка на поверхности алюминия имеет рыхлую, губчатую структуру, слабо выраженную адгезию. В этом случае не может быть обеспечено ингибирирование коррозии алюминия в течение длительного времени. Введение ПЭГ позволяет улучшить характеристики осадка цинка. Эффективность влияния ПЭГ зависит от его концентрации в растворе. Максимальная эффективность этого ингибитора достигается при введении в раствор 0.2 М  $\text{ZnO}$  и 2 мМ ПЭГ. Введение ингибитора позволяет существенно уменьшить скорость коррозии алюминия, вместе с тем ПРЦ алюминия смещается примерно на +0.5 В. относительно величины ПРЦ в отсутствие ингибитора. Соответственно, разрядные кривые протекают при относительно низких величинах электродного потенциала. Авторами [21] предложен гибридный ингибитор, включающий  $\text{ZnO}$  и  $\alpha$ ,  $\omega$ -Бис (2-карбоксиметил) полиэтиленгликоль (ПЭГ-диацид). Введение ПЭГ-диацида влияет на морфологию цинкового слоя, образующегося на поверхности алюминия, увеличивая его плотность и снижая пористость. Ингибитор  $\text{ZnO}/\text{ПЭГ-диацид}$  тормозит коррозию алюминия в щелочных растворах за счет уменьшения скорости катодной реакции. Его использование обеспечивает эффективную защиту алюминиевого электрода от коррозии, не влияя на его разрядные характеристики. Во время разряда алюминиевого анода защитный слой, сформированный в присутствии ингибитора, быстро удаляется с поверхности алюминиевого анода, обеспечивая его эффективный разряд.

При прекращении разряда защитный слой  $\text{ZnO}/\text{ПЭГ-диацид}$  восстанавливается, возобновляя защиту анода от коррозии в промежутки времени между разрядами. Эффективность этого ингибитора зависит как от количества  $\text{ZnO}$  в растворе, так и от концентрации ПЭГ-диацида. Оптимальный эффект достигается при введении в раствор 5000 ppm ПЭГ-диацида и 16 г/л  $\text{ZnO}$ .

Влияние добавок оксида кальция и цитрата натрия и калия на коррозию и анодное поведение алюминия Al–2S в 4 М водных растворах гидроксида натрия и калия исследовано в [22]. Авторы [22] предполагают, что алюминий, находящийся в щелочном растворе в виде алюминат ионов, взаимодействуя с ионами  $\text{Ca}^{2+}$ , образует алюминат кальция, осаждающийся в виде тонкой пленки на поверхности алюминия, предотвращая его коррозию. Одновременно ионы  $\text{Al}^{3+}$ , реагируя с избытком цитратов, образуют цитрат алюминия. Таким образом, ингибирующее воздействие на коррозию алюминия могут оказывать также цитраты кальция и алюминия. Показано, что эффективность ингибирирования возрастает с увеличением концентрации, как оксида кальция, так и цитратов натрия и калия. Эффективность ингибирирования в этих растворах достигает 93%.

Исследование влияния ионов кальция и тартрат-ионов на поведение алюминия в 4 М водном растворе КОН [23] показало, что тартрат-ионы сами по себе оказывают незначительное ингибирующее воздействие, однако существенно усиливают ингибирующее влияние ионов кальция. Эффективность ингибирирования при этом составляет 85%. Совместный эффект может быть связан, по мнению авторов, с образованием комплексов, приводящих к увеличению растворимости  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В [24] исследовано ингибирующее влияние мочевины и тиомочевины на коррозионное поведение сплава Al–Mg–In–Mn в 5 М водном растворе КОН. Показано, что введение указанных выше ингибиторов коррозии в раствор в количестве 25 мМ позволяет уменьшить плотность тока коррозии сплава от величины  $26 \text{ mA/cm}^2$  в растворе, не содержащем ингибиторов, до 12.6 и  $11.2 \text{ mA/cm}^2$  в случае использования добавок мочевины и тиомочевины соответственно. Эффективность влияния мочевины и тиомочевины на ток коррозии усиливается с ростом их концентрации в растворе.

Многие из этих ингибиторов не могли быть нами использованы из-за их низкой растворимости в этаноле. Лимонная кислота является одним из наиболее эффективных ингибиторов корро-

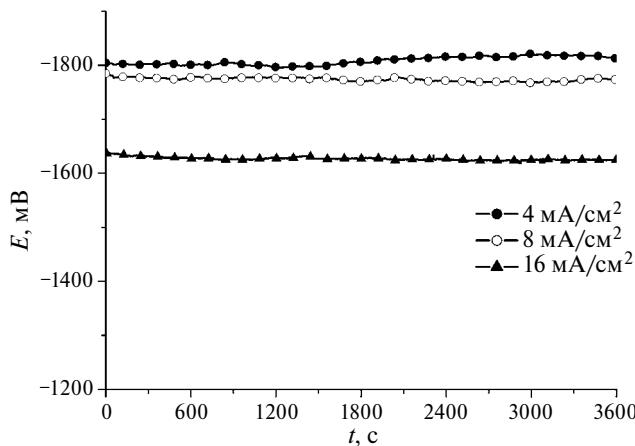


Рис. 1. Гальваностатические разрядные кривые на Al-электроде в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем 10<sup>-4</sup> М Ga<sup>3+</sup> и 10<sup>-3</sup> М In<sup>3+</sup> при различных величинах плотности тока.

зии алюминия и его сплавов в водной щелочной среде [25], вместе с тем она хорошо растворима как в воде, так и в этаноле. Эти свойства лимонной кислоты обусловили выбор ее в качестве ингибитора в настоящей работе.

Ранее [15] нами было рассмотрено влияние добавок соединений галлия и индия на электрохимическую активность Al в 2 М растворе KOH в 96%-ном этаноле. Было показано, что активирующее воздействие ионов галлия наиболее эффективно при их содержании в растворе в пределах 10<sup>-5</sup> – 10<sup>-4</sup> М. Разрядные гальваностатические кривые в растворах KOH в 96%-ном этаноле с добавками соединений галлия и индия в концентрации 10<sup>-4</sup> и 10<sup>-3</sup> М соответственно позволяют получить плато разряда при плотности тока вплоть до 4 mA/cm<sup>2</sup>.

Цель настоящего исследования – поиск состава электролита на основе смешанного водно-этанольного растворителя, обеспечивающего максимально возможный ток анодного растворения алюминия при минимальном токе его коррозии.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Al-электроды получали из алюминиевого листа чистоты 99.999%. Для проведения электрохимических измерений гладкие листы толщиной 0.5 мм разрезали на прямоугольники 5×10 мм с отводом для электрического контакта. Поверхность Al-электрода перед измерением обрабатывали наждачной бумагой зернистости P 400 и обезжиривали этиловым спиртом.

Все измерения проведены в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем добавки Ga(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

и In(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>. Растворы электролитов получали с использованием химически чистых реагентов. В качестве растворителя использован 90%-ный этанол.

Измерения проводили в небольшой (15 см<sup>3</sup>) стеклянной трехэлектродной ячейке. Все измерения проведены после предварительной выдержки Al-электрода в рабочем растворе в течение 1 ч. Электродом сравнения служил хлоридсеребряный электрод. Вспомогательный электрод выполнен из платины.

Гальваностатические измерения при плотности тока 4.8 и 16 mA/cm<sup>2</sup> проведены с использованием потенциостата IPC2000 Pro (EKONIKS), Россия. Все измерения выполнены при температуре 25°C.

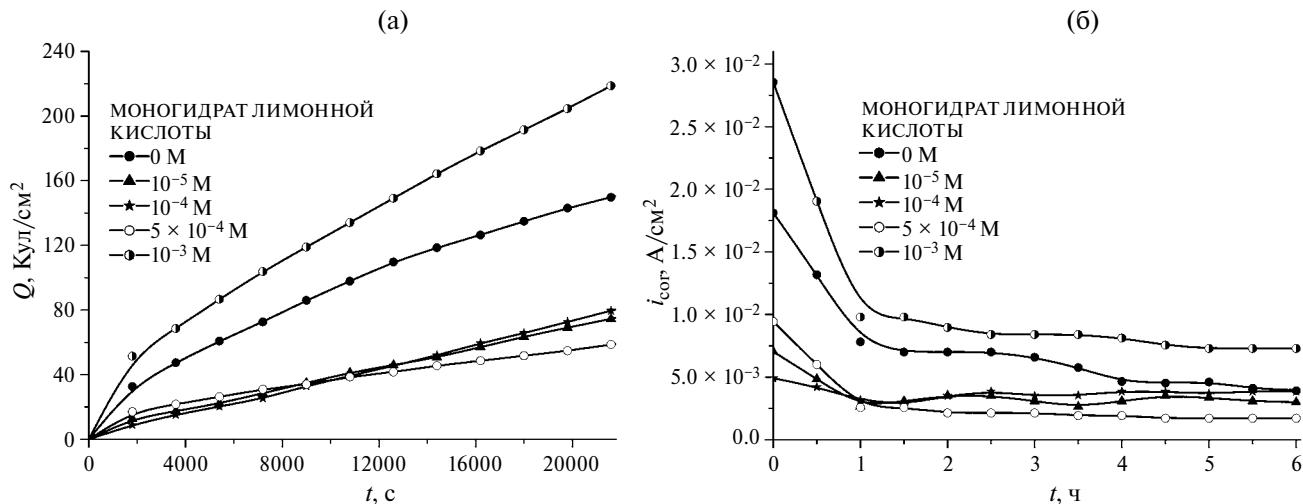
Был использован традиционный метод измерения скорости выделения газа на алюминии в рабочем электролите. Небольшой образец алюминиевого листа, используемого для изготовления электродов, помещали в сосуд с исследуемым раствором. Выделяющийся на алюминиевом образце газ поступал в перевернутую вверх дном бюretteку, заполненную водой, для измерения объема выделившегося газа по объему вытесненной воды. Объем выделившегося газа приводили к нормальным условиям, применяя соотношение  $V = V_m \cdot 273(P - P_w)/(760(273+t))$ . Здесь  $V$  – объем газа, приведенного к нормальным условиям,  $V_m$  – измеренный объем выделившегося газа,  $P$  – атмосферное давление,  $P_w$  – парциальное давление водяных паров в условиях опыта,  $t$  – температура, °C.

Количество электричества ( $Q$ ), затраченное на восстановление водорода, и объем выделившегося водорода, отнесенные к единице поверхности исследуемого образца алюминия, связаны соотношением  $Q = 2FV/V_o$ , где  $F$  – число Фарадея,  $V$  – приведенный к нормальным условиям объем выделившегося газа,  $V_o$  – объем одного моля газа при нормальных условиях. Плотность тока коррозии, обусловленного выделением водорода ( $i_{cor} = dQ/dt$ ), может быть легко определена дифференцированием зависимости  $Q$  от  $t$ , где  $t$  – время нахождения алюминиевого образца в растворе.

Эффективность действия ингибитора (моногидрата лимонной кислоты) определялась по его влиянию на скорость выделения водорода на алюминии. Все измерения проведены в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем добавки Ga(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, In(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> и различные концентрации моногидрата лимонной кислоты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены хронопотенциограммы гальваностатического разряда, полученные



**Рис. 2.** Зависимости: (а) количества электричества, затраченного на выделение водорода на Al, (б) плотности тока коррозии Al, от времени его нахождения в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем  $10^{-4}$  М  $Ga^{3+}$  и  $10^{-3}$  М  $In^{3+}$  и добавки моногидрата лимонной кислоты.

на алюминиевом электроде в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем  $10^{-4}$  М  $Ga^{3+}$  и  $10^{-3}$  М  $In^{3+}$ .

Смещение потенциала электрода в сторону положительных значений от установившегося значения потенциала разомкнутой цепи при плотности анодного тока 4  $mA/cm^2$  не превышает 50 мВ. Следует отметить стабильность величины потенциала Al-электрода в процессе разряда. Увеличение содержания воды в смешанном водно-этанольном растворе с 4 до 10% приводит к четырехкратному увеличению достижимой величины плотности разрядного тока по сравнению с тем, что было получено ранее в аналогичном электролите, содержащем 96% этанола [15].

На рис. 2а приведены кривые зависимости количества электричества, затраченного на выделение водорода на алюминии, определенного по объему выделившегося газа, от времени нахождения Al-образца в растворе, содержащем различные концентрации ингибитора. Дифференцированием зависимости количества электричества  $Q$  по времени  $t$  получены зависимости тока коррозии алюминия  $i_{cor}$  от времени его нахождения в растворе (рис. 2б). Как следует из рис. 2б, добавки моногидрата лимонной кислоты, в зависимости от ее концентрации в растворе, приводят как к уменьшению, так и к росту плотности коррозионного тока. Максимальное ингибирующее влияние моногидрат лимонной кислоты оказывает при концентрации  $5 \cdot 10^{-4}$  М в растворе.

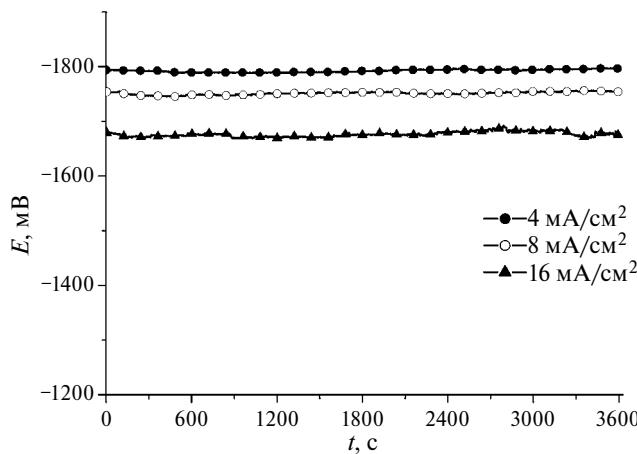
При большей и меньшей концентрации моногидрата лимонной кислоты, плотность коррозионного тока возрастает.

Ток коррозии алюминия, как видно из приведенных на рис. 2 данных, зависит от времени его нахождения в растворе. Эффективность действия ингибитора оценивали используя установившуюся величину тока коррозии. Эффективность ингибирования коррозии  $\eta$  рассчитывали, пользуясь соотношением  $\eta = [(i_{oc} - i_c) / i_{oc}] \cdot 100$ , где  $i_{oc}$  и  $i_c$  – токи коррозии в отсутствие ингибитора и при его нахождении в растворе соответственно. При концентрации моногидрата лимонной кислоты  $5 \cdot 10^{-4}$  М эффективность ингибирования, рассчитанная после шестичасовой выдержки алюминиевого образца в растворе, равна 58%. Установившееся значение плотности тока коррозии равно  $1.7 \text{ mA/cm}^2$ .

На рис. 3 приведены хронопотенциограммы гальваностатического разряда Al в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем добавки  $10^{-4}$  М  $Ga^{3+}$ ,  $10^{-3}$  М  $In^{3+}$  и  $5 \cdot 10^{-4}$  М моногидрата лимонной кислоты. Как показывает сравнение данных, приведенных на рис. 1 и 3, введение в раствор моногидрата лимонной кислоты в концентрации  $5 \cdot 10^{-4}$  М не ухудшает разрядные характеристики алюминиевого электрода. Так же как и в отсутствие ингибитора, кривые при плотности тока разряда вплоть  $16 \text{ mA/cm}^2$  демонстрируют стабильное плато разряда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Увеличение содержания воды в 2 М растворе KOH в этаноле, содержащем добавки соединений галлия и индия, с 4 до 10% приводит к четырехкратному увеличению достижимой величины плотности разрядного тока.



**Рис. 3.** Гальваностатические разрядные кривые на Al-электроде в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем 10<sup>-4</sup> М Ga<sup>3+</sup>, 10<sup>-3</sup> М In<sup>3+</sup> и 5·10<sup>-4</sup> М моногидрата лимонной кислоты, при различных величинах плотности тока.

2. Разрядные гальваностатические кривые в 2 М растворе KOH в 90%-ном этаноле, содержащем 10<sup>-4</sup> М Ga<sup>3+</sup> и 10<sup>-3</sup> М In<sup>3+</sup>, при величинах плотности тока вплоть до 16 МА/см<sup>2</sup> демонстрируют плато разряда.

3. Введение в указанный выше раствор моногидрата лимонной кислоты в концентрации 5·10<sup>-4</sup> М позволяет уменьшить плотность тока коррозии алюминия до 1.7 МА/см<sup>2</sup>. Эффективность ингибиции моногидрата лимонной кислоты составляет 58%.

4. Введение в раствор моногидрата лимонной кислоты позволяет уменьшить величину тока коррозии алюминия, без снижения скорости его анодного растворения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Тема Государственного задания “Физико-химия и технология материалов электрохимической и биоэнергетики” № 122011300058-3 № FFZS-2022-0016”.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Tommasi, D., *Traité des piles électriques, piles hydro-électriques-accumulateurs, piles thermo-électriques et pyro-électriques*, Carré, G., Ed, Paris, 1889, p. 185.

- Despic, A. and Parkhutik, V.P., *Electrochemistry of Aluminum in Aqueous Solutions and Physics of its Anodic Oxide*, in ‘Modern Aspects of Electrochemistry’. Conway, B.E., Bockris, J.O’M., and White, R.E., Eds, New York: Plenum Press, 1991, vol. 20, p. 401.
- Li, Q. and Bjerrum, N.J., Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review, *J. Power Sources*, 2002, vol. 110, p. 1.
- Скундин, А.М., Осетрова, Н.В. Использование алюминия в низкотемпературных источниках тока. *Электрохим. Энергетика*. 2005. Т. 5. № 1. С. 3. [Skundin, A.M. and Osetrova, N.V., The use of aluminum in low-temperature current sources, *Elektrokhim. Energet.*, 2005, vol. 5, no. 1, p. 3.]
- Levitin, G., Tel-Vered, R., Yarnitzky, C., and Licht, S., Organic solvents for anodic aluminum electrochemistry, *Rev. Anal. Chem.*, 1999, vol. 18, p. 269.
- Licht, S., Levitin, G., Yarnitzky, C., and Tel-Vered, R., Organic phase for aluminum batteries, *Electrochemical and solid-state letters*, 1999, vol. 2, no. 6, p. 262.
- Licht, S., Tel-Vered, R., Levitin, G., and Yarnitzky, C., Solution activators of aluminum electrochemistry in organic media, *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147, no. 2, p. 496.
- Tel-Vered, R., Levitin, G., Yarnitzky, C., and Licht, S., Analytical determination of In activation of aluminum anodes in the organic phase, *Rev. Anal. Chem.*, 1999, vol. 18, no. 5, p. 249.
- Licht, S., Levitin, G., Tel-Vered, R., and Yarnitzky, C., The effect of water on the anodic dissolution of aluminum in non-aqueous electrolytes, *Electrochim. Commun.*, 2000, vol. 2, p. 329.
- Гонтмахер, Н.М., Григорьев, В.П., Нечаева, О.Н., Беркман, Е.А., Гутерман, В.Е., Петрова, Г.М. Растворение Al и сплава Al-Mg-Hg в органических и водно-органических средах. *Электрохимия*. 1984. Т. 20. С. 80. [Gontmakher, N.M., Grigoriev, V.P., Nechaeva, O.N., Berkman, E.A., Guterman, V.E., and Petrova, G.M., Dissolution of aluminum and Al-Mg-Hg alloys in organic and aqueous-organic solvents, *Soviet Electrochemistry*, 1984, vol. 20, p. 76.]
- Shao, H.B., Wang, J.M., Wang, X.Y., Zhang, J.Q., and Cao, C.N., Anodic dissolution of aluminum in KOH ethanol solutions, *Electrochim. Commun.*, 2004, vol. 6, p. 6.
- Wang, J.B., Wang, J. M., Shao, H. B., Zhang, J. Q., and Cao, C.N., The corrosion and electrochemical behaviour of pure aluminium in alkaline methanol solutions, *J. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 37, p. 753.
- Chang, X., Wang, J., Shao, H., Wang, J., Zeng, X., Zhang, J., and Cao, C., Corrosion and anodic behaviours of pure aluminum in a novel alkaline electrolyte, *Acta Phys.-Chim. Sin.*, 2008, vol. 24(9), p. 1620.
- Wang, J.B., Wang, J.M., Shao, H.B., Chang, X.T., Wang, L., Zhang, J. Q., and Cao, C.N., The corrosion and electrochemical behavior of pure aluminum in additive-containing alkaline methanol-water mixed solutions, *Mater. and Corr.*, 2009, vol. 60, no. 4, p. 269.

15. Рыбалка, К.В., Бекетаева, Л.А. Влияние ионов  $\text{Ga}^{3+}$  и  $\text{In}^{3+}$  на анодное растворение Al в растворах KOH в этаноле. *Электрохимия*. 2023. Т. 59. С. 111. [Rybalka, K.V. and Beketaeva, L.A., Effect of  $\text{Ga}^{3+}$  and  $\text{In}^{3+}$  Ions on the Anodic Dissolution of Aluminum in KOH Ethanol Solutions, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 162.]
16. Рыбалка, К.В., Бекетаева, Л.А. Анодное растворение Al в растворах KOH в смешанном растворителе этанол/акetonитрил. *Электрохимия*. 2023. Т. 59. С. 867. [Rybalka, K.V. and Beketaeva, L.A., Anodic dissolution of Al in KOH solutions of in the mixed ethanol/acetonitrile solvent, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 1102.]
17. Nie, Y., Gao, J., Wang, E., Jiang, L., An, L., and Wang, X., An effective hybrid organic/inorganic inhibitor for alkaline aluminum-air fuel cells, *Electrochim. Acta*, 2017, vol. 248, p. 478.
18. Ma, C., Hu, C., Xu, X., Song, Y., Shao, M., Lin, J., and Jiang, Z., Inhibition Effect and Mechanism of  $\text{Na}_2\text{SnO}_3$ -Ethylene Glycol Hybrid Additives on 1060 Aluminum in Alkaline Aluminum-Air Batteries, *Chem. Select*, 2021, vol. 6, p. 1804. doi.org/10.1002/slct.202004844
19. Faegh, E., Shrestha, S., Zhao, X., and Mustain, W. E., In-depth structural understanding of zinc oxide addition to alkaline electrolytes to protect aluminum against corrosion and gassing, *J. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 49, p. 895.
20. Wang, X.Y., Wang, J.M., Wang Q. L., Shao, H.B., and Zhang, J.Q., The effects of polyethylene glycol (PEG) as an electrolyte additive on the corrosion behavior and electrochemical performances of pure aluminum in an alkaline zincate solution, *Mater. and Corr.*, 2011, vol. 62, no. 12, p. 1149.
21. Gelman, D., Lasman, I., Elfimchev, S., Stasovetsky, D., and Ein-Eli, Y., Aluminum corrosion mitigation in alkaline electrolytes containing hybrid inorganic/organic inhibitor system for power sources applications, *J. Power Sources*, 2015, vol. 285, p. 100.
22. Sarangapani, K.B., Balaramachandran, V., Kapali, V., Venkatakrishna Iyer, S., and Potdar, G., Aluminum as the anode in primary alkaline batteries, *Surface Technol.*, 1985, vol. 26, p. 67.
23. Shao, H.B., Wang, J.M., Zhang, Z., and Cao, C.N., The cooperative effect of calcium ions and tartrate ions on the corrosion inhibition of pure aluminum in an alkaline solution, *Mater. Chem. and Phys.*, 2002, vol. 77, p. 305.
24. Moghadam, Z., Shabani-Nooshabadi, M., and Behpour, M., Electrochemical performance of aluminium alloy in strong alkaline media by urea and thiourea as inhibitor for aluminium-air batteries, *J. Molec. Liquids*, 2017, vol. 242, p. 971. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.07.119
25. Wysocka, J., Cieslik, M., Krakowiak, S., and Ryl, J., Carboxylic acids as efficient corrosion inhibitors of aluminium alloys in alkaline media, *Electrochim. Acta*, 2018, vol. 289, p. 175.

## REFERENCES

1. Tommasi, D., *Traité des piles électriques, piles hydro-électriques-accumulateurs, piles thermo-électriques et pyro-électriques*, Carré, G., Ed, Paris, 1889, p. 185.
2. Despic, A. and Parkhutik, V.P., *Electrochemistry of Aluminum in Aqueous Solutions and Physics of its Anodic Oxide*, in 'Modern Aspects of Electrochemistry'. Conway, B.E., Bockris, J.O'M., and White, R.E., Eds, New York: Plenum Press, 1991, vol. 20, p. 401.
3. Li, Q. and Bjerrum, N.J., Aluminum as anode for energy storage and conversion: a review, *J. Power Sources*, 2002, vol. 110, p. 1.
4. Skundin, A.M. and Osetrova, N.V., The use of aluminum in low-temperature current sources, *Elektrokhim. Energet.*, 2005, vol. 5, no. 1, p. 3.
5. Levitin, G., Tel-Vered, R., Yarnitzky, C., and Licht, S., Organic solvents for anodic aluminum electrochemistry, *Rev. Anal. Chem.*, 1999, vol. 18, p. 269.
6. Licht, S., Levitin, G., Yarnitzky, C., and Tel-Vered, R., Organic phase for aluminum batteries, *Electrochemical and solid-state letters*, 1999, vol. 2, no. 6, p. 262.
7. Licht, S., Tel-Vered, R., Levitin, G., and Yarnitzky, C., Solution activators of aluminum electrochemistry in organic media, *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147, no. 2, p. 496.
8. Tel-Vered, R., Levitin, G., Yarnitzky, C., and Licht, S., Analytical determination of In activation of aluminum anodes in the organic phase, *Rev. Anal. Chem.*, 1999, vol. 18, no. 5, p. 249.
9. Licht, S., Levitin, G., Tel-Vered, R., and Yarnitzky, C., The effect of water on the anodic dissolution of aluminum in non-aqueous electrolytes, *Electrochim. Commun.*, 2000, vol. 2, p. 329.
10. Gontmakher, N.M., Grigoriev, V.P., Nechaeva, O.N., Berkman, E.A., Guterman, V.E., and Petrova, G.M., Dissolution of aluminum and Al-Mg-Hg alloys in organic and aqueous-organic solvents, *Soviet Electrochemistry*, 1984, vol. 20, p. 76.
11. Shao, H.B., Wang, J.M., Wang, X.Y., Zhang, J.Q., and Cao, C.N., Anodic dissolution of aluminum in KOH ethanol solutions, *Electrochim. Commun.*, 2004, vol. 6, p. 6.
12. Wang, J.B., Wang, J.M., Shao, H.B., Zhang, J.Q., and Cao, C.N., The corrosion and electrochemical behaviour of pure aluminium in alkaline methanol solutions, *J. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 37, p. 753.
13. Chang, X., Wang, J., Shao, H., Wang, J., Zeng, X., Zhang, J., and Cao, C., Corrosion and anodic behaviors of pure aluminum in a novel alkaline electrolyte, *Acta Phys.-Chim. Sin.*, 2008, vol. 24(9), p. 1620.
14. Wang, J.B., Wang, J.M., Shao, H.B., Chang, X.T., Wang, L., Zhang, J. Q., and Cao, C.N., The corrosion and electrochemical behavior of pure aluminum in additive-containing alkaline methanol–water mixed solutions, *Mater. and Corr.*, 2009, vol. 60, no. 4, p. 269.

15. Rybalka, K.V. and Beketaeva, L.A., Effect of Ga<sup>3+</sup> and In<sup>3+</sup> Ions on the Anodic Dissolution of Aluminum in KOH Ethanol Solutions, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 162.
16. Rybalka, K.V. and Beketaeva, L.A., Anodic dissolution of Al in KOH solutions of in the mixed ethanol/acetonitrile solvent, *Russ. J. Electrochem.*, 2023, vol. 59, p. 1102.
17. Nie, Y., Gao, J., Wang, E., Jiang, L., An, L., and Wang, X., An effective hybrid organic/inorganic inhibitor for alkaline aluminum-air fuel cells, *Electrochim. Acta*, 2017, vol. 248, p. 478.
18. Ma, C., Hu, C., Xu, X., Song, Y., Shao, M., Lin, J., and Jiang, Z., Inhibition Effect and Mechanism of Na<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub>-Ethylene Glycol Hybrid Additives on 1060 Aluminum in Alkaline Aluminum-Air Batteries, *Chem. Select*, 2021, vol. 6, p. 1804.  
doi.org/10.1002/slct.202004844
19. Faegh, E., Shrestha, S., Zhao, X., and Mustain, W. E., In-depth structural understanding of zinc oxide addition to alkaline electrolytes to protect aluminum against corrosion and gassing, *J. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 49, p. 895.
20. Wang, X.Y., Wang, J.M., Wang Q. L., Shao, H.B., and Zhang, J.Q., The effects of polyethylene glycol (PEG) as an electrolyte additive on the corrosion behavior and electrochemical performances of pure aluminum in an alkaline zincate solution, *Mater. and Corr.*, 2011, vol. 62, no. 12, p. 1149.
21. Gelman, D., Lasman, I., Elfimchev, S., Starosvetsky, D., and Ein-Eli, Y., Aluminum corrosion mitigation in alkaline electrolytes containing hybrid inorganic/organic inhibitor system for power sources applications, *J. Power Sources*, 2015, vol. 285, p. 100.
22. Sarangapani, K.B., Balaramachandran, V., Kapali, V., Venkatakrishna Iyer, S., and Potdar, G., Aluminium as the anode in primary alkaline batteries, *Surface Technol.*, 1985, vol. 26, p. 67.
23. Shao, H.B., Wang, J.M., Zhang, Z., and Cao, C.N., The cooperative effect of calcium ions and tartrate ions on the corrosion inhibition of pure aluminum in an alkaline solution, *Mater. Chem. and Phys.*, 2002, vol. 77, p. 305.
24. Moghadam, Z., Shabani-Nooshabadi, M., and Behpour, M., Electrochemical performance of aluminium alloy in strong alkaline media by urea and thiourea as inhibitor for aluminium-air batteries, *J. Molec. Liquids*, 2017, vol. 242, p. 971.  
DOI: 10.1016/j.molliq.2017.07.119
25. Wysocka, J., Cieslik, M., Krakowiak, S., and Ryl, J., Carboxylic acids as efficient corrosion inhibitors of aluminium alloys in alkaline media, *Electrochim. Acta*, 2018, vol. 289, p. 175.