

Information about the authors

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: 0000-0001-5221-1772.

Merey Kanatovich Kasengaliyev – Master's student of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: mkasengaliyev@bk.ru

Temirlan Nurlanuly Umyrzhhan – Senior Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: 0009-0008-9111-1975.

Akbota Ryspekovna Khazhidinova – PhD, Acting Associate Professor, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering»; Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: 0000-0001-8802-1559.

Поступила в редакцию 28.05.2024

Поступила после доработки 30.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-46

FTAXP: 55.22.23



Н. Серікбекулы^{1*}, К.Д. Орманбеков^{1,2}, А.Б. Шынарбек^{1,2}, А.Ж. Жасұлан^{1,2}

¹Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

²«Материалдар бетінің түрлендіру» ғылыми орталығы

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Физкультурная к-сі, 4в

*e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

ТИТАНДЫ МИКРОДОҒАЛЫҚ ТОТЫҚТЫРУ КЕЗІНДЕГІ ЖАБЫННЫҢ ПАЙДА БОЛУ ПРОЦЕСІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Бұл жұмыста титанның бетінде микродоғалық тотығу (МДТ) арқылы түзілетін жабындардың құрылымдық-фазалық күйі зерттеледі. Зерттеу барысында процесс параметрлері мен электролит құрамы өзгертін бірқатар тәжірибелер жүргізілді. Әртүрлі аналитикалық әдістерді, соның ішінде электронды микроскопияны және рентгендік дифракцияны қолдана отырып, жабындардың морфологиялық және құрылымдық өзгерістері талданды. Титанның микродоғалық тотығуы анодты потенциостатикалық режимде 10 минут бойы фосфор қышқылы, натрий ортофосфаты, калий гидроксиді және гидроксиапатит негізіндегі әртүрлі электролиттерде жүргізілді. МДТ-дан кейін беттің микрогеометриясы өзгермейді, яғни. титан бетінде қалыңдығы 5-7 мкм болатын жұқа жабын түзіледі. Сканерлеуші электронды микроскопия көмегімен жабындардың бетін зерттеу нәтижелері барлық зерттелетін жабындардың ең кеуекті беті калий гидроксиді (КОН) қосылған электролитте түзілген жабындарда табылғанын көрсетті. Рентгендік дифракция нәтижелері анатаза мен рутил жабындардың негізгі фазасы екенін көрсетті. Электролит құрамы МДТ процесінде негізгі факторлардың бірі болып табылады. Зерттеу нәтижелері оңтайлы қасиеттері бар жабындарды алу үшін МДТ процесінің параметрлерін оңтайландырудың маңыздылығын көрсетеді. Сонымен қатар, олар әртүрлі қолданбалар үшін, соның ішінде биомедициналық инженерия үшін практикалық маңызды болып табылады, мұнда беріктік пен тозуға төзімділіктің жоғарылауы импланттардың ұзақ өмір сүруі мен тиімділігінің кілті болып табылады. Зерттеу нәтижелері титанның микродоғалық тотығуы кезінде жабын түзілу процесін терең түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: микродоғалық тотығу, кальций-фосфатты жабын, физикалық-механикалық қасиеттер, кедір-бұдырлық, қаттылық, электролит.

Кіріспе.

Микродоғалық тотығу (МДТ) – анодтау процесінен шыққан, негізінен металды материалдардың бетін электрохимиялық өңдеудің салыстырмалы түрде жаңа әдісі. Титанның микродоғалық тотығуы кезінде жабын түзілу процесін зерттеу материалдардың беттік

модификациясы саласындағы маңызды бағыт болып табылады. Титан және оның қорытпалары жоғары беріктігі, жеңілдігі және химиялық төзімділігі арқасында әртүрлі өнеркәсіп салаларында, соның ішінде аэроғарыш, авиация, медицина және энергетика салаларында кеңінен қолданылады. Титанның микродоғалық тотығуы кезінде оның бетінде жұқа оксидті жабындар түзіледі. Бұл жабындардың коррозияға төзімділігі, трибологиялық төзімділігі, құрылымы мен химиялық құрамын өзгерту мүмкіндігі сияқты бірқатар пайдалы қасиеттер бар. Дегенмен, бұл жабындарды қалыптастыру процесі күрделі және егжей-тегжейлі зерттеуді қажет етеді. МДТ көп функциялы оксидті-керамикалық жабындарды қалыптастыруға мүмкіндік береді, бұл бөлшектердің жұмыс беттерінің беріктігі мен қорғаныс қасиеттерін айтарлықтай арттырады.

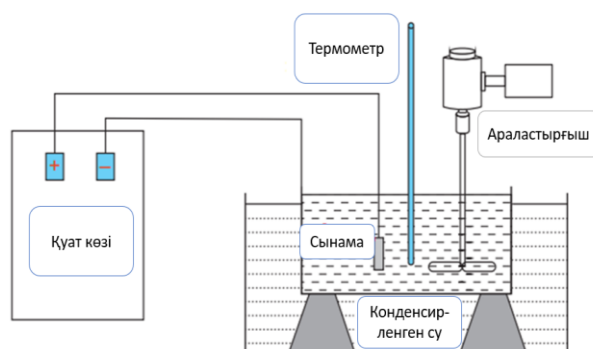
МДТ технологиясы негізінен титан, магний, тантал және алюминий негізіндегі қорытпалардың бетінде оксидті-керамикалық жабындарды қалыптастыру үшін қолданылады [1-3]. Соңғы жылдары қарқынды дамып келе жатқан МДТ әдісімен оксидті керамикалық жабындарды өндіру механикалық және трибологиялық қасиеттері жоғары композициялық материалдарды алуға мүмкіндік береді [4,5]. Титан қорытпаларының тозуға төзімділігі төмен, бірақ өндірісте, автомобиль жасауда химия және биомедициналық өнеркәсіпте кеңінен қолданылады, бұл МДТ әдісін қолдану аясын ұлғайтады [6-9]. Оксидті керамикалық МДТ жабындарының өсу механизмі туралы заманауи идеяларды талдау жабындардың құрылымы мен қасиеттері бірнеше параметрлерге байланысты деген қорытындыға әкелді. [10]. Жабындардың құрылымы мен қасиеттеріне әсер ететін негізгі параметрлер электролит құрамы болып табылады. Жабындардың қасиеттеріне әсер ететін технологиялық факторларға кернеу, ток, жиілік және уақыт параметрлері де кіруі мүмкін. Нәтижесінде МДТ процесінің параметрлеріне байланысты оксид-керамикалық жабындарды қалыптастыру кезінде пайда болатын заңдылықтарды орнату үшін зерттеулер қажет. Титанның микродоғалық тотығуы кезінде жабындардың құрамында титан оксидінің кристалдық фазалары пайда болады [17,18]. Зерттеулер көрсеткендей, рутил мен анатазаның болуы микродоғалық тотығу кезінде титан бетіндегі оксидті жабындардың өсуіне және морфологиясына әсер етеді. Рутил ықшам кристалдық құрылымы арқасында коррозияға төзімділігі жоғары тығыз және тегіс жабындардың пайда болуына ықпал етеді. Екінші жағынан, анатаза өзінің ашық және кеуекті құрылымымен бетінің ауданы үлкенірек және жоғары адгезиясы бар жабындардың пайда болуына ықпал ете алады.

Бұл жұмыстың мақсаты BT1-0 титанның бетінде МДТ әдісімен алынған жабындардың құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасуына электролит құрамының әсерін зерттеу болды.

Зерттеу әдістері

МДТ әдісімен жабындарды қолдану Guintek «APS – 77300» қондырғысы арқылы жүзеге асырылды. Guintek «APS - 77300» МДТ құрылғысы бағдарламаланатын айнымалы ток көзінен, гальваникалық салқындату ваннасынан, электродтар жиынтығынан және электрофизикалық жану параметрлерін бақылауға және басқаруға арналған бағдарламалық құралдан, сонымен қатар кинетикалық тәуелділікті алуға мүмкіндік беретін цифрлық осциллографтан тұрады. МДТ жабыны анодтық потенциостатикалық режимде алынды. 1-суретте МДТ қондырғысының схемалық диаграммасы көрсетілген. Анод ретінде электролитке батырылған вентильді метал қолданылады. Электролиттік элемент және катод ретінде тот баспайтын болаттан жасалған ыдыс таңдалды. Электр тогы МДТ қуат көзінен беріледі. Электролит температурасы 40°C-тан төмен конденсацияланған суды пайдалану арқылы басқарылады. Температураны ұстап тұру жоғары сапалы оксидті қабат алу үшін қажет [11-12]. Температураны ұстап тұру үшін электролит контейнеріне мыс түтік орап, sl-1500/aurora-pro/ салқындату станциясына қосылды.

Қойылған мақсаттарға сәйкес зерттеу нысаны ретінде титан BT1-0 таңдалды. МДТ-ға дейін титан сынамаларының беті жабындауға дайындалды (ұнтақтау және құмдау жұмыстары). 1-кестеде титанды МДТ үшін электролиттің режимдері мен құрамы көрсетілген. Электролиттің химиялық құрамы металдың пассивациясының және диэлектриктердің ыдырауының жеделдеуіне және соның салдары ретінде жұқа оқшаулағыш пленканың пайда болуына айтарлықтай әсер етеді. Осының негізінде титанның МДТ үшін әртүрлі электролиттер (натрий фосфаты, натрий гидрофосфаты, калий гидроксиді және гидроксипатит) таңдалды.

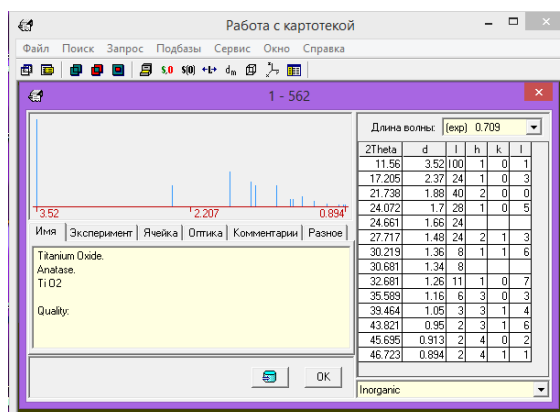


Сурет 1 – Тәжірибелік МДТ қондырғысының схемалық сұлбасы

Кесте 1 – Титанды МДТ режимі мен электролиттің құрамы.

Электролиттің құрамы	МДТ режимі				Ток түрі
	Жиілік, Гц	Кернеу, В	Уақыт, мин	Ток тығыздығы, А/см ²	
Na ₃ PO ₄ (6 г), гидроксиапатит(0,75г), КОН (2 г)	100	200	10	20	Айнымалы
Na ₃ HPO ₄ (5 г) және гидроксиапатит (0,5 г)	50	300	10	20	
Na ₃ PO ₄ (5 г) және гидроксиапатит(0,5 г)	200	300	10	12,6	

Беттік морфология JSM-6390 LVJEOL төмен вакуумды сканерлеуші электронды микроскоптың көмегімен зерттелді. Зерттелетін үлгілердің рентгендік фазалық талдауы XpertPRO дифрактометрінде CuKα сәулеленуінде 40 кВ үдеткіш кернеуде және 30 мА анодтық токта жүргізілді. Дифракция үлгілері PDWin дерекқорының көмегімен қолмен түсіндірілді (2-сурет). Қаптаманың кедір-бұдырлығы Model 130 профилеометрі арқылы өлшенді.

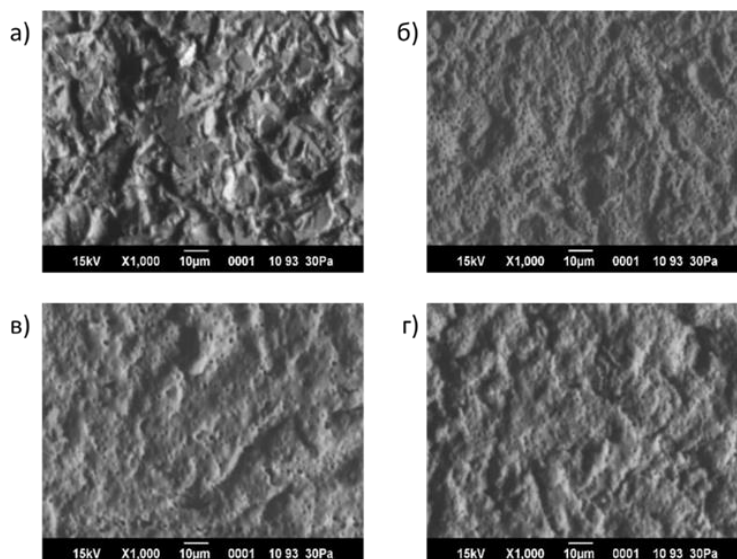


Сурет 2 – Ұнтақты дифрактометрияның деректер базасы

Нәтиже және талдаулар.

МДТ әдісімен түзілетін жабын бетінің морфологиясы (өлшемі, кеуектер саны, сызаттардың болуы) электролит пен субстраттың құрамына байланысты. Дегенмен, барлық МДТ жабындары электрлік бұзылулар үшін арналар және газ көпіршіктерінің бетіне шығуының салдары болып табылатын кеуектердің болуымен сипатталады. МДТ жабындарының микроқұрылымы типтік кеукті құрылымға ие (3-сурет). Бұл процесс кезінде титанның бетінде электр доғасының әсерінен жұқа оксид қабаты пайда болады. Титан МДТ негізгі әсерлерінің бірі бетінде микрорельефтің пайда болуы болып табылады. Жабындау процесінің бастапқы кезеңдерінде оксид бөлшектерімен қапталған шағын шығыңқылардың пайда болуы байқалады. Процесс дамыған сайын рельеф айқынырақ болып, жабынға енетін микротүтікшелер мен тесіктер пайда болады. Бетінде «островкалардың» пайда болуы да байқалады. Бұл островкалардың тотығу процесі қарқынды жүретін жерлерді білдіреді, нәтижесінде қоршаған бетпен салыстырғанда тығыз және қалың жабын пайда болады. Титанның микродоғалық тотығуы кезінде құрылымдағы морфологиялық өзгерістер

жабындардың адгезия, трибологиялық тұрақтылық және коррозияға төзімділік сияқты қасиеттерін анықтауда маңызды рөл атқара алады. Бұл өзгерістерді түсіну жабынды қалыптастыру процесін оңтайландыруға және әртүрлі өнеркәсіптік қолданбалар үшін қажетті сипаттамалары бар материалдарды әзірлеуге көмектеседі.



Сурет 3 – Әртүрлі электролиттерде МДТ жабындарын жасауға дейінгі және кейінгі үлгі бетінің микроқұрылымы:
а) титан (бастапқы); б) $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{A} + \text{KOH}$; в) $\text{Na}_3\text{HPO}_4 + \text{H}_2\text{A}$; г) $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{A}$

РЭМ көмегімен алынған әртүрлі құрамдағы электролиттерде түзілген жабындары бар сынамалардың бетінің кескіндерін талдау калий гидроксиді (KOH) қосылған электролитте түзілген жабындардың барлық зерттелген жабындардың ішіндегі ең кеуекті беті бар екенін көрсетті. Электролитке KOH қосу және ток тығыздығын арттыру МДТ кезінде газдың бөліну процесінің қарқындылығының артуына ықпал етуі мүмкін. Айта кету керек, электролиттің тұрақтылығы үшін сілтілі орта қажет, оның қажетті рН әдетте калий гидроксиді KOH немесе натрий NaOH көмегімен жасалады. Электролит компоненттерінің әсерін зерттеуге арналған тәжірибелер электролиттегі KOH немесе NaOH концентрациясы 3 г/л-ден төмен болғанда процестің энергия сыйымдылығының артуына әкелетінін көрсетті. KOH немесе NaOH мөлшері 6 г/л-ден жоғары болғанда электролит өте агрессивті болады, бұл бетінің қышқылдануына және оксид қабатының қалыңдығының төмендеуіне әкеледі [13].

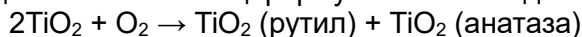
Беткі қабаттың жағдайы құм себу нәтижесінде пайда болған кедір-бұдыр мен толқындылықтың болуымен сипатталады. МДТ-дан кейін беттің микрогеометриясы өзгермейді, яғни титан бетінде қалыңдығы 5-7 мкм болатын жұқа жабын түзіледі. Жабынға дейін және кейін жүргізілген профилометриялық өлшеулер беттің кедір-бұдырында айтарлықтай өзгерісті анықтаған жоқ (2 кесте).

Кесте 2 – МДТ-ға дейінгі және кейінгі сынама бетінің кедір-бұдырлығы

Сынамалар	Кедір-бұдырлық R_a , мкм
Жабын жасауға дейін	$1,65 \pm 0,22$
$\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{KOH} + \text{GA}$ электролитіндегі МДТ-жабыны	$1,57 \pm 0,32$
$\text{Na}_3\text{HPO}_4 + \text{GA}$ электролитіндегі МДТ-жабыны	$1,68 \pm 0,25$
$\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{GA}$ электролитіндегі МДТ-жабыны	$1,47 \pm 0,39$

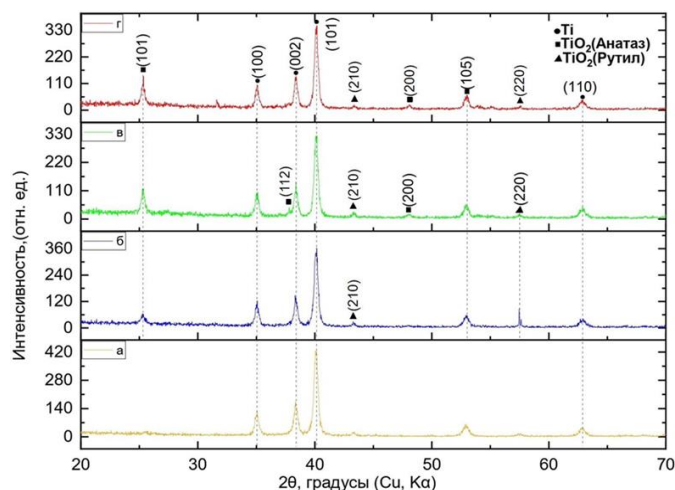
4-суретте әртүрлі электролиттерде алынған МДТ жабындарының рентгендік фазалық талдауының нәтижелері көрсетілген. Титанның (субстраттан) рентгендік дифракция шыңдары және рутил мен анатазаның кристалдық фазалары тіркелді. Анатаза, рутил және брукит титан оксидінің (TiO_2) негізгі үш полиморфы болып табылады [14]. Қолданылатын кернеу мен ток тығыздығының жоғарылауымен температура жоғарылайды және анатаза 815°C

температурада рутилге айналады, бұл TiO_2 жоғары температурадағы тұрақты фазасы [15,16]. $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{HA} + \text{KOH}$ электролитінде алынған жабындардың фазалық құрамы титан диоксидінің жоғары температуралық модификациясы – рутилден тұрады, яғни. ерітіндіге KOH қосу МДТ процесінің энергия сыйымдылығының артуына әкеледі. KOH ерітіндісінің негізгі рөлі титан диоксидінің гидратация процесі мен рутил мен анатазаның түзілуі үшін оңтайлы жағдайларды қамтамасыз ету болып табылады. KOH ерітіндісі титан диоксидінің тиімді гидратациясына және қажетті фазалардың пайда болуына ықпал ететін сілтілі ортаны қамтамасыз ете отырып, реакция ортасының рН деңгейін реттей алады. Титанның микрофаалық тотығуы кезінде рутил мен анатазаның түзілуінің жалпы химиялық формуласын келесідей көрсетуге болады:



Бұл реакциядағы KOH рөлі титанмен және оттегімен әрекеттесу үшін гидроксил иондарын (OH^-) қамтамасыз ету болып табылады. Гидроксид иондары тотығу реакциясының катализаторы ретінде қызмет етеді, рутил мен анатазаның түзілуіне ықпал етеді.

Дегенмен, рутил мен анатазаның түзілу реакциясы күрделі процесс және ол тек KOH ерітіндісін ғана емес, сонымен қатар температура, реакция уақыты және реагенттердің концентрациясы сияқты басқа факторларды қамтуы мүмкін екенін атап өткен жөн. Сондықтан нақты реакция жағдайлары мен компоненттер арасындағы нақты қатынас нақты тәжірибеге немесе процеске байланысты өзгеруі мүмкін.



Сурет 4 – Әртүрлі электролиттерде МДТ жабындарын жасауға дейінгі және кейінгі үлгінің рентгендік дифракциялық үлгісі:

а) титан (бастапқы); б) $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{ГА} + \text{KOH}$; в) $\text{Na}_3\text{HPO}_4 + \text{ГА}$; д) $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{ГА}$

Қорытынды. Титан бетіндегі микрофаалық тотығуды қолдана отырып, рутил және анатаза түріндегі титан диоксиді TiO_2 жабындары алынды. Фосфор қышқылы, натрий ортофосфаты, калий гидроксиді және гидроксипатит негізіндегі әртүрлі электролиттерде 10 минут ішінде анодты режимде МДТ жабындарының түзілу процесі зерттелді. Рентгендік фазалық талдау нәтижелері зерттелетін жабындардың фазалық құрамында айтарлықтай өзгерістерді көрсетпеді. Электролит компоненттерінің әсерін зерттеуге арналған эксперименттер ерітіндіге KOH қосу процестің энергия сыйымдылығының жоғарылауына әкелетінін және нәтижесінде рутилдік модификациядағы титан диоксиді түзілетінін, сонымен қатар газдың қарқындылығына байланысты екенін көрсетті. эволюция процесінде жабындардың кеуекті құрылымы қалыптасады. Осылайша, электролит құрамы МДТ процесінде анықтаушы факторлардың бірі болып табылады. Сонымен қатар, МДТ кезінде технологиялық режимдерді және электролит құрамын өзгерту арқылы кеуектілігі бақыланатын жабынды алуға болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Владимиров Б.В. Микродуговое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / Б.В. Владимиров и др. // Электронная обработка материалов. – 2014. – № 3. – С. 1-38.
2. Батышев К.А. Микродуговое оксидирование алюминиевых сплавов / К.А. Батышев, А.И. Батышев // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. – 2016. – С. 212-214.

3. Нечаев Г.Г. Микродуговое оксидирование титановых сплавов в щелочных электролитах / Г.Г. Нечаев // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 453-455.
4. Esmaili S. Коррозионное поведение и биосовместимость покрытий с оксидом графена, полученных методом микродугового оксидирования на магниевом сплаве / S. Esmaili et al // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 122-138.
5. Савушкина С.В. Исследование керамикоподобных покрытий, формируемых на алюминиевых композитах методом микродугового оксидирования / С.В. Савушкина и др. // XIV-я Международная научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия». 29-30 ноября 2016 года. – Litres, 2022. – С. 87.
6. Ситдигов В.М. Снижение токсичности отработавших газов в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания / В.М. Ситдигов и др. // Труды НАМИ. – 2023. – № 4. – С. 83-95.
7. Ramazanova Z.M. Effect of microarc oxidation on the properties of aluminum alloy samples / Z.M. Ramazanova et al // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra. – 2023. – Т. 325, №. 2. – С. 39-46.
8. Xiao-ming W. Bioactive submicron-pore design of microarc oxidation coating on Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting method / W. Xiao-ming, Zh. Fu-qin // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 444. – P. 128696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128696>.
9. Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium / Q. Guo et al // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 386. – P. 125454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125454>.
10. Дударева Н.Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности / Н.Ю. Дударева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – №. 3(56). – С. 217-222.
11. Шаталов В.К. Микродуговое оксидирование поверхностей изделий вне ванны / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, А.А. Блатов // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – № 3. – С. 1-14.
12. Дударева Н.Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности / Н.Ю. Дударева // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17, № 3(56). – С. 217-222.
13. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Ред. Суминов И.В. В 2х томах. Т. 2. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.
14. Choe H.C. Electrochemical characteristics of Ti-6Al-4V after plasma electrolytic oxidation in solutions containing Ca, P, and Zn ions / H.C. Choe, W.A. Brantley // Surf. Coat. Technol. – 2017. – № 320. P. 458-466.
15. Effect of graphene oxide additive on tribocorrosion behavior of MAO coatings prepared on Ti6Al4V alloy / Y. Zuo et al // Appl. Surf. Sci. – 2019. – № 480. – P. 26-34.
16. Corrosion protection of Ti6Al4V by a composite coating with a plasma electrolytic oxidation layer and sol-gel layer filled with graphene oxide / T. Li et al // Prog. Org. Coat. – 2020. – № 144. – P. 105632.
17. Нечаев Г.Г. Баротермическое воздействие микроразрядов на покрытие, формируемое в процессе микродугового оксидирования / Г.Г. Нечаев, В.А. Кошуро // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 5. – С. 29-34.
18. Изменение фазово-структурного состояния и повышение механических характеристик газотермических покрытий на титане после проведения микродугового оксидирования / Кошуро В.А. и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13, №. 4. – С. 501-505.

References

1. Vladimirov B.V. Mikrodogovoe oksidirovanie magnievvykh splavov (obzor) / B.V. Vladimirov i dr. // Ehlektronnaya obrabotka materialov. – 2014. – № 3. – S. 1-38. (In Russian).
2. Batyshev K.A. Mikrodogovoe oksidirovanie alyuminievvykh splavov / K.A. Batyshev, A.I. Batyshev // Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i liteinom proizvodstve. – 2016. – S. 212-214. (In Russian).

3. Nechaev G.G. Mikrodugovoe oksidirovanie titanovykh splavov v shchelochnykh ehlektrolitakh / G.G. Nechaev // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy. – 2012. – T. 14, № 4. – S. 453-455. (In Russian).
4. Esmaili S. Korrozionnoe povedenie i biosovmestimost' pokrytii s oksidom grafena, poluchennykh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya na magnievom splave / S. Esmaili et al // Fizicheskaya mezomekhanika. – 2022. – T. 25, № 4. – S. 122-138. (In Russian).
5. Savushkina S.V. Issledovanie keramikopodobnykh pokrytii, formiruemykh na alyuminievykh kompozitakh metodom mikrodugovogo oksidirovaniya / S.V. Savushkina i dr. // XIV-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Bystrozakalennyye materialy i pokrytiYA». 29-30 noyabrya 2016 goda. – Litres, 2022. – S. 87. (In Russian).
6. Sitdikov V.M. Snizhenie toksichnosti otrabotavshikh gazov v kamere sgoraniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya / V.M. Sitdikov i dr. // Trudy NAMI. – 2023. – № 4. – S. 83-95. (In Russian).
7. Ramazanova Z.M. Effect of microarc oxidation on the properties of aluminum alloy samples / Z.M. Ramazanova et al // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra. – 2023. – T. 325, №. 2. – S. 39- 46. (In English).
8. Xiao-ming W. Bioactive submicron-pore design of microarc oxidation coating on Ti6Al4V alloy prepared by selective laser melting method / W. Xiao-ming, Zh. Fu-qin // Surface and Coatings Technology. – 2022. – Vol. 444. – R. 128696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128696>. (In English).
9. Synthesis, corrosion, and wear resistance of a black microarc oxidation coating on pure titanium / Q. Guo et al // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 386. – R. 125454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125454>. (In English).
10. Dudareva N.YU. Vliyanie rezhimov mikrodugovogo oksidirovaniya na svoistva formiruemoi poverkhnosti / N.YU. Dudareva // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – T. 17. – №. 3(56). – S. 217-222. (In Russian).
11. Shatalov V.K. Mikrodugovoe oksidirovanie poverkhnostei izdelii vne vannы / V.K. Shatalov, A.O. Shtokal, A.A. Blatov // Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii. – 2015. – № 3. – S. 1-14. (In Russian).
12. Dudareva N.YU. Vliyanie rezhimov mikrodugovogo oksidirovaniya na svoistva formiruemoi poverkhnosti / N.YU. Dudareva // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – T. 17, № 3(56). – S. 217-222. (In Russian).
13. Plazmenno- ehlektroliticheskoe modifitsirovaniye poverkhnosti metallov i splavov / Red. Suminov I.V. V 2kh tomakh. T. 2. – M.: Tekhnosfera, 2011. – 512 s. (In Russian).
14. Choe H.C. Electrochemical characteristics of Ti-6Al-4V after plasma electrolytic oxidation in solutions containing Ca, P, and Zn ions / H.C. Choe, W.A. Brantley // Surf. Coat. Technol. – 2017. – № 320. – R. 458-466. (In English).
15. Effect of graphene oxide additive on tribocorrosion behavior of MAO coatings prepared on Ti6Al4V alloy / Y. Zuo et al // Appl. Surf. Sci. – 2019. – № 480. – R. 26-34. (In English).
16. Corrosion protection of Ti6Al4V by a composite coating with a plasma electrolytic oxidation layer and sol-gel layer filled with graphene oxide / T. Li et al // Prog. Org. Coat. – 2020. – № 144. – R. 105632. (In English).
17. Nechaev G.G. Barotermicheskoe vozdeistvie mikrorazryadov na pokrytie, formiruemoe v protsesse mikrodugovogo oksidirovaniya / G.G. Nechaev, V.A. Koshuro // Fizika i khimiya obrabotki materialov. – 2015. – № 5. – S. 29-34. (In Russian).
18. Izmeneniye fazovo-strukturnogo sostoyaniya i povysheniye mekhanicheskikh kharakteristik gazotermicheskikh pokrytii na titane posle provedeniya mikrodugovogo oksidirovaniya / Koshuro V.A. i dr. // Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. – 2016. – T. 13, №. 4. – S. 501-505. (In Russian).

Қаржыландыру туралы ақпарат

Жұмыс Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің AR13068451 «Плазма-электролиттік тотығу арқылы титан диоксидінің нанобөлшектері бар көп функционалды кальций фосфатты жабындарын дайындау» гранатты қаржыландыру жобасы аясында жүзеге асырылды.

Н. Серікбекұлы^{1,2*}, К.Д. Орманбеков^{1,2}, А.Б. Шынарбек^{1,2}, А.Ж. Жасұлан^{1,2}

¹Университет имени Шакарима города Семей,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Научный центр «Модификация поверхности материалов»

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Физкультурная, 4в

*e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИМИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ ТИТАНА

В данной работе исследовано структурно-фазовое состояние покрытий, сформированных на поверхности титана методом микродугового оксидирования (МДО). В ходе исследований был проведен ряд экспериментов, в которых изменялись параметры процесса и состав электролита. Морфологические и структурные изменения покрытий были проанализированы с использованием различных аналитических методов, включая электронную микроскопию и рентгеновскую дифракцию. Микродуговое оксидирование титана проводили в анодном потенциостатическом режиме в течение 10 минут в различных электролитах на основе фосфорной кислоты, ортофосфата натрия, гидроксида калия и гидроксиапатита. После МДО микрогеометрия поверхности не меняется, т.е. на поверхности титана образуется тонкое покрытие толщиной 5-7 микрон. Результаты исследования поверхности покрытий с помощью сканирующей электронной микроскопии показали, что наиболее пористая поверхность из всех исследованных покрытий обнаружена у покрытий, сформированных в электролите с добавлением гидроксида калия (KOH). Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что основной фазой покрытий являются анатаз и рутил. Состав электролита является одним из основных факторов в процессе МДО. Результаты исследований позволяют глубоко понять процесс формирования покрытия при микродуговом оксидировании титана.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, кальций-фосфатное покрытие, физико-механические свойства, шероховатость, твердость, электролит.

N. Serikbekuly^{1,2*}, K.D. Ormanbekov^{1,2}, A.B. Shynarbek^{1,2}, A.Zh. Zhassulan^{1,2}

¹Shakarim University of Semey,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20 A

²Scientific center «Surface modification of materials»

Republic of Kazakhstan, Semey, Fizkulturnaya str., 4b

*e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

STUDY OF THE PROCESS OF COATING FORMATION DURING MICROARC OXIDATION OF TITANIUM

In this work, the structural-phase state of coatings formed on the surface of titanium by microarc oxidation (MAO) was studied. During the research, a number of experiments were carried out in which the process parameters and electrolyte composition were changed. Morphological and structural changes of the coatings were analyzed using various analytical methods, including electron microscopy and x-ray diffraction. Microarc oxidation of titanium was carried out in anodic potentiostatic mode for 10 minutes in various electrolytes based on phosphoric acid, sodium orthophosphate, potassium hydroxide and hydroxyapatite. After MDO, the microgeometry of the surface does not change, i.e. a thin coating 5-7 microns thick is formed on the titanium surface. The results of studying the surface of coatings using scanning electron microscopy showed that the most porous surface of all the studied coatings was found in coatings formed in an electrolyte with the addition of potassium hydroxide (KOH). The results of X-ray diffraction analysis showed that the main phase of the coatings are anatase and rutile. Electrolyte composition is one of the main factors in the MAO process. The research results allow us to deeply understand the process of coating formation during microarc oxidation of titanium.

Key words: microarc oxidation, calcium phosphate coating, physical and mechanical properties, roughness, hardness, electrolyte.

Авторлар туралы мәліметтер

Нұржан Серікбекұлы* – «Техникалық физика» мамандығының магистранты; «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы; «материалдар бетінің модификациясы» FO кіші ғылыми қызметкері; e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – жаратылыстану ғылымдарының магистрі; «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы; «Материалдар бетінің түрлендіру» FO аға ғылыми қызметкері; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – техника ғылымдарының магистрі; «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы; «материалдар бетін өзгерту» FO кіші ғылыми қызметкері; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru

Айбек Бақытжанұлы Шынарбек – «Машина жасау» мамандығының магистранты; «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы; «материалдар бетінің модификациясы» FO кіші ғылыми қызметкері; e-mail: shinarbekov16@mail.ru

Сведения об авторах

Нұржан Серікбекұлы* – магистрант специальности «Техническая физика»; НАО «Университета имени Шакарима города Семей», Республика Казахстан; Младший научный сотрудник НЦ «Модификация поверхности материалов»; e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

Айнур Жасулановна Жасулан – магистр естественных наук НАО «Университета имени Шакарима города Семей», Республика Казахстан; Старший научный сотрудник НЦ «Модификация поверхности материалов»; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Куаныш Даулетович Орманбеков – магистр технических наук НАО «Университета имени Шакарима города Семей», Республика Казахстан; младший научный сотрудник НЦ «Модификация поверхности материалов»; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru

Айбек Бакытжанович Шынарбек – магистрант специальности «Машиностроение»; НАО «Университета имени Шакарима города Семей», Республика Казахстан; младший научный сотрудник НЦ «Модификация поверхности материалов»; e-mail: shinarbekov16@mail.ru

Information about the authors

Nurzhan Serikbekuly* – Master's student of the specialty «Technical Physics»; NAO «Shakarim University of Semey», Republic of Kazakhstan; Junior researcher of the NC «Modification of the surface of materials»; e-mail: nurzhan.serikbek@gmail.com

Ainur Zhassulankyzy Zhassulan – Master of natural science; "Shakarim University of Semey", Republic of Kazakhstan; senior researcher of the NC "Modification of the surface of materials"; e-mail: ainur.99.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Kuanysh Dauletovich Ormanbekov – Master of technical science; NAO «Shakarim University of Semey», Republic of Kazakhstan; Junior researcher of the NC «Modification of the surface of materials»; e-mail: ormanbekov_k@mail.ru

Aibek Bakhytzhanyky Shynarbek – Master's student of the specialty «Mechanical Engineering»; NAO «Shakarim University of Semey», Republic of Kazakhstan; Junior researcher of the NC «Modification of the surface of materials»; e-mail: shinarbekov16@mail.ru

Редакцияға енуі 02.04.2024

Жариялауға қабылданды 04.05.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-47

МРНТИ: 55.13.17



А.А. Шаханов¹, А.А. Шаханов¹, А.И. Купреенко², С.Х. Исаев²

¹Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина"

010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62

²ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

243365, Российская Федерация, с. Кокино, ул. Советская, 2а

*e-mail: shahanov_aa@mail.ru

МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС СУШИЛКИ

Аннотация. Необходимо получить сухое вещество, удалив из него всю влагу. Сделать это можно с помощью разных устройств, но наиболее распространенными из них в промышленности и науке являются сушильные шкафы. Они позволяют быстро удалить лишнюю влагу из материалов путем ее испарения и вытяжения из камер. При этом необходимо рассчитать объем сухого воздуха и энергии, необходимых для процесса. Для решения этих задач требуется рассчитать материальный и тепловой баланс сушки.

Они представляют собой измерение и вычисление количества материала и энергии, затрачиваемых на нее.