

НОВЫЕ ВЕЩЕСТВА,
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 544.653.22

ОСОБЕННОСТИ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОДА ТИТАН–АЛЮМИНИЙ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ ЕГО РАСТВОРЕНИЯ

© 2022 г. А. Ф. Дресвянников¹, *, Я. В. Ившин¹, Фам Тьен Чонг¹, А. И. Хайруллина¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Казанский национальный исследовательский технологический университет”, Казань, Россия

*e-mail: a.dresvyannikov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2019 г.

После доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 29.09.2021 г.

Исследовано электрохимическое поведение комбинированного электрода титан-алюминий в водных растворах 1.0 М хлорида натрия с добавками фтористоводородной кислоты. Показано, что в условиях разомкнутой цепи комбинированный электрод представляет собой короткозамкнутый элемент, поверхность которого практически эквипотенциальна и характеризуется значением потенциала, находящегося между величинами коррозионных потенциалов алюминиевого и железного электродов. При малом содержании фтористоводородной кислоты практически весь анодный ток протекает через поверхность алюминиевой составляющей комбинированного электрода. Далее при росте концентрации HF до 0.5 М титановый электрод активизируется и доля протекающего тока, почти такая же, как доля тока алюминиевой составляющей анода. Это позволяет регулировать скорости растворения алюминия и титана при их совместном окислении в процессе синтеза прекурсов оксидов металлов заданного фазового состава путем изменения соотношения площадей составляющих анода.

Ключевые слова: анодное растворение, комбинированный электрод, алюминий, титан, оксидная система, Al₂O₃, TiO₂, фторид-ионы, хлоридсодержащий электролит

DOI: 10.31857/S0044185622010077

ВВЕДЕНИЕ

Исследование распределения тока и потенциала по поверхности комбинированного электрода при совместном окислении двух пассивирующихся металлов — титана и алюминия имеет определенный теоретический интерес, а также позволяет определить характеристики коррозионного процесса в условиях анодной поляризации двух разнородных металлов, находящихся в контакте друг с другом. Кроме того, такие исследования позволяют выявить условия формирования бинарных гидроксидных и оксидных систем указанных металлов, в том числе их количественное соотношение [1–3].

Однако, число опубликованных результатов исследований по данной тематике крайне невелико.

Поэтому целью настоящей работы является изучение электрохимического поведения алюминия и титана, находящихся в контакте друг с другом и погруженных в раствор хлорида натрия в присутствии фтористоводородной кислоты разной концентрации, а также установление законо-

мерностей совместного анодного растворения этих металлов.

Как известно, хлорид- и фторид- ионы являются активаторами поверхности пассивирующихся металлов, способствующих их анодному растворению [4]. Согласно [4, 5], активирующее действие хлорид- и фторид-ионов, связано с трансформацией оксидной пленки металла и обусловлено адсорбцией на поверхности электрода этих ионов, полностью или частично вытесняющих пассивирующий кислород. В результате этого металл приобретает способность переходить в раствор в виде хлоридного и фторидного комплекса [4, 6, 7]. Хемосорбционные соединения металлов гидролизуются, причем продукты гидролиза способствуют разрушению поверхностного слоя и депассивации металла.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводили в прямоугольной ячейке объемом 200 см³. С целью обеспечения равномерного распределения тока анод и катод распо-

лагались параллельно друг другу и полностью перекрывали сечение ячейки. Комбинированный анод состоит из пластин алюминия А5 и титана с рабочей поверхностью размером 12.5 см² каждая. Составляющие анода располагались рядом в одной плоскости и имели электрический контакт между собой. Electrodes проходили стандартную предварительную подготовку: поверхность механически полировали алмазной пастой, обезжиривали этиловым спиртом и промывали бидистиллированной водой.

Ступенчатая анодная гальваностатическая поляризация анода осуществлялась с помощью электрохимической станции Zive SP2. Длительность поляризации током заданной величины составляла 1 мин. Силу тока, протекающего через составные части комбинированного электрода, измеряли путем измерения напряжения на включенных последовательно в анодную цепь сопротивлений величиной 1 Ом. В качестве электрода сравнения применяли хлоридсеребряный электрод марки ЭВЛ-1МЗ. Капилляр Луггина–Габера ориентировали относительно точек поверхности железной и алюминиевой составляющих анода (по краям и центру) посередине вертикального сечения электрода. Вспомогательный электрод из нержавеющей стали 18ХН10Т размещали у противоположной стенки прямоугольной ячейки на расстоянии 20 см от анода.

Кроме того, выделившийся в процессе поляризации осадок отфильтровывали, высушивали при температуре 60°C и подвергали термообработке при температуре 1100°C.

Рентгенофазовый анализ образцов проводили стандартным методом на дифрактометре D2 PHASER с использованием монохроматизированного CoK_α -излучения (30 кВ, 10 мА) в режиме шагового сканирования (шаг сканирования – $2\theta = 0.05^\circ$, интервал съемки – $2\theta = 3^\circ - 130^\circ$). Расчет значений межплоскостных расстояний дифракционных рефлексов производился автоматически с помощью программного пакета DIFFRAC.EVA. Идентификацию кристаллических фаз осуществляли путем сопоставления полученных экспериментальных значений межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей с эталонными.

Микроскопические исследования состояния поверхности анода после поляризации проводили на сканирующем электронном микроскопе EVEX Mini SEM SX-3000 (15 кВ, 10 мкА) с приставкой локального элементного анализа.

Элементный анализ полученных дисперсных систем проводили на портативном рентгенофлуоресцентном спектрометре S1 TITAN с максимальным напряжением 50 кВ, с использованием программного пакета GeoChem General.

Микросъемку дисперсных образцов осуществляли на сканирующем электронном микроскопе AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCAX-MAX с использованием режимов SE2 (вторичных электронов) (20 кВ, 800 Па) и InLens (высокоразрешающий режим вторичных электронов) (15 кВ, 180 Па). На исследуемые образцы с помощью установки Quorum Q150T ES предварительно наносили слой золото-палладий (60 : 40) толщиной 15 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили при плоскопараллельном расположении электродов. Это вызвано тем, что в иных условиях на распределение тока в процессе совместного растворения металлов влияет геометрия расположения электродов, и наблюдаемая картина процесса усложняется (рис. 1).

Полученные результаты имеют крайне низкую степень воспроизводимости, форма и взаимное расположение кривых меняется по сложным закономерностям. Анализ результатов измерений позволяет предположить причины наблюдаемых явлений: во-первых, распределение тока и потенциала в электролизере и по поверхности анода неравномерно, во-вторых, взаимоположение составляющих комбинированного анода и электрода сравнения зафиксировано недостаточно точно, расстояние между ними может изменяться, как в течение одного эксперимента, так и отличаться в параллельных опытах.

Комбинированный электрод Al–Ti представляет собой короткозамкнутый гальванический элемент. Вследствие относительно малого размера электродов и высокой проводимости электролита в отсутствие внешнего тока, поверхность комбинированного электрода практически эквипотенциальна (рис. 3 кривая 0).

Известно, что при контакте металлов с различными электрохимическими потенциалами скорость их коррозии может существенно меняться. При появлении в такой системе тока потенциалы анода и катода меняются в противоположных направлениях: потенциал катода становится более электроотрицательным, а потенциал анода – более электроположительным. При нулевой или невысокой поляризации потенциалы контактирующих металлов максимально сближены (рис. 2) и отличаются на величину, которая, по-видимому, эквивалентна разности гальвани–потенциалов этих металлов.

При протекании относительно небольшого внешнего тока и росте его значения наблюдается увеличение разности потенциалов поверхности алюминиевой и титановой составляющих анода. При анодной поляризации титана в растворах NaCl в диапазоне ее концентраций 0.1–0.5 моль/л

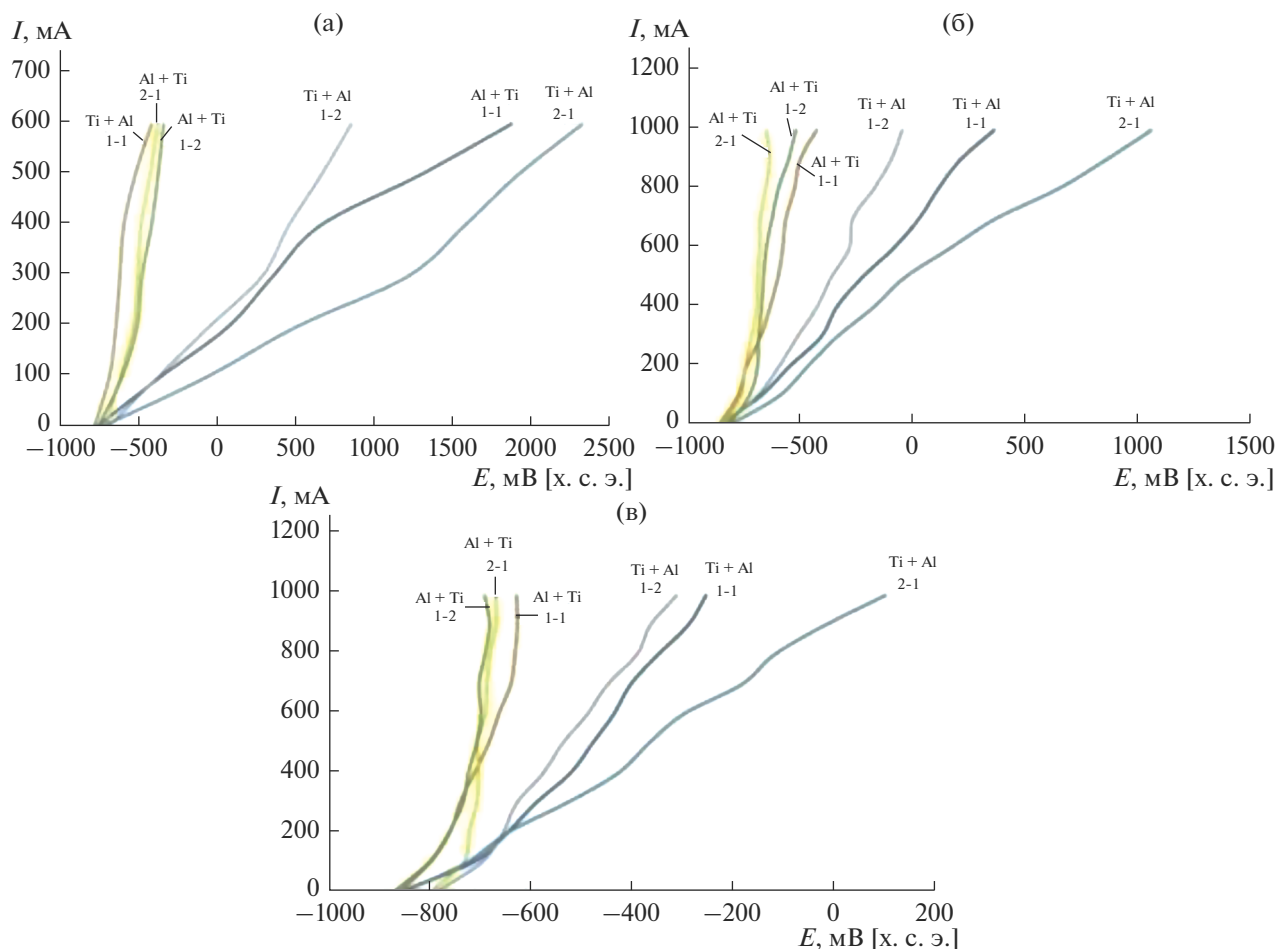


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые комбинированного электрода в растворе 1.0 М NaCl с добавкой HF, моль/л: (а) 0.1; (б) 0.5; (в) 1 при различных соотношениях поверхностей $S_{\text{Al}} : S_{\text{Ti}}$. Обозначения: Al + Ti – алюминий в составе комбинированного электрода; Ti + Al – титан в составе комбинированного электрода.

интенсивного анодного растворения титана не происходит, его потенциал смещается в сторону положительных значений (рис. 3). При этом потенциал алюминиевого электрода изменяется мало.

При увеличении концентрации фторид ионов в электролите до 0.5 М потенциал поверхности алюминиевой (Al–Ti) и титановой (Ti–Al) составляющих комбинированного анода сближается. Однако при очень больших значениях тока потенциал титана резко увеличивается. По всей вероятности, это связано с пассивацией титана, что способствует увеличению разности потенциалов между составляющими комбинированного электрода (рис. 4).

Для получения поляризационных диаграмм электродов строили зависимости потенциала электрода от значения тока, протекающего через каждую составляющую комбинированного анода (рис. 5). Можно отметить, что с ростом поляризующего тока потенциал поверхности алюминия

комбинированного электрода при малых концентрациях фторид-ионов меняется мало. Потенциал поверхности титановой составляющей комбинированного анода значительно сдвигается в область более положительных значений (рис. 5).

Очевидно, что поляризация электродов существенно зависит от концентрации фтористоводородной кислоты в растворе. При малой концентрации фторид ионов в растворе разница поляризации поверхности алюминиевой и титановой составляющей комбинированного электрода очень велика. Однако при увеличении концентрации фтористоводородной кислоты в растворе до 0.5 М эта разница становится небольшой. В случае повышения поляризующего тока до весьма больших величин поляризация титанового электрода вновь возрастает. При этом зависимость имеет весьма сложный характер, поскольку оба металла имеют пассивную пленку на поверхности электродов, поверхность титанового электрода

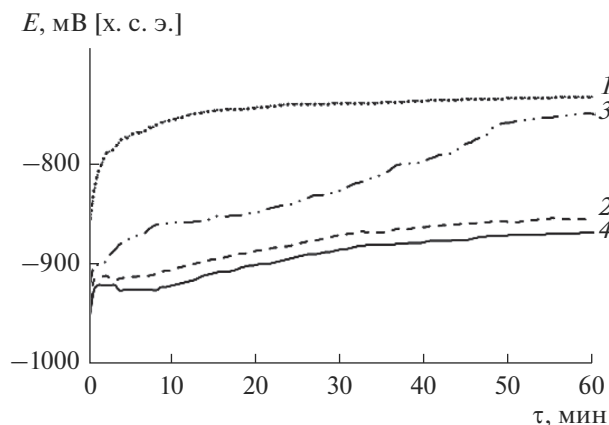


Рис. 2. Изменение потенциала электрода в растворе 1.0 M NaCl + 0.5 M HF при силе анодного тока 50 мА: 1 – Al; 2 – Al в составе комбинированного электрода; 3 – Ti; 4 – Ti в составе комбинированного электрода. Соотношения поверхностей – $S_{Al} : S_{Ti} = 1 : 1$.

пассивируется и его потенциал резко сдвигается вправо.

Далее, с целью определения характеристик процесса формирования гидроксидов указанных металлов, строили зависимость доли тока составляющих комбинированного электрода от величины общего поляризующего тока (рис. 6).

Можно отметить, что доля токов существенно зависит от концентрации фтористоводородной кислоты в растворе. При малой внешней поляризации величины анодных токов, протекающих через поверхность алюминиевой и титановой составляющей комбинированного электрода сопоставимы. При росте внешней поляризации доля титановой составляющей существенно уменьшается. Однако, она повышается с ростом концентрации фтористоводородной кислоты до 0.5 M в растворе. Данная зависимость носит весьма сложный характер, поскольку оба металла имеют пассивную пленку на поверхности электродов, а свойства пленок весьма различны.

Учитывая выявленные закономерности синтез прекурсоров оксидов с помощью электрогенерированных реагентов проводили в реакторе с растворимыми анодами. В качестве растворимых электродов использовали алюминий и титан. Процесс получения сложных оксидов заключался в совместном анодном растворении этих металлов в растворах хлорида натрия, а также в присутствии фтористоводородной кислоты, с дальнейшим гидролизом в объеме раствора электрогенерированных ионов металлов и образованием предшественников сложных и смешанных оксидов.

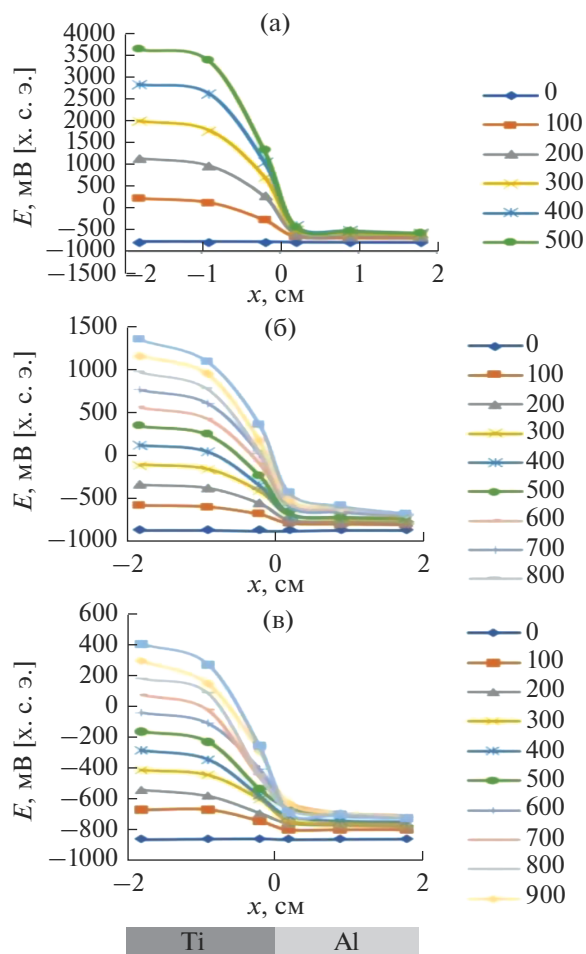


Рис. 3. Распределение потенциала по поверхности комбинированного электрода в зависимости от силы тока, протекающего в растворе NaCl, моль/л: (а) 0.1; (б) 0.5; (в) 1. Цифрами обозначены значения величины силы поляризующего тока, мА.

При этом изменение поверхности алюминиевой и титановой составляющих комбинированного электрода носит разный характер. В процессе растворения в растворе 1.0 M NaCl + 0.05 M HF на поверхности алюминия образуются сквозные поры диаметром от 30 до 120 мкм. Согласно данным электронно-микроскопических исследований, на поверхности алюминия присутствуют многочисленные очаги растворения, которые имеют четко выраженную шарообразную форму с диаметром ~ 100 – 150 мкм. Поверхность титана разрушается преимущественно по краям электрода, при этом формируются очаги разрушения разной формы, в основном, округлой продолговатой, диапазон размеров которых составляет в среднем ~ 3 – 6 мкм (рис. 7).

Таким образом, интенсивность анодного растворения составляющих комбинированного

электрода в исследуемом электролите меняется в зависимости от соотношения рабочих поверхностей контактных пар комбинированного электрода, приложенного тока и концентрации плавиковой кислоты. Варьируя вышеперечисленные условия анодной поляризации в растворе хлорида натрия с добавкой HF, можно подобрать условия растворения комбинированного электрода и, в зависимости от поставленной задачи, достичь либо растворения с близкими скоростями обеих электродных составляющих, либо преобладающего растворения того или иного металла. В этой связи можно сделать заключение о возможности регулирования процесса анодного растворения комбинированного электрода.

При электролизе в коаксиальном бездиафрагменном электролизере с растворимым комбинированным электродом, состоящим из чередующихся пластин алюминия и титана, погруженными в водный раствор хлорида натрия (1.0 моль/л) с введением фтористоводородной кислоты 0.01 моль/л при соотношении площади рабочих поверхностей контактирующих металлов $S_{Al} : S_{Ti} = 2 : 1$ и плотности тока 100 мА/см² обнаружено, что реакция окисления металла с образованием осадка протекает только на алюминии вплоть до его полного растворения (47 мин); убыль массы титановой составляющей комбинированного электрода в этом случае равна нулю. После фильтрования и высушивания осадка (80°C) получают продукт белого цвета, представляющий собой гидроксид алюминия со структурой бемита (100%).

Результаты рентгенофазового анализа продуктов в зависимости от условий электролиза комбинированного электрода Al–Ti (состав раствора, электрический режим, продолжительность процесса) сведены в табл. 1.

Согласно экспериментальным данным, добавление плавиковой кислоты способствует интенсивному растворению титана и формированию оксидно-гидроксидных систем на его основе. Так, при увеличении концентрации кислоты с 0.05 до 0.5 моль/л при высоких плотностях тока (табл. 1, № 6) содержание оксида титана (структура анатаза) возрастает почти в 3 раза.

При увеличении поверхности алюминия по отношению к титану в 5 раз (табл. 1, № 4, 5), при прочих равных условиях, в составе продукта обнаруживается только фаза гидроксида алюминия. Однако, при высоких концентрациях фтористоводородной кислоты увеличение поверхности алюминия в 5 и 10 раз относительно поверхности титана не препятствует интенсивному растворению последнего, о чем свидетельствует присутствие фаз оксида титана.

В случае образца № 3 (табл. 1) полное растворение алюминия происходит в течение 45 мин.

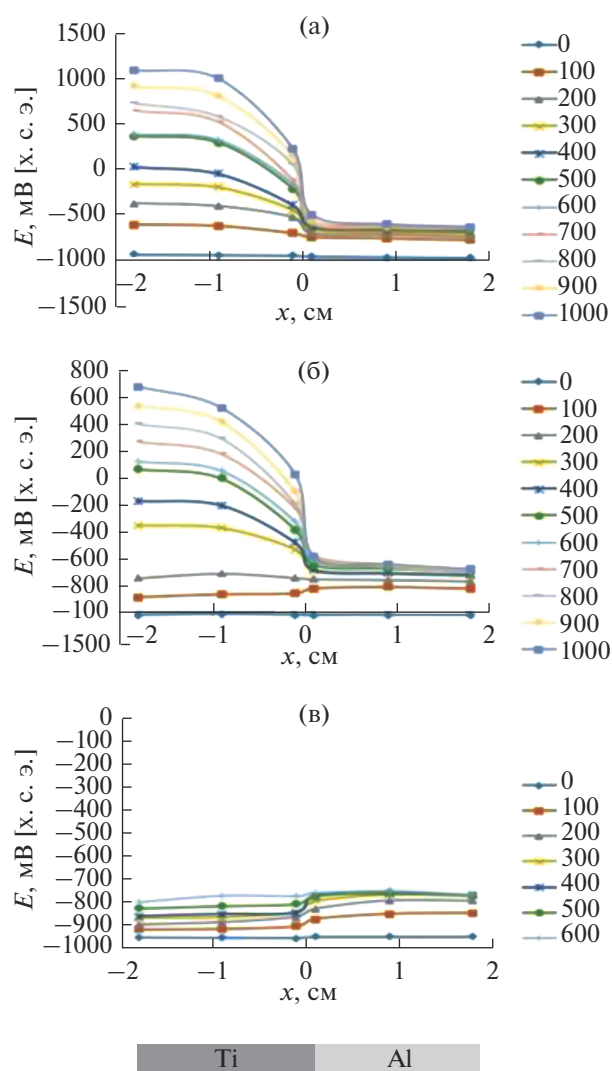


Рис. 4. Распределение потенциала по поверхности комбинированного электрода в зависимости от силы тока, протекающего в 1.0 М растворе NaCl с добавлением фтороводородной кислоты с концентрацией, моль/л: (а) 0.05; (б) 0.1; (в) 0.5. Цифрами обозначены значения величины силы поляризующего тока, мА.

Согласно данным рентгеновской дифрактометрии (табл. 1), в процессе высушивания продукта электролиза при 80°C формируются гидроксид алюминия со структурой бемита $\gamma\text{-AlOOH}$ и оксид титана со структурой анатаза. Агрегаты частиц данной системы характеризуются размерами порядка 25 мкм.

При прокаливании порошка при 550°C в течение двух часов фаза бемита термически разлагается с образованием гамма-оксида алюминия (табл. 2). Модификация оксида титана остается неизменной, однако его количество значительно увеличивается с 26 до 54 мас. %. При дальнейшем прока-

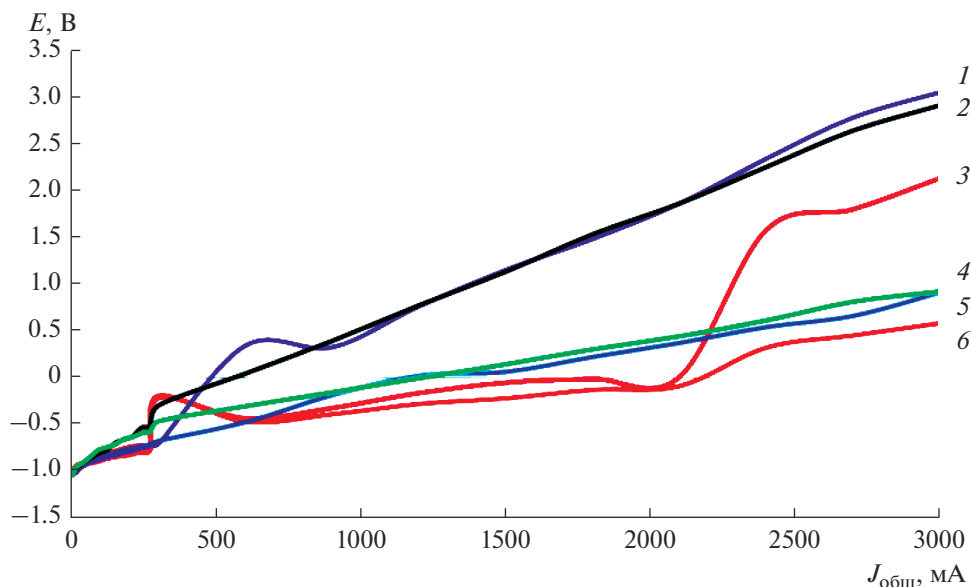


Рис. 5. Зависимость потенциала поверхности титановой (1–3) и алюминиевой (4–6) составляющих комбинированного анода в зависимости от общего поляризующего тока в растворе 1.0 М NaCl с добавлением HF: 2, 4 – 0.05 М, 1, 5 – 0.01 М, 3, 6 – 0.5 М.

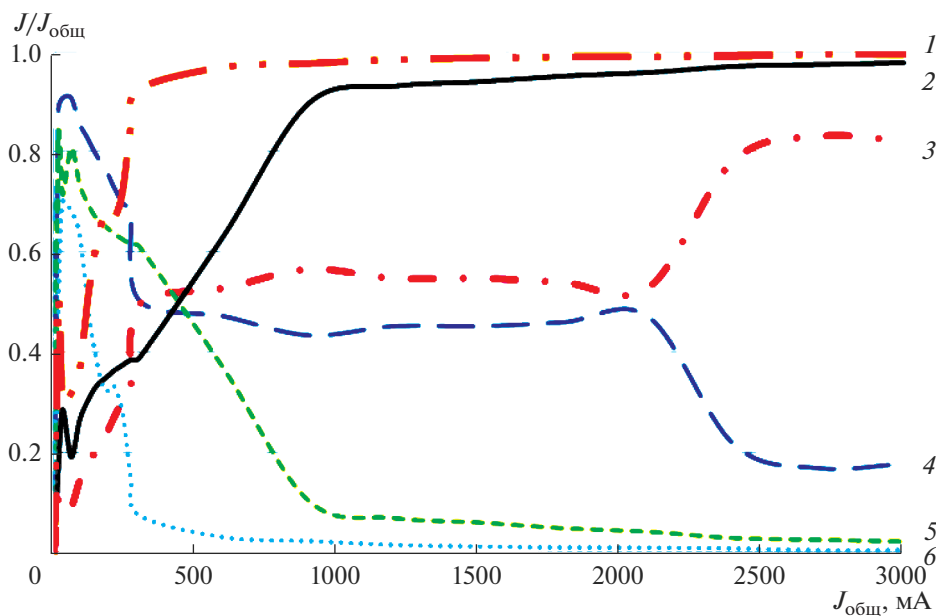


Рис. 6. Доля парциальных токов алюминиевой (1–3) и титановой (4–6) составляющих комбинированного электрода в зависимости от общего поляризующего тока в растворе 1.0 М NaCl с добавлением HF: 1, 6 – 0.05 М; 2, 5 – 0.01 М; 3, 4 – 0.5 М.

ливании осадка при 1100°C гамма-оксид алюминия переходит в свою наиболее устойчивую при высоких температурах модификацию – α -Al₂O₃. Кристаллическая модификация оксида титана в форме анатаза трансформируется в форму рутила, которая образуется при температурах выше 650°C. Размеры агрегатов частиц при этом уменьшаются и достигают значения порядка 18 мкм.

Увеличение температуры обработки образца № 3 до 1400°C приводит к образованию титаната алюминия Al₂TiO₅ (54 мас. %), при этом сохраняются фазы корунда (43%) и рутила (до 3%) (табл. 2).

Фазовые превращения в данной системе протекают в соответствии со схемой:

При низких концентрациях HF (≤ 0.1 моль/л):

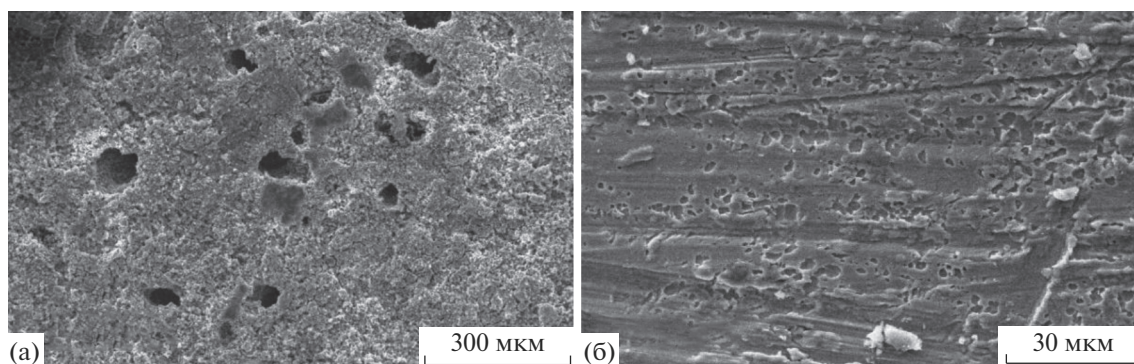
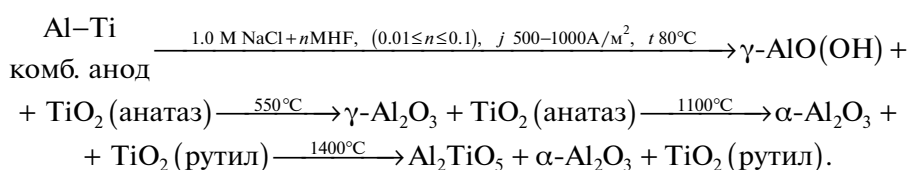


Рис. 7. Микрофотографии поверхности алюминия (а) и титана (б) в составе комбинированного электрода после электролиза ($j = 100 \text{ мА/см}^2$, $\tau = 80 \text{ мин}$, $S_{\text{Al}} : S_{\text{Ti}} = 2 : 1$) в растворе $1.0 \text{ М NaCl} + 0.05 \text{ М HF}$.



При высоких концентрациях HF ($\geq 0.5 \text{ моль/л}$):

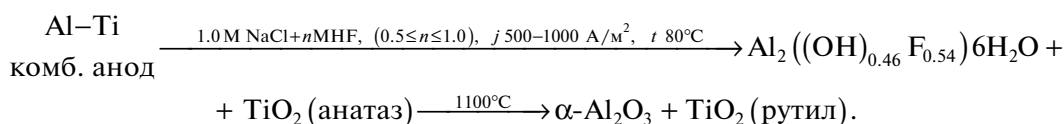


Таблица 1. Фазовый состав продуктов электролиза в растворах $1.0 \text{ М NaCl} + x \text{ HF}$ при различных режимах и условиях

№ п/п	x, моль/л	j, мА/см ²	S _{Al} : S _{Ti}	t, мин	Результаты рентгенофазового анализа продуктов, термообработанных при температуре, мас. %	
					80°C	1100°C
1	0.01	100	2 : 1	60	AlOOH – 100%	θ-Al ₂ O ₃ – 60% α-Al ₂ O ₃ – 40%
2	0.025			60	AlOOH – 99% Al(OH) ₃ – 1%	α-Al ₂ O ₃ – 100%
3	0.05			80	AlOOH – 92.3% TiO ₂ – 7.7%	α-Al ₂ O ₃ – 76.7% TiO ₂ – 23.3%
4	0.05	50	5 : 1	60	AlOOH – 100%	α-Al ₂ O ₃ – 100%
5	0.1	100	5 : 1	60	AlOOH – 100%	α-Al ₂ O ₃ – 100%
6	0.5	150	5 : 1	60	Al ₂ ((OH) _{0.46} F _{0.54}) · 6H ₂ O – 83.3% TiO ₂ – 16.7%	α-Al ₂ O ₃ – 99.3% TiO ₂ – 0.7%
7			10 : 1		Al((OH) _{0.46} F _{0.54}) · 6H ₂ O – 76.7% TiO ₂ – 23.3%	α-Al ₂ O ₃ – 100%
8	1.0	50	5 : 1	60	Al ₂ ((OH) _{0.46} F _{0.54}) · 6H ₂ O – 73.5% Na ₃ AlF ₆ – 26.5% Оксид титана в аморфной фазе	α-Al ₂ O ₃ – 85.3% NaAl ₁₁ O ₁₇ – 6.5% Na ₂ Al ₂ Ti ₆ O ₁₆ – 8.2%

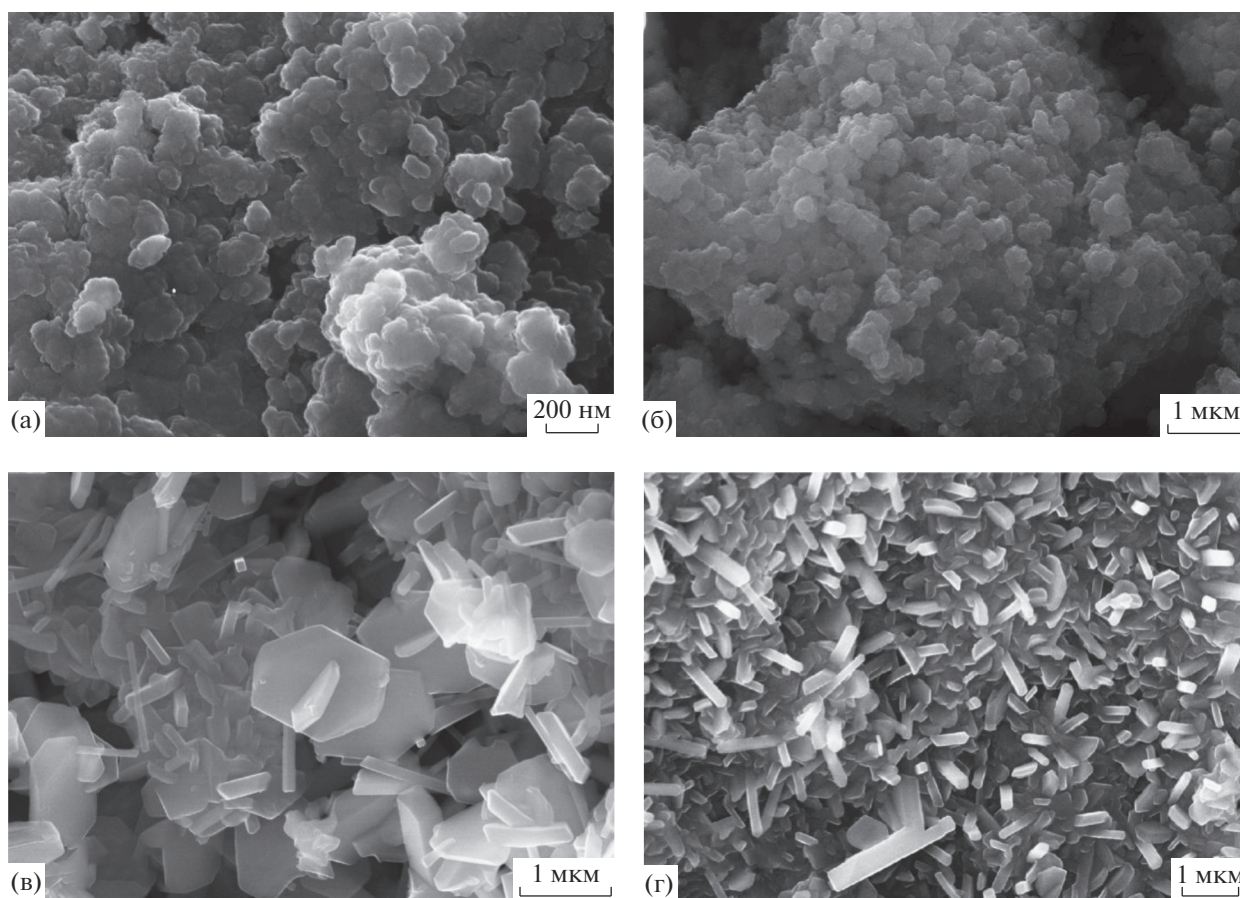
Таблица 2. Фазовый состав продукта растворения комбинированного анода Ti–Al при различных температурных режимах

$t, ^\circ\text{C}$	Фазовый состав, мас. %					
	AlOOH (бемит)	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд)	TiO ₂ (анатаз)	TiO ₂ (рутил)	Al ₂ TiO ₅
80	92.3	–	–	7.7	–	–
550	–	45.6	–	54.4	–	–
1100	–	–	76.7	–	23.3	–
1400	–	–	43.0	–	3.0	54.0

Микроизображение образца № 3 (рис. 8) свидетельствует о его развитой поверхности и размерах частиц порядка 50–100 нм. Очевидно, что исследуемый образец представляет совокупность агрегатов различных размеров и формы.

Частицы продукта растворения комбинированного анода Al–Ti, прокаленного при температуре 1100°C, имеют две четкие формы: в виде плоских шестигранников и игл. Грани гексагональных форм

кристаллов имеют размеры примерно от 650 до 700 нм. Гексагональная форма кристалла относится к оксиду алюминия, игольчатая к оксиду титана. Кристаллы в виде игл имеют ширину от 90 до 150 нм, в длину от 2 мкм и выше. Однако встречается большое количество “гибридов” этих кристаллов. Имеются кристаллы, состоящие из двух или нескольких сопряженных друг с другом игл или сростки кристаллов гексагональной и игольчатой форм.

**Рис. 8.** Микроизображение поверхности продукта растворения комбинированного анода Al–Ti (образец № 3), высушенного при 80°C (а, б) и 1100°C (в, г).

ВЫВОДЫ

1. Анодное поведение исследованного комбинированного Al–Ti электрода носит сложный характер и отличается от такового для индивидуальных металлических электродов вследствие различной природы (соответственно, поляризационного сопротивления) поверхностей алюминия и титана, погруженных в хлоридсодержащий электролит с добавлением плавиковой кислоты.

2. При отсутствии внешней поляризации комбинированный анод представляет собой короткозамкнутый элемент, поверхность которого практически эквипотенциальна и характеризуется значением потенциала, находящегося между величинами коррозионных потенциалов алюминиевого и железного электродов вследствие большой проводимости электролита и относительно малых размерах электрода.

3. При внешней поляризации в растворе хлорида натрия, значения потенциалов поверхности алюминиевой и титановой составляющих комбинированного анода различны; эта разница возрастает с увеличением внешнего тока, при этом алюминий поляризуется значительно меньше, чем титан. При малой концентрации фторид-ионов почти весь анодный ток протекает через поверхность алюминиевой составляющей комбинированного электрода, при росте концентрации HF в растворе до 0.5 М, доля тока, протекающего через разные составляющие анода, выравнивается. При увеличении поляризующего тока до весьма значительных величин поляризация титанового электрода вновь повышается. Данная зависимость носит сложный характер, поскольку оба металла имеют достаточно плотную пассивную пленку; поверхность титанового электрода пассивируется и потенциал резко сдвигается в область более положительных значений.

4. Предложенный подход позволяет регулировать скорости анодного растворения титана и алюминия при их совместном окислении в процессе формирования прекурсоров оксидов металлов (в том числе и сложных) заданного фазового состава путем изменения соотношения площадей составляющих комбинированного электрода.

5. Установлено, что анодное растворение комбинированного электрода Al–Ti приводит к формированию механической смеси кристаллитов AlOON-TiO_2 с размерами частиц 50–100 нм. Повышение температуры обработки продукта электролиза ($>1200^\circ\text{C}$) способствует формированию высокодисперсного титаната алюминия Al_2TiO_5 с содержанием в конечном продукте 55 мас. % и более.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП “Наноматериалы и нанотехнологии” Казанского национального исследовательского технологического университета в рамках государственного задания № 075-00315-20-01 “Катализ в нефтепереработке и нефтегазохимии” на 2020–2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kelkar G.P.* // J. American Ceramic Soc. 1995. V. 78. № 3. P. 572.
2. *Jamshidi P., Ghanbari D., Salavati-Niasari M.* // J. Mater. Sci.: Mater. Electronics. 2017. V. 28. P. 8950–8959.
3. *Ewais E.M.M., Besisa N.H.A., Ahmed A.* // Ceramics International. 2017. V. 43. № 13. P. 10277–10287.
4. *Понов Ю.А.* Теория взаимодействия металлов и сплавов с коррозионно- активной средой. М.: Наука, 1995. 200 с.
5. *Чернова Г.П., Корниенко Л.П.* // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. Т. 46. № 6. С. 651–656.
6. *Amokrane S., Ladjouzi M.A.* // J. Solid State Electrochemistry. 2007. V. 11. № 12. P. 1655–1661.
7. *Борисенкова Т.А., Калужина С.А.* // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. Т. 11. № 2. С. 106–110.
8. *Иоссель Ю.Я., Кленов Г.Э.* Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов. Справочник. М.: Металлургия, 1984. 272 с.
9. *Полянский Л.Н., Горшков В.С., Кравченко Т.А.* // Журн. физической химии. 2012. Т. 86. № 1. С. 121–123.
10. *Герасимов В.В.* Коррозия алюминия и его сплавов. М.: Металлургия, 1967. 116 с.
11. *Решетников С.М., Рылкина М.В.* // Защита металлов. 2001. Т. 37. № 5. С. 517–520.
12. *Зарцын И.Д., Федянин Д.О.* // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13. № 3. С. 260–265.