

УДК 620.193.013:544.65

И. О. Григорьева, А. Ф. Дресвянников, Г. Т. Ахмадишина

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ И СОСТАВА СОЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЯ

Ключевые слова: алюминий, электрохимическое поведение, анодная поляризация, потенциодинамический метод, ток и потенциал коррозии, наноразмерные частицы.

Потенциодинамическим методом исследован процесс анодной поляризации алюминия (99,5%) в нейтральных солевых электролитах в широком диапазоне концентраций (10^{-5} -1,0 моль/л), отличающихся анионным составом. Изучено влияние природы и состава электролита на электрохимические и коррозионные характеристики алюминиевого электрода.

Keywords: aluminium, electrochemical behavior, anodic polarization, potentiodynamic method, corrosion current and potential, nanosized particles.

The process of anodic polarization of aluminium (99,5%) in neutral saline electrolytes of wide interval of concentration (10^{-5} -1,0 mol/l) and different anion's composition with using potentiodynamic method has been investigated. The influence of nature and composition of the electrolyte on the electrochemical and corrosion characteristics of aluminium electrode has been also studied.

Введение

Алюминий является весьма перспективным анодным материалом в электрохимической технологии синтеза его оксо-гидроксосоединений [1], а также при разработке химических источников тока [2-5]. В связи с этим анодное поведение алюминия в водных растворах электролитов, особенно в нейтральных солевых средах, является предметом интенсивного и пристального изучения [6-15].

В виду сложности и специфических особенностей анодных процессов на алюминии в водных растворах электролитов [16-18], механизм и кинетика этих процессов при анодной поляризации, остается до конца не изученным. Вследствие этого, не смотря на широкий спектр исследований, экспериментальные данные по анодному и коррозионному поведению алюминия трактуются разными авторами не всегда однозначно. Кроме того, требует дополнительного и детального раскрытия вопрос о специфической физико-химической природе влияния анионов электролита на состав защитных поверхностных слоев на алюминии и механизм инициирования и ингибирования локальной коррозии.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей протекания процесса анодного растворения алюминия в нейтральных солевых электролитах в широком диапазоне концентраций (10^{-5} – 1,0 моль/л), отличающихся анионным составом. В ходе работы получены экспериментальные результаты, отражающие влияние анионного состава электролитов на параметры анодной поляризации и коррозионные характеристики алюминиевого электрода. Полученные данные представляют несомненный интерес для установления оптимальных режимов ионизации, при которых поверхность алюминиевого анода поддерживается в устойчивом активном состоянии (при минимальной коррозии металла) и имеет место максимальный выход продуктов растворения материала электрода. Вследст-

вие этого, полученные экспериментальные результаты могут быть полезны при разработке эффективных технологий электрохимического синтеза оксо-гидроксосоединений алюминия (продуктов его анодного растворения), являющихся в ряде случаев наноразмерными прекурсорами керамических материалов и керметов различного назначения.

Экспериментальная часть

Поляризационные измерения проводили в потенциодинамическом режиме со скоростью смещения потенциала 2 мВ/с при полном погружении плоских (1,5x4,5 см) образцов из алюминия А5 (99,5%) с рабочей поверхностью 1 см² (остальную поверхность изолировали коррозионно-стойкой эмалью ЭП-773) в естественно аэрируемый солевой раствор. Электрохимические измерения, а также подготовку рабочего электрода проводили согласно стандартным методикам, изложенным в работах [19-20].

Результаты и их обсуждение

В предыдущей работе [21] при исследовании электрохимического поведения алюминия в качестве водных сред были использованы растворы солей калия с различным анионным составом (K₂SO₄, KNO₃, KCl). Было показано [21], что на процесс инициирования и ингибирования локальной (питтинговой) коррозии на поверхности алюминиевого электрода в условиях анодной поляризации существенное влияние оказывает природа аниона раствора и его концентрация. В настоящем исследовании получены новые экспериментальные данные по влиянию анионного состава солевого раствора на характеристики электрода. В качестве объектов были выбраны водные растворы солей натрия (NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, Na₂HPO₄).

Поляризационные кривые, снятые на алюминиевом электроде в исследуемых растворах солей

(рис.1), наглядно демонстрируют влияние анионного состава раствора и его концентрации на электрохимические характеристики электрода – параметры анодной и катодной поляризации, величину равновесного (коррозионного) потенциала. Так, скорость анодной реакции в диапазоне концентраций 10^{-3} -1,0 моль/л уменьшается в ряду $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NaNO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{HPO}_4$; в более разбавленных растворах (в условиях эксперимента - 10^{-5} - 10^{-4} моль/л) наблюдается другая тенденция: $\text{NaNO}_3 \rightarrow \text{NaCl} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{HPO}_4$ (рис.1). При увеличении содержания соли происходит сближение значений анодного тока в растворах Na_2SO_4 , NaNO_3 , Na_2HPO_4 и все большее его увеличение в растворах NaCl (рис.1).

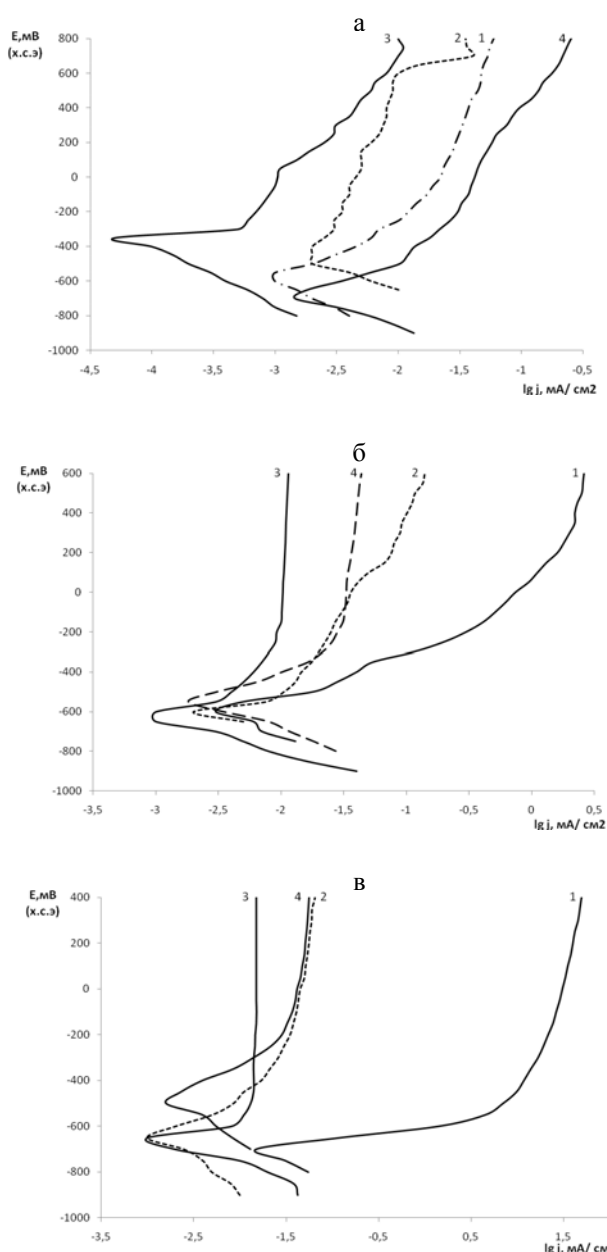


Рис. 1 – Потенциодинамические анодные и катодные поляризационные кривые алюминия А5 (99,5%) в растворах солей: 1 – NaCl ; 2 – Na_2SO_4 ; 3 – Na_2HPO_4 ; 4 – NaNO_3 . Концентрация растворов, моль/л: а – 10^{-5} ; б – 10^{-3} ; в – 10^{-1}

Кинетика катодного процесса, в отличие от

анодного, гораздо в меньшей степени зависит от анионного состава раствора, особенно в наиболее концентрированных ($\square 10^{-2}$ моль/л) средах (рис.1). Но можно отметить, что наименьшие значения плотности катодного тока в диапазоне концентраций 10^{-5} - 10^{-2} моль/л наблюдаются в растворе Na_2HPO_4 (кривая 3 на рис.1).

На основании поляризационных кривых методом экстраполяции тафелевских участков были рассчитаны наклоны анодной и катодной реакции – коэффициенты β_a и β_k (табл. 1). Полученные результаты (табл.) показывают, что с увеличением содержания соли тафелевский наклон анодной кривой (коэффициент β_a) в исследуемых электролитах изменяется по-разному: например, уменьшается в растворах хлорида и сульфата натрия, особенно значительно в диапазоне концентраций 10^{-5} - 10^{-3} моль/л; а в нитрат- и фосфатсодержащих растворах наблюдается более сложная зависимость, проходящая через максимум. Наклон катодной реакции (коэффициент β_k) с увеличением концентрации раствора в целом уменьшается, хотя и проходит через локальные максимумы; исключение составляет наклон катодной реакции в NaNO_3 – β_k уменьшается в диапазоне концентраций 10^{-5} - 10^{-2} моль/л, при дальнейшем увеличении содержания соли этот показатель возрастает (табл. 1).

Также можно отметить, что наибольшие значения коэффициентов β_a и β_k в диапазоне концентраций (10^{-3} -1,0 моль/л) зафиксированы в растворах нитрата натрия (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные данные (на основании поляризационных измерений)

Состав раствора моль/л	β_a , мВ/дек	β_k , мВ/дек	$j_{кор}$, мкА/см ²	$E_{кор}$, мВ
10^{-5} NaCl	400	200	1,0	-570
10^{-4} NaCl	154	118	1,6	-550
10^{-3} NaCl	74	154	1,9	-580
10^{-2} NaCl	42	53	2,3	-600
10^{-1} NaCl	50	100	10,0	-700
1,0 NaCl	59	125	32,0	-695
10^{-5} Na ₂ SO ₄	414	238	1,8	-500
10^{-4} Na ₂ SO ₄	89	143	1,9	-560
10^{-3} Na ₂ SO ₄	91	111	2,2	-600
10^{-2} Na ₂ SO ₄	83	91	0,39	-610
10^{-1} Na ₂ SO ₄	100	125	1,0	-620
1,0 Na ₂ SO ₄	50	83	0,6	-650
10^{-5} NaNO ₃	180	210	1,3	-690
10^{-4} NaNO ₃	130	170	1,3	-550
10^{-3} NaNO ₃	165	170	1,8	-550
10^{-2} NaNO ₃	140	110	2,9	-450
10^{-1} NaNO ₃	175	170	1,4	-490
1 NaNO ₃	200	320	1,0	-430
10^{-5} Na ₂ HPO ₄	40	250	0,1	-360
10^{-4} Na ₂ HPO ₄	94	67	0,2	-560
10^{-3} Na ₂ HPO ₄	125	133	0,6	-620
10^{-2} Na ₂ HPO ₄	143	108	2,2	-600
10^{-1} Na ₂ HPO ₄	50	77	0,6	-645
1,0 Na ₂ HPO ₄	69	100	10,0	-960

В целом, значения тафелевских коэффициентов β_a и β_k свидетельствуют о существовании отно-

сительно устойчивой оксидной пленки в более концентрированных растворах (10^{-3} -1,0 моль/л) исследуемых солей.

Результаты коррозионных исследований (табл.) показывают, что увеличение содержания соли приводит к смещению потенциала коррозии алюминия в сторону более отрицательных значений: в NaCl и Na_2SO_4 – на 145-150 мВ; в Na_2HPO_4 – на 600 мВ. В NaNO_3 , наоборот, с возрастанием концентрации раствора потенциал коррозии сдвигается на 250 мВ в сторону более положительных значений (табл.).

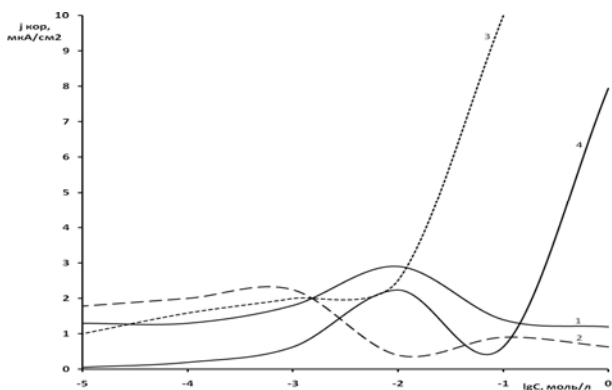


Рис. 2 – Влияние концентрации соли на плотность тока коррозии алюминия A5 (99,5%) в растворах: 1 – NaNO_3 ; 2 – Na_2SO_4 ; 3 – NaCl ; 4 – Na_2HPO_4

Зависимость плотности тока коррозии от концентрации соли имеет более сложный вид (табл. 1, рис.2). В диапазоне концентраций от 10^{-5} до 10^{-3} моль/л, значения коррозионного тока во всех исследуемых солях сопоставимы и плавно увеличиваются: в Na_2SO_4 и NaNO_3 незначительно (в 1,2 - 1,4 раза); в NaCl – почти в 2 раза; в Na_2HPO_4 – в 6 раз (табл.). В более концентрированных растворах (10^{-3} -1,0 моль/л) наблюдается другая картина (рис.2): например, при концентрации 10^{-2} моль/л в NaNO_3 величина тока коррозии достигает своего максимума, а при дальнейшем увеличении содержания соли – уменьшается до значений, сопоставимых с его значениями в наиболее разбавленных растворах (табл., рис.2). Такая же тенденция, т.е. уменьшение тока коррозии в наиболее концентрированных растворах (10^{-2} -1,0 моль/л) характерна и для раствора Na_2SO_4 (табл. 1, рис.2). И наоборот, можно видеть (рис.2, табл.) резкое возрастание коррозионного тока в Na_2HPO_4 при $\approx 10^{-1}$ моль/л и еще более резкое его увеличение в NaCl в диапазоне концентраций 10^{-2} -1,0 моль/л. В целом, при увеличении содержания соли от 10^{-5} до 1,0 моль/л плотность тока коррозии увеличивается на порядок в растворе Na_2HPO_4 и более, чем в 30 раз – в NaCl (табл. 1).

В соответствии с величиной плотности тока коррозии алюминиевого электрода (табл.) исследуемые растворы солей можно расположить следующим образом:

в диапазоне концентраций 10^{-5} - 10^{-3} моль/л –
 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \square \text{NaNO}_3, \text{NaCl} \square \text{Na}_2\text{SO}_4$;
 при концентрации 10^{-1} моль/л –
 $\text{Na}_2\text{HPO}_4, \text{Na}_2\text{SO}_4 \square \text{NaNO}_3 \square \text{NaCl}$;
 при концентрации 1,0 моль/л –
 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \square \text{NaNO}_3 \text{Na}_2\text{HPO}_4 \square \text{NaCl}$.

Таким образом, концентрация солевого раствора и физико-химическая природа аниона оказывают существенное влияние на коррозионное поведение алюминия – в наиболее разбавленных растворах (10^{-5} - 10^{-3} моль/л) ток коррозии минимален в фосфорнокислом двухзамещенном растворе фосфата натрия, максимален – в растворе сульфата натрия; а в более концентрированных средах (10^{-1} -1,0 моль/л), наоборот, именно в Na_2SO_4 коррозионный ток имеет самые минимальные значения и максимальные – в NaCl (табл. 1).

Полученные в настоящем исследовании результаты подтверждают неоднозначное влияние анионов NO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} на электрохимические свойства чистого алюминия. Так, стабильные, устойчивые во времени пассивные оксидные слои в Na_2SO_4 при анодной поляризации образуются в более концентрированных растворах ($\square 10^{-1}$ моль/л в условиях эксперимента), что наблюдалось нами и ранее [19]. Присутствие нитрат-ионов так же, как и сульфат-ионов, может оказывать ингибирующее действие на процесс локальной активации поверхности алюминиевого электрода в определенных условиях анодной поляризации [12,15,19,22,23]. Однако в относительно концентрированных ($\geq 10^{-1}$ моль/л) растворах нитратов имеет место критический потенциал питтингообразования, после достижения которого на поверхности алюминия появляются локальные очаги коррозионного разрушения [20,23,24]. Таким образом, в нитратсодержащих растворах при определенных условиях анодной поляризации на поверхности алюминиевого электрода могут иметь место как пассивные, так и активные участки, на которых возможно появление локальных питтингов.

В работе [15] отмечается, что скорость анодного процесса на алюминии (99,9%) в водных растворах сульфата натрия ($0,7 \square 10^{-4}$ – $0,7 \square 10^{-1}$ М; pH=4,9-5,2) и нитрата калия ($1,0 \square 10^{-4}$ – $1,0 \square 10^{-1}$ М; pH=4,6-5,4) при фиксированном потенциале почти не зависит от концентрации добавки. На основе этого авторами [15] сделано предположение, что NO_3^- и SO_4^{2-} -ионы не участвуют в анодном процессе на алюминии (по данным электронной микроскопии элементы S и N не были обнаружены на поверхности алюминия), и пассивирующий слой, вследствие высокого химического сродства Al к кислороду [25], образуется при взаимодействии металла с водой по схеме: $\text{Al} + y\text{H}_2\text{O} \rightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_y]_{\text{адс}}$.

Неоднозначное влияние фосфат-ионов на чистый алюминий и его сплавы неоднократно отмечалось в литературе [12,26-28]. Так, в работе [26] показано, что добавка фосфора в нейтральные хлоридные растворы способствует снижению стационарного потенциала, не влияя на скорость коррозии, но в щелочных средах существенно ее увеличивают.

По данным работы [27] при одновременном легировании алюминия галлием и фосфором происходит торможение коррозионного процесса, характерный при легировании только одним галлием. При введении фосфора сплав Al-Ga восстанавливает способность к пассивированию, и коррозия из локальной переходит в равномерную.

При исследовании влияния фосфорнокислого двухзамещенного фосфата натрия на пассивацию сплава АМг-6 в водном растворе ацетата калия установлено [28], что защитные свойства пассивной пленки улучшаются независимо от температуры раствора (25-70°C) при введении определенного количества Na_2HPO_4 (0,5-1%) или при добавлении смеси фосфата и бензотриазола (0,5% Na_2HPO_4 + 0,2% БТА).

Экспериментальные данные, полученные в настоящем исследовании, показывают, что в фосфатсодержащих растворах (в диапазоне концентраций 10^{-5} - 10^{-1} моль/л) ток коррозии имеет наименьшие значения, по сравнению с другими исследуемыми растворами солей (табл. 1, рис.2). Однако дальнейшее увеличение содержания соли (1,0 моль/л) приводит к резкому возрастанию коррозионного тока (табл. 1, рис.2) при одновременном резком снижении потенциала коррозии в сторону более отрицательных значений (табл.1).

В хлоридсодержащих растворах (10^{-3} -1,0 моль/л) значения тока анодного растворения наибольшие (кривые 1 на рис.1а,б,в), по сравнению с другими исследуемыми средами, и прослеживается четкая тенденция его значительного возрастания с увеличением концентрации хлорид-иона, что отмечалось и в предыдущих работах [29,30]. Играя роль активаторов анодного растворения алюминия, ионы Cl^- способствуют анодно-анионной активации поверхности металла [9-11], которая в конечном счете приводит к локальному разрушению защитной оксидно-гидроксидной пленки на поверхности электрода и увеличению скорости процесса саморастворения металла [11].

По представлениям Я.М. Колотыркина [16], при растворении алюминия имеет место адсорбционно-химическое взаимодействие анионов раствора с поверхностными атомами растворяющегося металла. Подобная специфическая адсорбция стимулирует процесс окисления, и атом металла переходит в раствор в виде стабильного комплекса с адсорбированным анионом раствора [31]. Однако в подобном взаимодействии могут принимать участие не только специфически адсорбирующиеся анионы, но и молекулы воды; и это будет происходить в том случае, если анион раствора обладает меньшим, чем кислород, химическим сродством к алюминиевому электроду [16].

Согласно адсорбционной теории пассивности металла [16,31] процессы активации и пассивирования поверхности алюминия обусловлены различием в прочности адсорбционной связи, которая зависит от природы адсорбата и величины электродного потенциала. Ингибирование процесса растворения происходит в том случае, когда адсорбированная частица оказывается настолько прочно связанной с металлом, что практически полностью теряет связь с раствором. И, наоборот, для активации необходимо, чтобы адсорбированная частица была бы одинаково прочно связана и с металлом и с раствором [16,31].

Отмечается [7], что питтингообразование развивается в присутствии активирующих анионов, при потенциалах, положительнее критического потенциала для данных условий, и ввиду амфотерности алюминия, его депассивация может вызываться OH^- , генерируемыми локальным катодом. Кроме того, питтинг при данном потенциале может образовывать-

ся лишь в том случае, если анион образует с металлом хорошо растворимое соединение; в хлоридсодержащих растворах таким соединением является AlCl_3 , образующийся в результате взаимодействия алюминия с водой. При этом агрессивные анионы принимают участие в самой стадии ионизации металла [7].

Согласно [7,8,32] активация или ингибирование поверхности алюминия представляется как следствие нуклеофильного замещения лигандов в поверхностном комплексе различными анионами электролита. При этом анионы рассматриваются как нуклеофилы, вступающие во взаимодействие с поверхностными соединениями в слабых местах пассивирующей оксидной пленки [8,32], и реакционная способность анионов определяется прежде всего их поляризуемостью, сольватационными эффектами и гидрофильностью лигандов. Отсюда - различная способность анионов конкурировать с гидроксидами в адсорбции при анодной поляризации. Анионы Cl^- , обладающие высокой поляризуемостью, способны относительно легко внедряться в двойной слой и образовывать растворимые соединения с металлом. Анионы NO_3^- и SO_4^{2-} , обладающие низкой поляризуемостью, на это не способны, поэтому они должны концентрироваться в диффузной части двойного слоя и ингибировать питтингообразование в хлоридных растворах [7,8,32]. Но в определенных условиях поляризации NO_3^- может ускорять коррозию алюминия и его сплавов [7,20,24], поэтому логичнее предположить, что природа аниона проявляется через его способность выступать лигандом при комплексообразовании [7].

Заключение

Установлено влияние физико-химической природы и концентрации аниона на электрохимические и коррозионные характеристики алюминиевого электрода в водных солевых средах. Показано, что процессы иницирования и ингибирования локальной (питтинговой) коррозии на поверхности алюминиевого электрода в значительной степени определяются природой и концентрацией аниона раствора и условиями анодной поляризации.

Полученные экспериментальные данные позволяют установить оптимальные режимы ионизации алюминиевого анода в водных солевых электролитах для решения ряда прикладных задач, в частности, синтез оксидно-гидроксидных нанобъектов и разработка химических источников тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по госконтракту 16.552.11.7060.

Литература

1. Наноразмерные частицы гидроксидов и оксидов алюминия, полученные электрохимическим и химическим способами /Е.В. Петрова [и др.] //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2009. № 6. – С. 55-67.
2. J.F. Cooper. Current status of the development of the refuelable aluminium- air battery /J.F. Cooper, K.A. Kraftic //18th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf. Orlando. – 1983. – New York. – 1983. – V.4. – P.1628-1634.
3. S. Tajima. Aluminium and manganese as anodes for dry and reserve batteries /S. Tajima //Journal of Power Sources. – 1984. – V.11, № 1-2. – P. 155-161.
4. Н.В. Коровин. Воздушно-алюминиевые источники тока /Н.В. Коровин, Б.В. Клейменов //Информост «Радиоэлектроника и телекоммуникации» –24. – 2002, № 6(24). – С. 13-17.
5. А.М. Скундин. Использование алюминия в низкотемпературных химических источниках тока /А.М. Скундин, Н.В. Осетрова //Электрохимическая энергетика. – 2005. – Т. 5, № 1. – С.3-15.
6. Ahmad Zaku. Kinetics of anodic and cathode polarization of aluminium and its alloys /Ahmad Zaku //Anti – Corros. Meth. and Mater. – 1986. – № 33. – P. 11-14.
7. Ю.И. Кузнецов. Роль анионов раствора при депассивации алюминия и ингибировании коррозии /Ю.И. Кузнецов //Защита металлов. – 1984. – Т. XX, № 3. – С.359 - 372.
8. Ю.И. Кузнецов. О депассивации алюминия в нейтральных растворах /Ю.И. Кузнецов, Л.И. Попова, Ю.Б. Макарычев //Журнал прикладной химии. – 1986. – Т. LIX, № 5. – С.1005 - 1011.
9. А.П. Назаров. Анодное растворение алюминия в присутствии галогенид-ионов /А.П. Назаров, А.П. Лисовский, Ю.Н. Михайловский //Защита металлов. – 1991. – Т. 27, № 1. – С.13-19.
10. Анионная активация алюминия при анодном растворении в галидсодержащих средах /В.М. Самарцев [и др.] //Защита металлов. – 1992. – Т. 28, № 5. – С. 760-767.
11. Е.А. Зарцын. Кинетика выделения водорода и изменение анодного потенциала алюминия при активации хлорид-ионами /И.Д. Зарцын, В.М. Самарцев, И.К. Маршаков //Защита металлов. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 45-47.
12. О механизме анодного окисления алюминия в водных растворах электролитов /И.Л. Батаронов [и др.] //International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology. – 2007. – № 1 (655). – С. 118-126.
13. Т.С. Лукашук. Исследование влияния состава солевых электролитов на коррозионное и анодное поведение алюминия /Т.С. Лукашук, В.И. Ларин //Вісник Харківського національного університету. – 2008. – № 820. Хімія. – Вип. 16 (39) – С. 328-331.
14. Т.А. Борисенкова. Анодное поведение алюминия в нейтральных электролитах различного анионного состава /Т.А. Борисенкова, С.А. Калужина //Конденсированные среды и межфазные границы. – 2009. – Т. 11, № 2. – С. 106-110.
15. Т.А. Борисенкова. Пассивация и локальная активация алюминия в водных растворах по действием неорганических и органических добавок /Т.А. Борисенкова, С.А. Калужина //Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 132-136.
16. Я.М. Колотыркин. Влияние анионов на кинетику растворения металлов /Я.М. Колотыркин //Успехи химии. – 1962. – Т. III. – С.322-325.
17. Я.М. Колотыркин. Аномальные явления при растворении металлов /Я.М. Колотыркин, Г.М. Флорианович //Итоги науки и техники. Электрохимия. – 1971. – Т. VII. – С.5-64.
18. М.М. Фрискина. Электрохимическое поведение Al и Mg в хромо-кислых растворах /М.М. Фрискина //Журнал прикладной химии АН СССР. – 1988. –15 с. Деп. в ВИНТИ. 27.09.88, № 7158-В 88.
19. И.О. Григорьева. Электрохимическое поведение алюминия в электролитах, содержащих сульфат и хлорид натрия /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011, № 11. – С. 149-155.
20. И.О. Григорьева. Анодное и коррозионное поведение алюминия в нитратсодержащих электролитах /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т.15, № 7. – С. 275-278.
21. И.О. Григорьева. Влияние анионного состава нейтральных солевых электролитов на электрохимические характеристики алюминия /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников, Г.Т. Ахмадишина //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т.15, № 23. – С. 64-67.
22. Анодное поведение алюминия в растворах, содержащих KNO₃ и KOH /С.Г. Изотова [и др.] //Журнал прикладной химии. – 1985. – Т. LVIII, № 10. – С. 2362-2365.
23. И.О. Григорьева. Электрохимическое поведение алюминия в растворах нитрата калия /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т.15, № 9. – С. 233-236.
24. И.О. Григорьева. Влияние состава и концентрации нитратсодержащих электролитов на анодное растворение и коррозионное поведение алюминия /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т.15, № 20. – С. 69-72.
25. Г. Кеше. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. – М.: Металлургия, 1984. – 400с.
26. G.F. Darbyshire. Examination of aluminium dissolution / G.F. Darbyshire //J. Power Sources. – 1984. – V. XI, № 3-4. – P.229 - 230.
27. A. Manse. Effect of gallium and phosphorus on corrosion behavior of aluminium in sodium chloride solution /A. Manse // J. Appl. Electrochem. – 1985. – V. XV, № 3. – P.415 - 520.
28. Г.П. Чернова. Влияние ингибирующих добавок на электрохимическое поведение сплава АМг-6 в водном растворе ацетата калия при повышенных температурах /Г.П. Чернова, Л.П. Корниенко //Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2010. – Т.46, № 3. – С. 296-300.
29. И.О. Григорьева. Коррозионно-электрохимическое поведение алюминия в хлоридсодержащих электролитах /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011, № 11. – С. 160-166.
30. И.О. Григорьева. Влияние состава солевых хлоридсодержащих электролитов на электрохимическое и коррозионное поведение алюминия /И.О. Григорьева, А.Ф. Дресвянников, Г.Т. Ахмадишина //Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т.15, № 12. – С. 44-47.
31. Я.М. Колотыркин. Успехи и задачи развития теории коррозии /Я.М. Колотыркин //Защита металлов. – 1980. – Т. XVI, № 6. – С.660 - 673.
32. Ю.И. Кузнецов. Роль поверхностных реакций замещения в ингибировании локальной коррозии металлов /Ю.И. Кузнецов //Защита металлов. – 1987. – Т. XXIII, № 5. – С.739 - 747.

© И. О. Григорьева – канд. хим. наук, доц. каф. технологии электрохимических производств КНИТУ, iren-grigor@mail.ru; iren@kstu.ru; А. Ф. Дресвянников – д-р хим. наук, проф. каф. аналитической химии, сертификации и менеджмента качества КНИТУ, alfedr@kstu.ru; Г. Т. Ахмадишина – магистрант КНИТУ.