

TRANSPASSIVE AND ABNORMAL DISSOLUTION OF TITANIUM ELECTRODES IN HYDROFLUORIC ACID AQUEOUS SOLUTION

R.N. Nurdillayeva^{1*}, Sh.D. Abdukamalov¹, A. Bayeshov²

¹Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan

²D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

E-mail: raushan.nurdillayeva@ayu.edu.kz

Abstract. *Introduction.* One of the urgent problems of electrochemistry is the reuse of the production waste of a relatively expensive metal – titanium, which is in demand in mechanical, aircraft, cosmonautics, nanotechnology, and other industries. *The purpose* of this work is to study the abnormal cathodic and transpassive anodic dissolution of titanium in a hydrofluoric acid solution. *Methodology.* The electrochemical dissolution of direct current polarized titanium in HF solution is shown. The electrode spaces are separated by an anion exchange membrane. The electrolysis has resulted in forming of titanium Ti^{4+} in the anode, while the cathode space has included Ti^{3+} due to titanium chemical dissolution. The influence of main electrochemical parameters has been studied. *Results and discussions.* The current efficiency of anodic dissolution has risen with an increase in the current density, its maximum value (82.5%) has been observed at 800 A/m². The current efficiency has been raised by changing the HF concentration from 0.1 to 0.6 mol/l, and its maximum value of 78% was observed at 0.6 mol/l. Titanium dissolves by forming Ti^{3+} along with Ti^{4+} in the anode with an increase in temperature. In this case, Ti^{4+} current efficiency decreases up to 48% while Ti^{3+} apparent current efficiency increases. With an increase in the electrolysis duration to 2.5, the current efficiency decreases to 47.6%. *Conclusion.* The kinetic parameters of the electrode process have been determined: reaction order (~1) and activation energy (55.34 kJ/mol). The value of the activation energy reveals that the reaction proceeds in the kinetic regime.

Keywords: electrolysis, titanium electrode, hydrofluoric acid, titanium fluoride, abnormal dissolution, transpassive dissolution.

Nurdillayeva Raushan Nurdillakzy

Candidate of Chemical Sciences, Professor, Head of Ecology and Chemistry Department;

E-mail: raushan.nurdillayeva@ayu.edu.kz

Abdukamalov Shakhzad Dauletuly

Master student of Educational program 7M05324-Chemistry;

E-mail: shakhzad.abdukamalov@ayu.edu.kz

Bayeshov Abduali

Doctor of Chemical Science, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the RK;

E-mail: bayeshov@mail.ru

Citation: Nurdillayeva R.N., Abdukamalov Sh.D., Bayeshov A.. Transpassive and abnormal dissolution of titanium electrodes in hydrofluoric acid aqueous solution. *Chem.J. Kaz.*, 2023, 1(81), 34-43. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2023-1.2710-1185.04>

ТИТАН ЭЛЕКТРОДТАРЫНЫҢ ФТОРСУТЕК ҚЫШҚЫЛЫНЫҢ СУЛЫ ЕРІТІНДІСІНДЕГІ ТРАСПАССИВТІ ЖӘНЕ АНОМАЛЬДЫ ЕРУІ

Р.Н. Нұрділлаева¹, Ш.Д. Абдукамалов¹, А. Баешов²

¹Қожа Ахмет Яссауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

²Д.В.Сокольский атындағы Жанармай, Катализ және Электрохимия Институты АҚ, Алматы, Қазақстан

E-mail: raushan.nurdillayeva@ayu.edu.kz

Түйіндеме. *Кіріспе.* Машина жасау, авиатехника, ғарыш, нанотехнология және басқа да өнеркәсіп салаларында үлкен сұранысқа ие, салыстырмалы қымбат металл – титанның өндірістік қалдықтарын пайдаға асыру қазіргі таңда электрохимияның өзекті мәселелерінің бірі болып табылады. *Зерттеу мақсаты:* фторсутек қышқылының ерітіндісіндегі титан электродының анодтық аумақта транспассивті жағдайда және катодтық аумақта аномальды еруін зерттеу. *Әдістеме.* Тұрақты токпен поляризацияланған титан электродының HF ерітіндісіндегі электрохимиялық еруі көрсетілген. Электродтық кеңістіктер анионитті мембранамен бөлінді. Электролиз нәтижесінде Ti^{4+} иондары, ал катод кеңістігінде титанның химиялық еруіне байланысты Ti^{3+} иондары түзілетіні анықталды. *Нәтижелер және талдау.* Ток тығыздығын арттырғанда анодтық поляризацияланған титан еруінің ток бойынша шығымы артып, оның максималды мәні (82.5%) 800 A/m^2 ток тығыздығында байқалды. HF концентрациясын 0.1 - 0.6 моль/л аралығында өзгерткенде титан еруінің ток бойынша шығымы жоғарылап, оның максимал мәні 0.6 моль/л концентрацияда 78%-ды құрады. Температураны жоғарылатқанда анодтық аумақта титан электроды Ti^{4+} иондарымен қоса Ti^{3+} иондарын түзе еритіндігі анықталды. Бұл кезде Ti^{4+} иондарының ток бойынша шығымы 48%-ға дейін төмендеп, ал Ti^{3+} иондарының жорамал ток бойынша шығымы елеулі артатындығы көрсетілді. Электролиз ұзақтығын 2.5 сағатқа дейін арттырғанда ток бойынша шығымның 47.6%-ға дейін төмендейді. *Қорытынды.* Электродтық процестің кинетикалық параметрлері: реакция реттілігі (~1) мен активтендіру энергиясы (55.34 кДж/моль) анықталды. Активтендіру энергиясының мәні реакцияның кинетикалық режимде жүретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: электролиз, титан электроды, фторсутек қышқылы, титан фториді, аномальды еру, транспассивті еру

<i>Нұрділлаева Раушан Нұрділлақызы</i>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты, профессор</i>
<i>Абдукамалов Шахзад Даулетұлы</i>	<i>7M05324-Химия білім беру бағдарламасының магистранты</i>
<i>Баешов Абдуәлі</i>	<i>Химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА Академигі</i>

1. Кіріспе

Титан – қиын балқитын, иілгіштігі жоғары, жеңіл металл. Темірге қарағанда 1.75 есе жеңіл, дегенмен титанның беріктігі темірдікіне қарағанда 4 есе жоғары, балқу температурасы 1668°C [1]. Қалыпты жағдайда ол титан диоксидінің қорғаныш пленкасымен қапталған, соның арқасында титан сілтілерден басқа көптеген орталарда коррозияға төзімді, дегенмен фторсутек қышқылының 1%-дық ерітіндісінің өзінде қарқынды ериді, бұл ерекшелік титанның фторид иондарымен кешенді қосылыстар түзуімен түсіндіріледі. Көптеген қышқылдарда, тіпті патша сұйығында ерімейді, фторидті қышқылды ортада TiF_3 түзе отырып ериді [2].

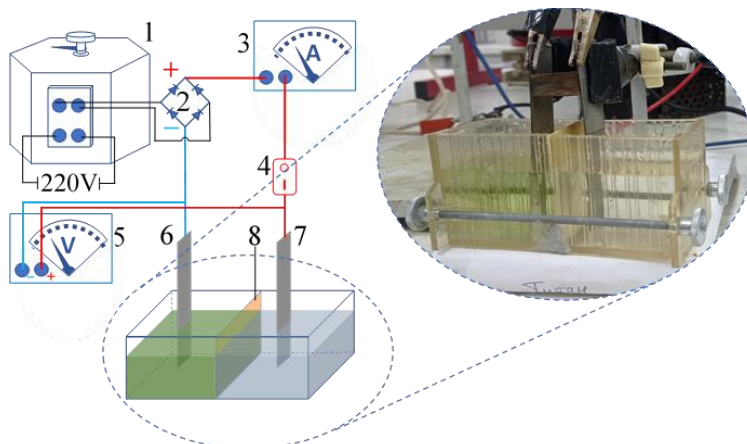
Титан табиғатта таралуы бойынша 9-орында. Жер қыртысындағы салмақ мөлшері 0.57% [3]. Табиғатта кең таралса да, қазіргі таңда оның қымбат металдар санатына енуінің себебі – титан өндірісі түрлі технологиялық қиындықтармен және үлкен шығындармен іске асырылады. Осы себепті титан қалдықтарын өңдеу және оларды пайдаға асыру – өзекті мәселелердің бірі. Бірақ қалдықтарды өңдеу біраз қиындықтар туғызады, себебі титанның балқу температурасы және агрессивті орталарға тұрақтылығы өте жоғары [4].

Титанның фторсутек қышқылды ортадағы электрохимиялық еруіне байланысты жұмыстар мен әдебиеттер жоқтың қасы, дегенмен басқа қышқылдармен қышқылданған фторидті ортадағы титанның анодтық еруі бойынша бірқатар жұмыстар бар [5-6]. Осы электрохимиялық еру нәтижесінде алынуы күтілетін титан фторидтерінің қасиеттеріне байланысты еңбектер де бар. Мысалы, Р. М. Джебасти және Р. Видия өз зерттеулерінде титан фторидтерінің механикалық қасиеттерін [7], ал, С. Канг TiF_3 және $TiCl_3$ ұнтақтарының сутегімен әрекеттесу белсенділігін жан-жақты зерттеген [8]. Сондай-ақ, титанның түрлі ортадағы анодтық еруінің заңдылықтарын зерттеу бойынша жүргізілген жұмыстар да бар [9-14]. Біздің алдыңғы зерттеулерімізді қарастыратын болсақ, күкірт қышқылымен қышқылданған калий бромиді ерітіндісінде анодты поляризацияланған титан еруінің ток бойынша шығымы 1.8%-дан аспайтыны анықталған [4]. Осы зерттеулер көтерген мәселе – титан қосылыстарын өндірістік қалдықтардан өндіру технологиясын жасау ізденісі. Ал, Ә. Б. Баешов пен оның шәкірттерінің титанға байланысты зерттеулерінің ғылыми жаңалығы – айнымалы токпен поляризацияланған титанның галогенидті ортада еруі [15, 16]. Дегенмен, титанның айнымалы токпен поляризациялануы кезіндегі процесстерді жақсы түсіну үшін тұрақты токпен поляризацияланған титанның еруін алдын-ала зерттеу қажеттілігі туындайды.

2. Эксперименттік бөлім

Титанның транспассивті анодтық еруінің ток бойынша шығымы (ТШ) мен электродтардың еру жылдамдығына (v) – ток тығыздығының (i), фторсутек қышқылы концентрациясының $[HF]$, электролиз ұзақтығының (τ) және ерітінді температурасының (t) әсері зерттелді. Анод және катод материалдары ретінде қалыңдығы 1 мм титан пластиналары қолданылды, әрқайсысының жеке ауданы – $1.27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Электролиздің катодтық және анодтық кеңістіктерінде түзілетін иондардың араласуын болдырмау мақсатында электролиз кеңістігі анионитті мембранамен (МА-40, Ресей) бөлінді. Электролит ретінде фторсутек қышқылының сулы ерітіндісі қолданылды. Фторсутек қышқылының шынымен реакцияласу қабілетіне байланысты жұмыс пластикалық ұяшықта жүргізілді. Электролизді жүзеге асыру үшін тұрақты ток көзі ретінде SUNTEK 3000ВА (Қытай) зертханалық автотрансформаторына (ЛАТР) жалғанған КВРС5010 (Қытай) диодты көпіршесі пайдаланылды. Ток тығыздығын бақылап отыру үшін СА3020-2

(Ресей) амперметрі, кернеуді өлшеу мақсатында В7-78/2 (Тайвань) вольтметрі қолданылды (сурет 1). Электродтар салмағының өзгерісін анықтауда – Shimadzu AX-200 (Жапония) аналитикалық таразы қолданылды. Электролит ерітіндісіндегі Ti^{3+} иондарының мөлшерін анықтауда перманганатометриялық анализ әдісі [2], ал Ti^{4+} иондарын анықтауда фотоколориметриялық (КФК-3, Ресей) әдіс [17] қолданылды.

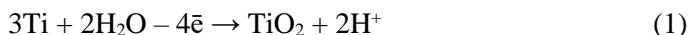


Сурет 1 – Электролиз құрылғысының принципалды схемасы: 1 – ЛАТР, 2 – диодты көпірше, 3 – амперметр, 4 – кілт, 5 – вольтметр, 6 – катод, 7 – анод, 8 – анионитті мембрана.

3. Нәтижелер және талдау

Алдын-ала жүргізілген жан-жақты зерттеулер титан электродының анодтық аумақта транспассивті ери отырып, Ti^{4+} иондарын, катодты аумақта химиялық аномальды қарқынды еруі орын алып, Ti^{3+} иондарын түзетінін көрсетті. Катодты поляризацияланған титан электродының аумағындағы электролиттің күлгін-жасыл түсі (сурет 1) және анализ нәтижелері Ti^{3+} ионының түзілетінін көрсетеді. Анодты поляризацияланған титан электродының аумағындағы электролит түсінің өзгермеуі және анализ нәтижелері Ti^{4+} ионының түзілгенін көрсетті.

Анодтық кеңістікте қалыпты жағдайда Ti^{4+} ионы ғана анықталды. Анод бетінде TiO_2 түзіліп (1-реакция), транспассивті жағдайда еритіндігін көрсетеді, демек, бұл жағдайда титанның еруі титан диоксидін тұзу стадиясы арқылы (электрохимиялық, сосын химиялық) іске асады (1, 2-реакциялар):

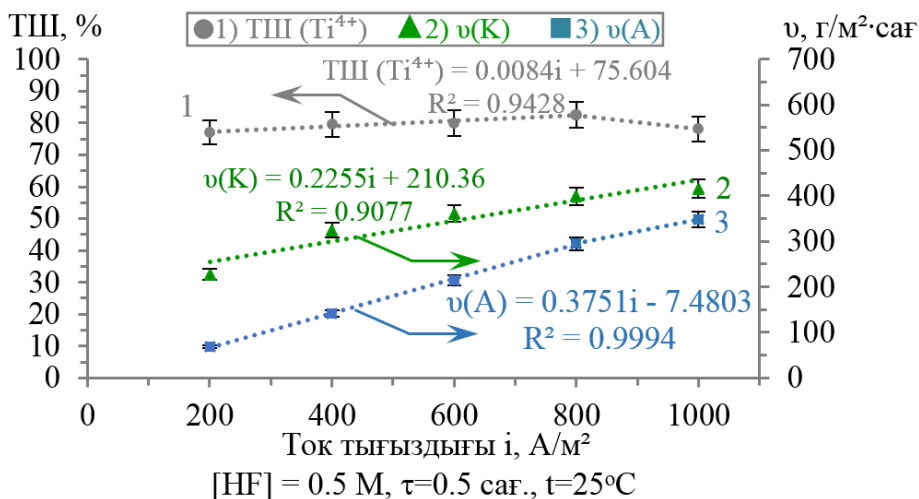


Ал, катодты поляризацияланған титанның оксидтік пленкасы тотықсызданып, оның химиялық еруі орын алады. Бұл химиялық еру

электролиз үрдісінде қосалқы реакция болып табылады, электродтардағы негізгі электрохимиялық үрдістер төмендегі теңдеулер бойынша жүреді (1 және 2-реакциялардың біріккен теңдеуі 3-реакцияда келтірілді). Осы кездегі катодтың қара түсі 4-реакцияда бөлінген сутектің титанмен әрекеттесіп титан гидридін түзуімен түсіндіріледі.

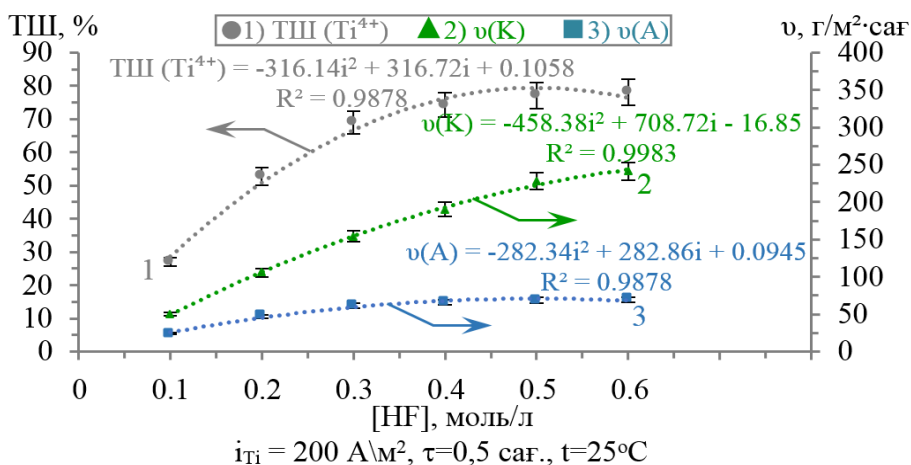


Титан электродтары 0.5 М фторсутекте тұрақты токпен поляризацияланып, ток тығыздығының анодтық ерудің ТШ мен электродтардың еру жылдамдығына әсері зерттелді (сурет 2). Ток тығыздығын 200-800 А/м² аралығында арттырғанда ТШ 77-82.5% аралығында баяу жоғарылады (1-қисық). ТШ < 100% болуы қосымша өнім – оттегінің бөлінуіне байланысты. $i < 200$ А/м² кезінде Ti^{3+} иондары да түзілді. Ал $i > 800$ А/м² кезінде ТШ төмендеді. Сондай-ақ, поляризацияланбаған (v^0) титан мен анодты $v(A)$ және катодты $v(K)$ поляризацияланған титанның 0.5 М фторсутектегі еру жылдамдықтары салыстырылды: $v^0 = 320$ г/м²·сағ., ток тығыздығын 200-1000 А/м² аралығында көтергенде $v(K)$ 228-416 г/м²·сағ. (2-қисық), ал $v(A)$ 69-349 г/м²·сағ. (3-қисық) аралығында артқан, бұл Тафель теңдеуі бойынша i жоғарылатқанда потенциалдардың теріс мәнге ығысуына байланысты.



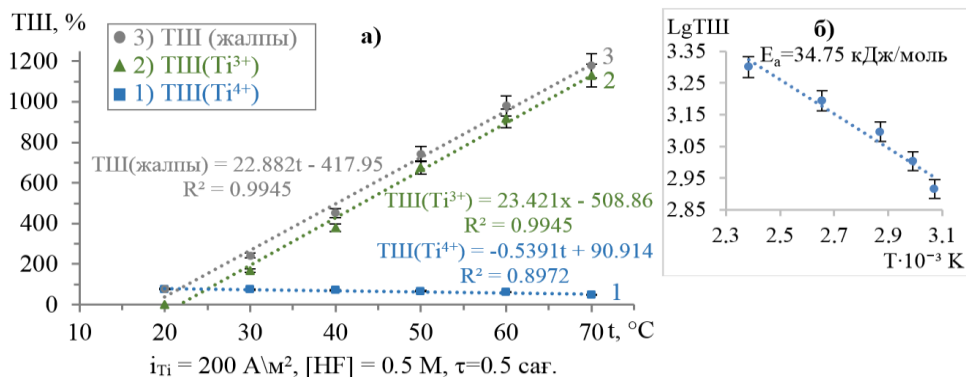
Сурет 2 – Титан электродтарының еру жылдамдығы мен анодтық еруінің ток бойынша шығымының ток тығыздығына тәуелділігі.

200 А/м² ток тығыздығында титан электродтарының еру жылдамдығы мен анодты ерудің ТШ-на *фторсутек қышқылы концентрациясының* әсері зерттелді (сурет 3). Концентрацияны 0.1-0.6 моль/л аралығында өзгерткенде титанның анодтық еруінің ТШ 27-ден 78%-ға (1-қисық), $v(K)$ 50-ден 241 г/м²·сағатқа (2-қисық), ал $v(A)$ 24-тен 70 г/м²·сағатқа дейін (3-қисық) артты. Фторсутек қышқылы концентрациясының артуы титанның еруі үшін қолайлы жағдай тудырады. Осы тәуелдікке сәйкес анодтық ерудің фторид иондары бойынша реттілігі 0.87-ге (~1) тең болатыны анықталды. Ал, фторсутектің концентрациясы 0.6 моль/л-ден жоғары болғанда, аз мөлшерде Ti^{3+} иондарының түзілгені байқалды, бұл титанның химиялық ерігенін көрсетеді.



Сурет 3 – Титан электродтарының еру жылдамдығы мен анодтық еруінің ТШ-ның фторсутек қышқылы концентрациясына тәуелділігі.

Ток тығыздығы 200 А/м², фторсутек қышқылының концентрациясы 0.5 моль/л кезіндегі анодтық ерудің ТШ мен электродтардың еру жылдамдығына электролит *температурасының* әсері зерттелді. Қалыпты жағдайда анодтық кеңістіктен Ti^{3+} иондары анықталған жоқ, температураны 25-70°C аралығында өзгерткенде анод Ti^{3+} иондарын түзе отырып, еру жылдамдығы 69-дан 1388 г/м²·сағатқа дейін артты. Ал катодтың еру жылдамдығы 228-ден 888 г/м²·сағатқа дейін жоғарылады. Анод кеңістігіндегі ерітіндінің анализі температураны жоғарылатқанда ерітіндіде бір уақытта Ti^{3+} және Ti^{4+} иондарының түзілетінін көрсетті. Температураны 25-70°C аралығында өзгерткенде Ti^{4+} иондарының түзілуінің ТШ 77%-дан 48%-ға дейін төмендеп (сурет 4 а, 1-қисық), ал Ti^{3+} иондарының жорымал ток бойынша шығымы 0%-дан 1130%-ға дейін (2-қисық) артты.



Сурет 4 – Фторсутек қышқылының сулы ерітіндісіндегі титанның анодтық поляризациялануының ТШ-ның температураға тәуелділігі.

Ток бойынша шығымның 100%-дан асуы титанның фторсутекте химиялық еруімен түсіндіріледі. Алынған мәліметтер негізінде анод ретінде қолданылған титан электродының еру процесінің активтендіру энергиясы есептелді, оның мәні 34.75 кДж/моль-ге тең болатыны анықталып, кинетикалық режимде жүретіні көрсетілді (сурет 4 б).

Ток тығыздығы 200 А/м², 0.5 М фторсутектегі титанның анодтық еруінің ТШ-на электролиз ұзақтығының әсері зерттелді. Электролизді 0.25-0.5 сағат аралығында жүргізгенде ТШ 65-тен 77%-ға дейін артып, одан әрі 2.5 сағатқа дейін жалғастырғанда 47.6%-ға дейін төмендеді. Бастапқыдағы ТШ жоғарылауы Ti⁴⁺ иондарының әсерінен электролит өткізгіштігінің артуымен, ал әрі қарай төмендеуі титанның еруіне ыңғайлы жағдай жасайтын фторсутек қышқылы концентрациясының реакция барысында азаюымен түсіндірілді. Сондай-ақ, электродтар арасындағы кернеудің бастапқыда экспоненциалды азайып (0.3 сағат ішінде 63 В-тан 14 В-қа дейін), сонан соң тұрақталатындығы (15±1 В) анықталды. Бұл титан иондарының концентрациясы жоғарылағанда өткізгіштіктің артуына байланысты.

4. Қорытынды

Фторсутек қышқылының сулы ерітіндісіндегі титанның анодтық еру заңдылығы және аномальды катодтық еру ерекшелігі көрсетілді. Титан анодының транспассивті еруінің ток бойынша шығымна негізгі параметрлердің әсері зерттелді. Электродтардың максималды еруі 1000 А/м² ток тығыздығында тіркеліп, олардың жылдамдығы $v(K) = 416 \text{ г/м}^2 \cdot \text{сағ.}$, $v(A) = 349 \text{ г/м}^2 \cdot \text{сағ.}$ болатыны анықталды. Дегенмен транспассивті анодтық ерудің ең жоғары ток бойынша шығым (82.5%) 800 А/м² ток тығыздығында 0.5 М фторсутекте бөлме температурасында тіркелді, ток тығыздығын одан әрі арттырғанда ток бойынша шығымның төмендейтіні

байқалды. Ал, фторсутек қышқылының концентрациясын арттырғанда титанның үш валентті иондар түзе отырып еруі де қоса жүретіндігі анықталды. Сапалық және сандық талдау нәтижелері анодтық аумақта бөлме температурасында тек Ti^{4+} , ал жоғарғы температурада 96% Ti^{3+} және 4% Ti^{4+} иондарының түзілетіндігін көрсетті. Ал, катодтық аумақта титанның тек Ti^{3+} иондарын түзе еритіндігі анықталды. Электродит температурасын жоғарылатқанда, химиялық ерудің қосарлана жүруіне орай электродтың еруі күрт жоғарылады. Фторсутекті ортадағы титанның анодтық еруінің реакция реті ~1-ге тең болатыны және оның активтендіру энергиясының 34.75 кДж/моль екені анықталды.

Қаржыландыру: Зерттеу Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінде ынталы ғылыми-зерттеу жұмыстарының шеңберінде жүргізілді (ҚР ҰМҒТСО тіркелген Мемлекеттік тіркелу нөмірі № 0120РКИ0185).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада ашуды талап ететін авторлар арасында мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ТРАНСПАССИВНОЕ И АНОМАЛЬНОЕ РАСТВОРЕНИЕ ТИТАНОВОГО ЭЛЕКТРОДА В ВОДНОМ РАСТВОРЕ ФТОРИСТОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ

Р.Н. Нурдиллаева¹, Ш.Д. Абдукамалов¹, А. Баешов²

¹Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда, Туркестан, Казахстан

²АО Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан

E-mail: raushan.nurdillayeva@ayu.edu.kz

Резюме. *Введение.* Одной из актуальных проблем электрохимии является повторное использование производственных отходов сравнительно дорогого металла – титана, востребованного в машиностроении, авиатехнике, космонавтике, нанотехнологии и в других отраслях промышленности. *Цель исследования:* изучение аномального катодного и транспассивного анодного растворения титанового электрода в растворе фтористоводородной кислоты. *Методы.* Показано электрохимическое растворение поляризованного постоянным током титанового электрода в растворе фтористого водорода. Электродные пространства разделены анионитовой мембраной. Установлено, что в результате электролиза в анодном пространстве образуются ионы Ti^{4+} , а в катодном пространстве – ионы Ti^{3+} вследствие химического растворения титана. *Результаты и обсуждение.* При увеличении значения плотности тока выход по току анодного растворения титана повышается, и его максимальное значение (82.5 %) наблюдается при плотности тока 800 А/м². При изменении концентрации HF от 0.1 до 0.6 моль/л выход по току возрастает, и его максимальное значение 78% наблюдалось при концентрации 0.6 моль/л. Установлено, что при повышении температуры титановый электрод растворяется, в анодном пространстве образуя ионы Ti^{3+} наряду с ионами Ti^{4+} . При этом выход по току ионов Ti^{4+} снижается до 48%, а кажущийся выход по току ионов Ti^{3+} значительно возрастает. При увеличении продолжительности электролиза до 2.5 выход по току снижается до 47.6%. *Заключение.* Определены кинетические параметры электродного процесса: порядок реакции (~1) и энергия активации (55.34 кДж/моль). Значение энергии активации указывает на протекание реакции в кинетическом режиме.

Ключевые слова: электролиз, титановый электрод, фтористоводородная кислота, фторид титана, аномальное и транспассивное растворение

Нурдиллаева Раушан Нурдиллакызы	Кандидат химических наук, профессор, Заведующая кафедрой Экология и химия
Абдукамалов Шахзад Даулетулы	Магистрант
Баешов Абдуали	Доктор химических наук, профессор, Академик НАН РК

Әдебиеттер тізімі

1. Леенсон И. А. *Большая энциклопедия химических элементов. Периодическая таблица Менделеева*. Москва, ОГИЗ; АСТ, **2014**, 168 с. ISBN 978-5-17-088424-7.
2. Никитина Н. Г., Гребенькова В. И. *Общая и неорганическая химия. В 2 частях. Ч. 2*. Москва, Юрайт, **2022**, 322 с. ISBN 978-5-534-04787-5 (ч. 2).
3. Росин И. В., Томина Л. Д. *Общая и неорганическая химия в 3 т. Т. 2. Химия s-, d- и f-элементов*. Москва, Юрайт, **2020**, 492 с. ISBN 978-5-534-02292-6 (т. 2).
4. Nurdillayeva R.N., Bayeshov A.B., Khabibullayeva Sh.H. Anodic dissolution of titanium in sulfuric acid bromide solutions. *News of NAS RK – series Chem. & Technol.*, **2020**, 1, № 439, 47-54. DOI: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.6>
5. Amrutha M.S., Fasmin F. Ramanathan S. Effect of HF concentration on anodic dissolution of titanium. *J. Electrochem. Soc.*, **2017**, 164, № 4, H188-H197. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0501704jes>
6. Mogoda A.S., Zohdy K.M. Electrochemical behavior of titanium in NaF solutions and characterization of oxide film formed on its surface. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **2020**, 15, 8070-8085. DOI: <https://doi.org/10.20964/2020.08.16>
7. Jebasty R.M., Vidya R. Mechanical properties of multifunctional TiF₄ from first-principles calculations. *ACS Biomaterials. Sci. & Engin.*, **2019**, 5, № 4, 2001-2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.8b01391>
8. Kang S., Klebanoff L. E., Baker A. A., Cowgill D. F., Stavila V., Lee J. R. I., Nielsen M. H., Ray K. G., Liu Y. S., Wood B. C. Assessing the reactivity of TiCl₃ and TiF₃ with hydrogen Int. *J. Hydrogen Energy*, **2018**, 43, № 31, 14507-14519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.128>
9. Baehre D., Ernst A., Weißhaar K., Natter H., Stolpe M., Busch R. Electrochemical dissolution behavior of titanium and titanium-based alloys in different electrolytes. *18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining*. Procedia CIRP 42, **2016**, 137-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.208>
10. Mohan L., Dennis C., Padmapriya N., Anandan C., Rajendran N. Effect of electrolyte temperature and anodization time on formation of TiO₂ nanotubes for biomedical applications. *Materials Today Commun.*, **2020**, 23, 101103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101103>
11. Ocampo R.A., Dennis C., Padmapriya N., Anandan C., Rajendran N., Echeverría F.E. Effect of the anodization parameters on TiO₂ nanotubes characteristics produced in aqueous electrolytes with CMC. *Applied Surf. Sci.*, **2019**, 469, 994-1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.097>
12. Winiarski J., Tylus W., Pawlyta M., Szczygieł B. Titanium anodization in deep eutectic solvents: The effect of anodizing time on the morphology and structure of anodic layers. *Appl. Surf. Sci.*, **2022**, 577, 151892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151892>
13. Jayasree A. Ivanovski S., Gulati K. ON or OFF: Triggered therapies from anodized nano-engineered titanium implants. *J. Controlled Release*, **2021**, 333, 521-535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.03.020>
14. Gulati K., Martinez R., Czerwinski M., Domanska M. M. Understanding the influence of electrolyte aging in electrochemical anodization of titanium. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2022**, 302, 102615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102615>
15. Nurdillayeva R. N., Bayeshov A. B., Abdikerim A. Zh., Zhylysbayeva G. N. Electrochemical dissolution of titanium electrodes polarized by alternating current in a hydrobromic acid aqueous solution. *Chem. J. Kaz.*, **2022**, 1, № 77, 25-36. DOI: <https://doi.org/10.51580/2022-1/2710-1185.54>
16. Баешов А., Изтлеуов Г., Баешова С.А., Абдувалиева У. *Электрохимическое поведение молибдена, вольфрама и титана при поляризации нестационарными токами*. Монография, Шымкент, «Нұрлы бейне», **2020**, 316 с.
17. Никитина Н. Г., Борисов А. Г., Хаханина Т. И. *Аналитическая химия и физико-химические методы анализа*. Москва, Юрайт, **2020**, 394 с. ISBN 978-5-534-00427-4.

References

1. Leenson I. A. *Bol'shaya enciklopediya himicheskikh elementov. Periodicheskaya tablitsa Mendeleeva* [The great encyclopedia of chemical elements. Mendeleev's periodic table]. Moscow, OGIz: AST, **2014**, 168 p. (In Russ.). ISBN 978-5-17-088424-7
2. Nikitina N. G., Grebenkova V. I. *Obshaya I neorganicheskaya himiya. V 2 chastyah. Ch. 2.* [General and inorganic chemistry. In 2 parts. Part 2]. Moscow, Yurayt, **2022**, 322 p. ISBN 978-5-534-04787-5 (part 2). (In Russ).
3. Rosin I. V., Tomina L. D. *Obshaya I neorganicheskaya himiya v 3 t. T. 2. Himiya s-, d- i f- elementov.* [General and inorganic chemistry in 3 vol. Vol. 2. Chemistry of s-, d- and f-elements]. Moscow, Yurayt, **2020**, 492 p. ISBN 978-5-534-02292-6 (vol. 2). (In Russ.).
4. Nurdillayeva R. N., Bayeshov A. B., Khabibullayeva Sh. H. Anodic dissolution of titanium in sulfuric acid bromide solutions. *News of NAS RK – series Chem. & Technol.*, **2020**, 1, № 439, 47-54. DOI: <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1491.6>
5. Amrutha M.S., Fasmin F., Ramanathan S. Effect of HF concentration on anodic dissolution of titanium. *J. Electrochem. Soc.*, **2017**, 164, № 4, H188-H197. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0501704jes>
6. Mogoda A.S., Zohdy K.M. Electrochemical behavior of titanium in NaF solutions and characterization of oxide film formed on its surface. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **2020**, 15, 8070-8085. DOI: <https://doi.org/10.20964/2020.08.16>
7. Jebasty R.M., Vidya R. Mechanical properties of multifunctional TiF₄ from first-principles calculations. *ACS Biomaterials. Sci. & Engin.*, **2019**, 5, № 4, 2001-2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.8b01391>
8. Kang S., Klebanoff L.E., Baker A.A., Cowgill D.F., Stavila V., Lee J. R.I., Nielsen M.H., Ray K.G., Liu Y.S., Wood B.C. Assessing the reactivity of TiCl₃ and TiF₃ with hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy*, **2018**, 43, № 31, 14507-14519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.128>
9. Baehre D., Ernst A., Weißhaar K., Natter H., Stolpe M., Busch R. Electrochemical dissolution behavior of titanium and titanium-based alloys in different electrolytes. *18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining*. Procedia CIRP 42, **2016**, 137-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.208>
10. Mohan L., Dennis C., Padmapriya N., Anandan C., Rajendran N. Effect of electrolyte temperature and anodization time on formation of TiO₂ nanotubes for biomedical applications. *Materials Today Commun.*, **2020**, 23, 101103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101103>
11. Ocampo R.A., Dennis C., Padmapriya N., Anandan C., Rajendran N., Echeverría F.E. Effect of the anodization parameters on TiO₂ nanotubes characteristics produced in aqueous electrolytes with CMC. *Applied Surf. Sci.*, **2019**, 469, 994-1006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.097>
12. Winiarski J., Tylus W., Pawlyta M., Szczygieł B. Titanium anodization in deep eutectic solvents: The effect of anodizing time on the morphology and structure of anodic layers. *Applied Surf. Sci.*, **2022**, 577, 151892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151892>
13. Jayasree A., Ivanovski S., Gulati K. ON or OFF: Triggered therapies from anodized nano-engineered titanium implants. *J. Controlled Release*, **2021**, 333, 521-535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.03.020>
14. Gulati K., Martinez R., Czerwinski M., Domanska M. M. Understanding the influence of electrolyte aging in electrochemical anodization of titanium. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2022**, 302, 102615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102615>
15. Nurdillayeva R.N., Bayeshov A.B., Abdikerim A.Zh., Zhylysbayeva G.N. Electrochemical dissolution of titanium electrodes polarized by alternating current in a hydrobromic acid aqueous solution. *Chem. J. Kazakhstan*, **2022**, 1, № 77, 25-36. DOI: <https://doi.org/10.51580/2022-1/2710-1185.54>
16. Bayeshov A., Iztileuov G., Bayeshova S. A., Abduvaliyeva U. Elektrohimicheskoe povedenie molibdena, vol'frama i titana pri polyarizacii nestacionarnymi tokami. [Electrochemical behavior of molybdenum, tungsten and titanium upon polarization by nonstationary currents]. Monograph, Shymkent, "Nurly Beine", **2020**, 316 p. (In Russ)
17. Nikitina N.G., Borisov A.G., Khakhanina T.I. *Analiticheskaya himiya i fiziko-himicheskie metody analiza.* [Analytical chemistry and physico-chemical methods of analysis]. Moscow, Yurayt, **2020**, 394 p. ISBN 978-5-534-00427-4. (In Russ.).