

УДК 541.138.2

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ Ga^{3+} И In^{3+} НА АНОДНОЕ РАСТВОРЕНИЕ АЛ В РАСТВОРАХ КОН В ЭТАНОЛЕ

© 2023 г. К. В. Рыбалка^а*, Л. А. Бекетаева^а

^аИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский просп., 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

*e-mail: tamaison2000@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 11.08.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Рассмотрен процесс анодного растворения Al в растворах КОН в этаноле. Показано, что добавки соединений галлия и индия в 2 М раствор КОН в 96% этанола приводят к резкому увеличению тока анодного растворения Al вблизи потенциала разомкнутой цепи и его сдвигу на 300 мВ в сторону отрицательных значений. Разрядные гальваностатические кривые в растворах с добавками соединений галлия и индия демонстрируют плоское плато разряда при величинах плотности тока вплоть до 4 мА/см^2 . Измерена скорость выделения водорода в ряде растворов КОН в этаноле.

Ключевые слова: алюминий, КОН, этанол, галлий, индий, активация

DOI: 10.31857/S0424857023020093, **EDN:** NGEFCD

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий занимает первое место среди металлов по распространенности в земной коре. Объемная удельная емкость алюминия в качестве анодного материала (8.04 мА ч/см^3) значительно превышает аналогичную величину для лития (2.06 мА ч/см^3) и других используемых в источниках тока анодных материалов. В связи с этим, а также ввиду значительно большей безопасности использования алюминия по сравнению с литием, он представляется чрезвычайно перспективным анодным материалом для создания эффективных источников тока с неводным электролитом. Использование алюминиевого анода в водных электролитах осложняется активным выделением водорода, что обусловлено величиной стандартного потенциала алюминия (-1.66 В).

Несмотря на важность этой проблемы, в литературе содержится небольшое количество посвященных ей публикаций. В работе Матсуды (Matsuda) и др. [1] были рассмотрены особенности анодной поляризации алюминия в растворе AlCl_3 в ряде органических растворителей. В [1] было показано, что максимальная плотность анодного тока достигалась при использовании в качестве растворителя нитрометана и ацетонитрила, минимальная – в тетрагидрофуране. В [2] проведено сравнительное исследование анодного поведения Al и сплава Al–Mg–Hg в ряде неводных растворов, включая растворы на основе метанола. Изучено влияние концентрации LiCl и LiClO_4 , а также добавок воды на растворение Al и его сплава. Авторы пришли к выводу, что перспективной си-

стемой для создания источников тока с анодом из Al–Mg–Hg-сплава является система на основе растворов LiClO_4 в формамиде. Легирование алюминия индием, галлием, оловом приводит к уменьшению негативного влияния оксидных пленок на электроде. Стационарный потенциал при этом смещается на 400–600 мВ в отрицательную сторону [3]. Электрохимическое поведение алюминия в неводных растворах было подробно исследовано в работах Бэя (Bai) и Конвэя (Conway) [4, 5]. В [4] потенциодинамическим методом и методом измерения импеданса была рассмотрена кинетика анодного растворения Al в растворе AlCl_3 в безводном ацетонитриле. Перед началом измерений авторы обновляли поверхность вращающегося дискового электрода в рабочем растворе агатовым резцом. В момент обновления потенциал электрода скачкообразно изменялся от -0.63 до -1.15 В относительно хлоридсеребряного электрода сравнения в рабочем электролите. Затем, после обновления, потенциал в течение нескольких секунд спадал до величины -0.66 В . Таким образом, в [4] было показано, что даже при очень малом содержании воды в электролите ($<1 \text{ ppm}$) поверхность обновленного электрода быстро покрывается тонкой пассивирующей оксидной пленкой. В [5] было рассмотрено анодное поведение Al и его сплавов – Al–Sn, Al–Ga и Al–In в растворах AlCl_3 , $(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{NCl}$, LiBr и LiClO_4 в ацетонитриле и пропиленкарбонате. Особое внимание было уделено исследованию Al–In-сплава в 1 М растворе AlCl_3 в ацетонитриле. Авторами [5] было показано, что на Al–In-сплаве, содержащем

небольшой процент индия, удается достичь высокой скорости анодного растворения алюминия в отсутствие эффекта пассивации электрода. Анодное растворение Al не было осложнено одновременным выделением водорода, как это имеет место в водных растворах. Стационарный потенциал при этом достигал величины -1.0 В относительно Ag/AgCl-электрода сравнения, размещенного непосредственно в рабочем растворе. По мнению авторов [5], раствор AlCl_3 в ацетонитриле может представлять интерес для разработки источников тока с Al-анодом в неводной среде. Анодное растворение Al в 1 М растворе LiAlCl_4 в пропиленкарбонате и в 1 М растворе LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната и диметоксиэтана изучено в [6]. Предварительная химическая обработка алюминиевого электрода позволила получить стабильные разрядные кривые в растворе LiClO_4 при токе разряда 1 mA/cm^2 в течение 100 ч. Потенциал Al составлял -1.17 В относительно Ag/AgCl-электрода сравнения.

В [7] рассмотрено электрохимическое поведение Al в растворах КОН в этаноле, содержащем добавки воды. Показано, что увеличение концентрации КОН приводит к росту скорости анодного растворения. Вместе с тем рост концентрации КОН приводит к сдвигу потенциала разомкнутой цепи Al-электрода в сторону отрицательных значений. Одновременно авторами [7] весовым методом была определена скорость коррозии Al в изученных растворах.

В [8] исследовано поведение Al в кислых растворах NaCl в диапазоне pH от 1 до 4 . Зависимость фарадеевской эффективности растворения Al от pH определяли при фиксированных значениях потенциала. Было показано, что одновременное введение в электролит добавок InCl_3 и ZnCl_2 даже при очень низкой концентрации индия (0.0005 М) приводит к смещению поляризационных кривых примерно на 300 мВ в сторону отрицательных значений потенциала. Введение ионов In^{3+} и Zn^{2+} приводит к значительному увеличению тока анодного растворения. Добавленные ионы In^{3+} и Zn^{2+} также повышают фарадеевскую эффективность растворения алюминия. Авторы [8] объяснили эти результаты синергическим эффектом добавок. Было показано, что эти добавки инкорпорированы в поверхностный слой алюминиевого анода с образованием сплава. Позднее в [9] наряду с влиянием In^{3+} дополнительно рассмотрено действие катионов Hg^{2+} , Ga^{3+} и Sn^{2+} на электрохимическое поведение алюминия в подкисленном (pH 2) 2 М растворе NaCl. Добавка HgCl_2 в электролит уже в концентрации 10^{-4} М приводит к сдвигу поляризационной кривой на 0.6 В в сторону отрицательных потенциалов. Растворение Al начинается при потенциале -1.5 В относительно насыщенного каломельного электрода. Кроме того, добавка

HgCl_2 приводит к увеличению перенапряжения водорода на электроде.

В упомянутых выше работах, выполненных в водных растворах, было установлено, что введением различных добавок в электролит удается существенно увеличить электрохимическую активность алюминиевого анода. В большинстве органических электролитов алюминий пассивен. Даже в тех электролитах, которые с успехом используются в литиевых источниках тока, Al не может быть использован из-за своей пассивности. В 1 М растворе LiClO_4 во всех изученных в [10] растворителях (пропиленкарбонат, ацетонитрил, диметоксиэтан и γ -бутиролактон) алюминий демонстрировал сильно выраженную пассивность. Ранее в [5] отмечалось, что ион ClO_4^{1-} может взаимодействовать с алюминием с образованием оксидной пленки, препятствующей его активному растворению. В [10–12] было установлено, что в двух электролитах — AlCl_3 в γ -бутиролактоне и $(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{NCl}$ в ацетонитриле — Al вызывает достаточно высокую электрохимическую активность. Введение в электролит Hg^{2+} и In^{3+} сдвигает стационарный потенциал Al на 150 , 250 мВ в сторону отрицательных значений и позволяет существенно увеличить электрохимическую активность алюминия.

В [13, 14] подробно исследовано влияние содержания воды в апротонном электролите на электрохимическое поведение Al-анода. Установлено, что в растворе AlCl_3 в γ -бутиролактоне и в растворе $(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{NCl}$ в ацетонитриле введение воды оказывает противоположное действие. В растворе AlCl_3 в γ -бутиролактоне введение воды от 0 до 3% (по объему) приводит к росту поляризационного сопротивления от 100 до 400 Ом см^2 и уменьшению скорости окисления алюминия. В 0.3 М растворе $(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{NCl}$ в ацетонитриле введение воды, напротив, увеличивает активность алюминия.

Электрохимическое поведение Al зависит не только от применяемого электролита, но в значительной мере и от предварительной обработки его поверхности. В [4] перед опытом поверхность дискового вращающегося электрода полировали шлифовальной бумагой и оксидом алюминия с последующим обезжириванием ацетоном и промывкой растворителем — ацетонитрилом. После этого поверхность электрода обновляли в измерительной ячейке соскабливанием поверхностного слоя расположенным в ячейке агатовым резцом в течение всего времени проведения эксперимента. В [5] поверхность электрода обновляли, срезая тонкий слой металла алмазной пилкой. В [11, 15] электрод обрабатывали 10 М раствором КОН, отмывали водой, сушили, полировали алмазным надфилем и обезжиривали ацетоном. Перед регистрацией разрядных кривых на Al-элек-

троде было проведено несколько циклов вольт-амперометрии в рабочем электролите.

Вышеупомянутые методы предварительной обработки позволяют сместить потенциал алюминия в сторону отрицательных значений и увеличить токи его окисления. Однако столь сложная предварительная обработка электродов затрудняет практическое использование алюминия в качестве анода в источниках тока.

В настоящем исследовании активацию алюминия проводили непосредственно в рабочем растворе, не прибегая к процедуре предварительной обработки его поверхности. Нами рассмотрены возможности повышения разрядных характеристик Al -электрода в растворах KOH в этаноле за счет использования различных активирующих добавок в электролит.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Al -электроды получали из алюминиевого листа чистоты 99.999%. Гладкие листы толщиной 0.5 мм разрезали на прямоугольники 5×10 мм с отводом для электрического контакта. Электрод был закреплен в тefлоновом держателе. Измерения проводили в небольшой (15 см^3) стеклянной трехэлектродной ячейке при температуре 25°C . Температуру в ячейке поддерживали с помощью термостата U-1. Электродом сравнения служил хлоридсеребряный электрод. Вспомогательный электрод был выполнен из платины. Поверхность Al -электрода перед измерением обрабатывали наждачной бумагой зернистости Р 400 и обезжиривали этиловым спиртом. Все измерения проводили после предварительной выдержки Al -электрода в рабочем растворе в течение 1 ч. Растворы электролитов получали с использованием химически чистых и особо чистых реагентов. В качестве растворителя использовали абсолютный этанол, содержание воды не превышало 0.2%.

Линейную вольтамперометрию, потенциостатические и гальваностатические измерения проводили с использованием потенциостата IPC2000 Pro (EKONIKS, Россия). Потенциодинамические кривые регистрировали при скорости развертки потенциала 1 мВ/с в направлении от потенциала разомкнутой цепи электрода в сторону положительных значений.

При выборе оптимального состава электролита имеет значение не только величина электродного потенциала алюминия при разомкнутой цепи и его активность при анодном растворении, но и скорость газовой выделения. Мы использовали традиционный метод измерения скорости выделения газа в рабочем электролите. Небольшой образец алюминиевого листа, используемого нами для изготовления электродов, помещали в сосуд с исследуемым раствором. Выделяющийся на алюминиевом образце газ поступал в перевернутую вверх дном бюретку, заполненную водой, для из-

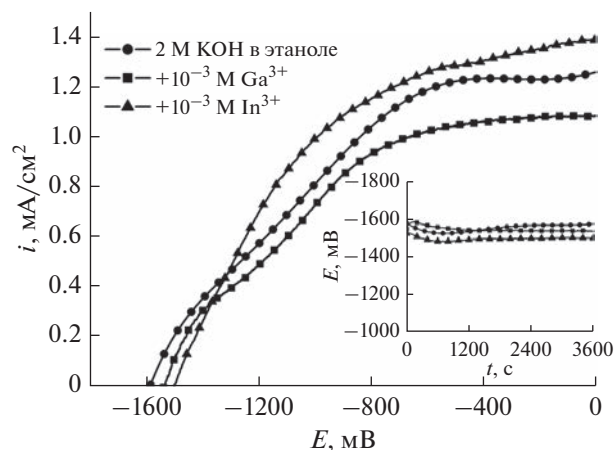


Рис. 1. Зависимость тока анодного растворения Al от потенциала в 2 М растворе KOH в чистом этаноле и с добавками нитрата галлия и индия. Скорость развертки потенциала 1 мВ/с. На врезке приведены зависимости ПРЦ Al -электрода от времени нахождения в растворе до начала регистрации поляризационных кривых.

мерения выделившегося газа по объему вытесненной воды. Объем выделившегося газа за каждый промежуток времени приводили к нормальным условиям, применяя соотношение $V = V_m \times \frac{273(P - P_w)}{(760 \times (273 + t))}$. 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 в $^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе все исследования проведены в спиртовых растворах гидроксида калия. Известно, что OH^- -ионы ускоряют растворение алюминия в водных растворах [16]. Вместе с тем одновременно имеет место активное выделение водорода на алюминиевом электроде. Последнее обстоятельство существенно ограничивает возможности практического применения алюминия в источниках тока. Спиртовые растворы были нами выбраны с целью уменьшения газовой выделения на алюминиевом аноде.

На рис. 1 представлены потенциодинамические кривые анодного растворения алюминия в 2 М растворе KOH в этаноле: без добавок в электролит и с добавками $0.001 \text{ M Ga}(\text{NO}_3)_3$ и $0.001 \text{ M In}(\text{NO}_3)_3$. Перед началом регистрации этих кривых электрод выдерживали в течение 1 ч в рабочем электролите. Соответствующие зависимости потенциала разомкнутой цепи (ПРЦ) от времени приведены на врезке рис. 1. Как следует из рис. 1, добавки соединений галлия и индия в раствор мало влияют на величину ПРЦ Al -электрода и тока его растворения. Добавки ионов галлия приводят к некоторому снижению активности Al . В присутствии ионов индия она немного возрастает. Обе добавки приводят к небольшому сдвигу по-

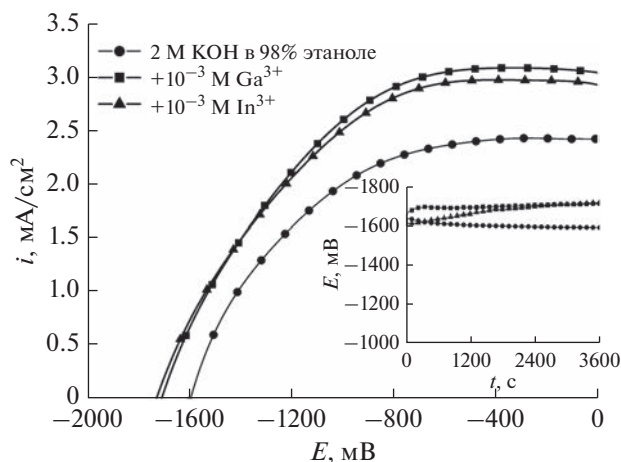


Рис. 2. Зависимость тока анодного растворения Al от потенциала в 2 М растворе КОН в 98%-ном этаноле без добавок и с добавками нитрата галлия и индия. Скорость развертки потенциала 1 мВ/с. На врезке приведены зависимости ПРЦ Al-электрода от времени нахождения в растворе до начала регистрации поляризационных кривых.

тенциала разомкнутой цепи Al в сторону положительных значений.

Как видно из результатов, представленных на рис. 1, в растворе КОН в абсолютном этаноле не удается достичь существенной скорости растворения алюминия при его анодной поляризации. Токи анодного растворения даже при значительном смещении потенциала в сторону положительных значений не превышают 1.4 мА/см². Следует также отметить большие величины поляризационного сопротивления для всех трех кривых, представленных на рисунке. В отсутствие добавок поляризационное сопротивление равно 385 Ом см², при введении ионов Ga³⁺ и In³⁺ величины поляризационного сопротивления составляют 243 и 312 Ом см² соответственно.

Введение в раствор небольшого количества воды (2%) приводит к двукратному увеличению анодного тока, но не изменяет величину потенциала разомкнутой цепи. Добавка ионов Ga³⁺ и In³⁺ смещает потенциал разомкнутой цепи электрода на 130 мВ в сторону отрицательных значений (рис. 2) и увеличивает ток анодного растворения алюминия. Поляризационное сопротивление в этом растворе существенно снижается. В отсутствие добавок Ga³⁺ и In³⁺ оно равно 123 Ом см². Введение в раствор ионов Ga³⁺ и In³⁺ в концентрации 10⁻³ М приводит к его увеличению до 141 и 168 Ом см² соответственно.

Увеличение количества введенной в раствор воды до 4% приводит к дальнейшему росту электрохимической активности алюминиевого электрода. На рис. 3 приведены поляризационные кривые анодного растворения Al в 2 М растворах КОН в 96%-ном этаноле. Введение ионов Ga³⁺

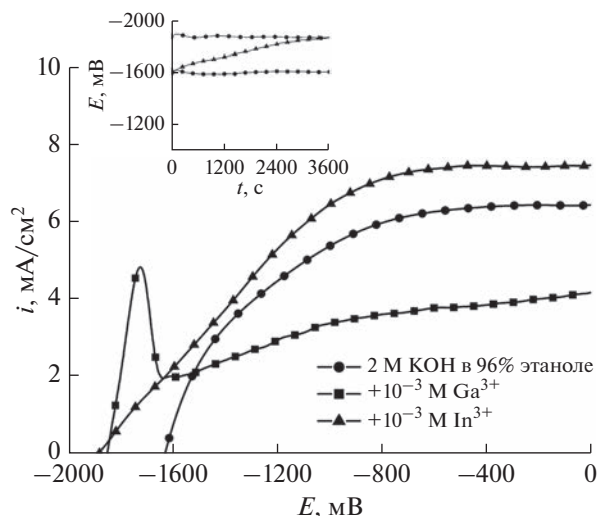


Рис. 3. Зависимость тока анодного растворения Al от потенциала в 2 М растворе КОН в 96%-ном этаноле без добавок и с добавками нитрата галлия и индия. Скорость развертки потенциала 1 мВ/с. На врезке приведены зависимости ПРЦ Al-электрода от времени нахождения в растворе до начала регистрации поляризационных кривых.

приводит к изменению характера поляризационных кривых. Резко возрастает ток анодного растворения Al вблизи ПРЦ. На поляризационной кривой появляется хорошо выраженный максимум, обусловленный пассивацией алюминия, ограничивающей дальнейший рост тока. Наблюдается снижение поляризационного сопротивления. Оно уменьшается от 40 Ом см² в отсутствие добавок до 22 Ом см² в присутствии ионов Ga³⁺. Как следует из рис. 3, введение в электролит ионов Ga³⁺ приводит к сдвигу потенциала разомкнутой цепи Al на 220 мВ в сторону отрицательных значений. В [17] было показано, что при значительной катодной поляризации Al в водных галоидных растворах (–2.0 В относительно насыщенного каломельного электрода), содержащих ионы галлия, удается нанести галлий на поверхность электрода. Это достигается, по мнению авторов, за счет процесса подщелачивания, который способствует образованию гидролизированных разновидностей галлия и его осаждению на поверхности алюминия. Как следует из врезки на рис. 3, Al-электрод при погружении в 2 М раствор КОН в 96%-ном этаноле в присутствии ионов Ga³⁺ сразу же достигает достаточно высоких отрицательных значений потенциала в отсутствие внешней поляризации. Это вызвано, по-видимому, осаждением галлия на поверхности электрода. В отсутствие добавок воды, как показано на рис. 1, введение ионов Ga³⁺ практически не влияет на величину потенциала разомкнутой цепи.

Добавки ионов In³⁺ смещают потенциал разомкнутой цепи алюминиевого электрода на 260 мВ в

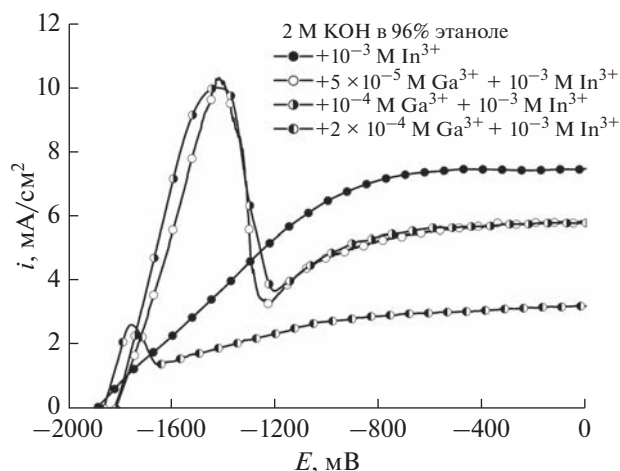


Рис. 4. Зависимость тока анодного растворения Al от потенциала в 2 М растворе KOH в 96%-ном этаноле с добавками нитрата галлия и индия. Скорость разрядки потенциала 1 мВ/с.

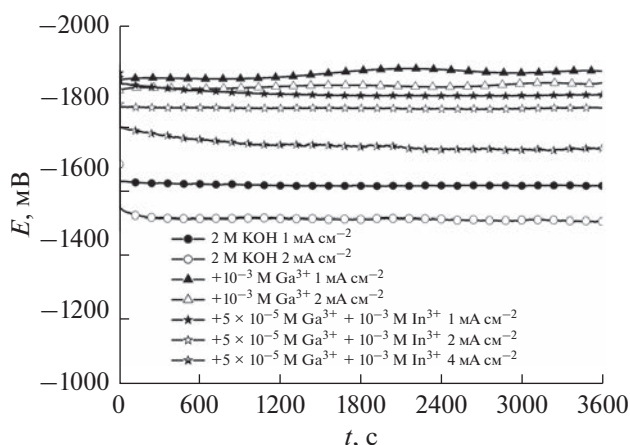


Рис. 5. Гальваностатические разрядные кривые на Al -электрод в 2 М растворе KOH в 96%-ном этаноле без добавок и с добавками $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$.

сторону отрицательных значений. Вместе с тем их введение приводит к росту поляризационного сопротивления от 40 до 115 Ом cm^2 , что обуславливает медленный рост тока растворения Al при его анодной поляризации.

Введение в раствор совместно с ионами In^{3+} ионов Ga^{3+} приводит к существенному изменению характера поляризационных кривых (рис. 4). Величина поляризационного сопротивления при этом снижается от 115 Ом cm^2 для добавки 10^{-3} М In^{3+} до 32–44 Ом cm^2 в зависимости от концентрации введенных ионов Ga^{3+} . Следует отметить, что для такого воздействия достаточно введения в раствор чрезвычайно малых (вплоть до 10^{-5} М) концентраций ионов Ga^{3+} .

На рис. 5 и 6 представлены кривые гальваностатического разряда, полученные на алюминиевом электроде в исследованных нами растворах. Все использованные добавки приводят к смеще-

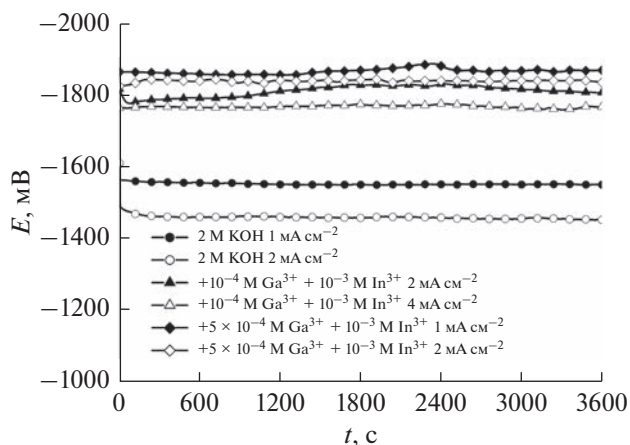


Рис. 6. Гальваностатические разрядные кривые на Al -электрод в 2 М растворе KOH в 96%-ном этаноле без добавок и с добавками $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{In}(\text{NO}_3)_3$.

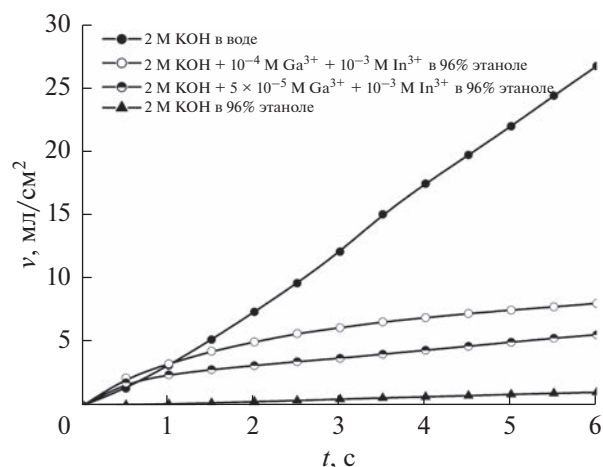


Рис. 7. Зависимости объема водорода, выделяющегося на Al -электрод от времени его нахождения в растворе.

нию разрядных кривых на 200–300 мВ в сторону отрицательных значений потенциала. В присутствии ионов Ga^{3+} и In^{3+} в растворе разрядные кривые демонстрируют плоское плато разряда вплоть до плотности тока 4 mA/cm^2 .

На рис. 7 представлены зависимости объема водорода, выделяющегося на алюминии, от времени его нахождения в ряде использованных нами растворов. Для сравнения приведены результаты в водном растворе. Минимальная скорость выделения водорода наблюдается в 2 М растворе KOH в 96%-ном этаноле в отсутствие добавок. Она оказалась в 26 раз меньше скорости выделения водорода в водном растворе, составляя 0.17 $\text{мл ч}^{-1} \text{cm}^{-2}$. Добавки ионов Ga^{3+} и In^{3+} приводят к ее увеличению. В растворе, содержащем добавки 5×10^{-5} М Ga^{3+} + 10^{-3} М In^{3+} , водород выделяется со скоростью 0.9 $\text{мл ч}^{-1} \text{cm}^{-2}$. Увеличение концентрации ионов Ga^{3+} в 2 раза увеличивает скорость до 1.3 $\text{мл ч}^{-1} \text{cm}^{-2}$.

Для оценки возможного использования алюминия в качестве анода в источниках тока в рассмотренных выше электролитах были проведены измерения на макете источника тока. Макет включал Al-анод в виде диска и MnO_2 -катод таких же размеров. Катодная активная масса состояла из 85% MnO_2 , 10% ацетиленовой сажи и 5% политетрафторэтилена. Измерения были проведены в 2 М растворе КОН в 96%-ном этаноле, содержащем добавки ионов галлия и индия в концентрации 5×10^{-5} и 10^{-3} М соответственно. Напряжение разомкнутой цепи системы Al/ MnO_2 в указанном выше растворе составляет 1.8 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Введение соединений галлия и индия в раствор КОН в этаноле, не содержащем добавок воды, практически не влияет на электрохимическое поведение Al. Активирующее влияние $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{In}(\text{NO}_3)_3$ проявляется лишь в присутствии добавок воды в растворе.

2. Введение в раствор добавок $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{In}(\text{NO}_3)_3$ приводит к резкому увеличению анодного тока вблизи потенциала разомкнутой цепи в растворе КОН в 96%-ном этаноле. Активирующий эффект зависит от концентрации этих добавок в растворе. Активирующее воздействие ионов галлия наиболее эффективно при их содержании в растворе в пределах 10^{-5} – 10^{-4} М. Рост тока ограничивается пассивацией электрода уже на удалении (~400 мВ) от потенциала разомкнутой цепи.

3. Разрядные гальваностатические кривые в растворах КОН в 96%-ном этаноле с добавками соединений галлия и индия при величинах плотности тока вплоть до 4 мА/см² демонстрирует плоское плато разряда.

4. Скорость выделения водорода на Al в 2 М растворе КОН в 96%-ном этаноле в 26 раз меньше, чем в водном растворе КОН той же концентрации. Добавки соединений галлия и индия приводят к увеличению скорости выделения водорода, зависящему от концентрации добавок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsuda, Y., Ouchi, Y., and Tamura, H., Anodic polarization of aluminium in organic electrolytes, *J. Appl. Electrochem.*, 1974, vol. 4, p. 53.
2. Гонтмахер, Н.М., Григорьев, В.П., Нечаева, О.Н., Беркман, Е.А., Гутерман, В.Е., Петрова, Г.М. Рас-

творение Al и сплава Al–Mg–Hg в органических и водноорганических 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, *Sov. Electrochem.*, 1984, vol. 20, p. 76.]

3. Скундин, А.М., Осетрова, Н.В. Использование алюминия в низкотемпературных источниках тока. *Электрохим. кинетика*. 2005. Т. 5. № 1 С. 3. [Skundin, A.M., and Osetrova, N.V., The use of aluminum in low-temperature current sources, *Electrochemical kinetics*, 2005, vol. 5, no. 1, p. 3.]
4. Bai, L. and Conway, B.E., Complex behavior of Al dissolution in non-aqueous medium as revealed by impedance spectroscopy, *J. Electrochem. Soc.*, 1990, vol. 137, no. 12, p. 3737.
5. Bai, L. and Conway, B.E., Role of indium in promoting anodic dissolution of Al–In alloys in non-aqueous electrolyte, *J. Appl. Electrochem.*, 1992, vol. 22, p. 131.
6. Rybalka, K.V. and Beketaeva, L.A., Anodic dissolution of aluminium in nonaqueous electrolytes, *J. Power Sources*, 1993, vol. 42, p. 377.
7. Shao, H.B., Wang, J.M., Wang, X.Y., Zhang, J.O., and Cao, C.N., Anodic dissolution of aluminum in KOH ethanol solutions, *Electrochem. Comm.*, 2004, vol. 6, p. 6.
8. Burri, G., Luedi, W., and Haas, O., Electrochemical properties of aluminum in weakly acidic sodium chloride solutions, Part I. Influence of the electrolyte additives In^{3+} , and Zn^{2+} , *J. Electrochem. Soc.*, 1989, vol. 136, no. 8, p. 2167.
9. Equey, J.F., Müller, S., Desilvestro, J., and Haas, O., Electrochemical properties of aluminum in weakly acidic sodium chloride solutions. II. Influence of electrolyte additives Hg^{2+} , In^{3+} , Ga^{3+} and Sn^{3+} , *J. Electrochem. Soc.*, 1992, vol. 139, no. 6, p. 1499.
10. Levitin, G., Tel-Vered, R., Yarnitzky, C., and Licht, S., Organic solvents for anodic aluminum electrochemistry, *Rev. Anal. Chem.*, 1999, vol. 18, p. 269.
11. Licht, S., Tel-Vered, R., Levitin, G., and Yarnitzky, C., Solution activators of aluminum electrochemistry in organic media, *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147, p. 496.
12. 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.
13. Licht, S., Levitin, G., Tel-Vered, R., and Yarnitzky, C., The effect of water on the anodic dissolution of aluminum in non-aqueous electrolytes, *Electrochem. Commun.*, 2000, vol. 2, p. 329.
14. Levitin, G., Tel-Vered, R., Yarnitzky, C., and Licht, S., Analytical determination of water effects on the anodic dissolution of aluminum in nonaqueous electrolytes, *Rev. Anal. Chem.*, 2000, vol. 19, p. 235.
15. Licht, S., Levitin, G., Yarnitzky, C., and Tel-Vered, R., Organic phase for aluminum batteries, *Electrochemical and solid-state letters*, 1999, vol. 2, p. 262.
16. 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, N.Y.: Plenum Press, 1991, vol. 20, p. 401.
17. Breslin, C.B. and Carroll, W.M., The Electrochemical behavior of aluminum activated by Gallium in Aqueous Electrolytes, *Corros. Sci.*, 1992, vol. 33, p. 1735.