

ӘОЖ 669.2/.8:621.762  
FTAXP 29.19.16

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-4-374-385>

<sup>1</sup>**Ескермесов Д.К.,**

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-2206-8132,  
e-mail: dyeskermessov@edu.ektu.kz

<sup>2</sup>**Лукос С.С.,**

PhD, ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0001-9668-0079,  
e-mail: c.c.lukose@northumbria.ac.uk

<sup>2</sup>**Биркетт М.,**

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-6135-6639,  
e-mail: martin.birkett@northumbria.ac.uk

<sup>3</sup>**Пазылбек С.А.,**

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-2318-9155,  
e-mail: sapargali.pa@gmail.com

<sup>1</sup>**Ескермесова А.С.,**

магистр, кіші ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0009-0004-8454-3615,  
e-mail: ardakeskermesova@gmail.com

<sup>1\*</sup>**Төлеуханова Ж.Т.**

магистр, аға оқытушы, ORCID ID: 0009-0002-9254-3901,  
\*e-mail: ztoleukhanova@ektu.kz

<sup>1</sup>Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,  
Өскемен қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Нортумбрия университеті, Ньюкасл қ., Ұлыбритания

<sup>3</sup>Ж.А. Тәшенев атындағы университет, Шымкент қ., Қазақстан

## **ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖАҚСАРТЫЛҒАН БИОМЕДИЦИНАЛЫҚ ҚОЛДАНУҒА АРНАЛҒАН ТИТАН-АЛТЫН (Ti-Au) НЕГІЗІНДЕГІ ЖҰҚА ЖАБЫНДАРДЫ АЛУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ**

### **Аңдатпа**

Бұл ғылыми мақалада 450 °C жоғарғы температурада тұрақты (DC) және жоғары жиілікті (RF) ток режимінде вакуумдық ортада PVD (магнетрондық бүрку) әдісімен алынған Ti-Au негізіндегі жұқа жабын бетінің құрылымы мен қасиеттері зерттелді. NanoPVD қондырғысымен алынған жұқа жабындардың қалыңдықтары орташа есеппен 1 мкм құрады. Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, жабындардың химиялық құрамы, микроқұрылымы және қасиеттері магнетрондық бүрку әдісінің технологиялық параметрлеріне тығыз байланысты екені анықталды. Ti-Au жабындарының микроқұрылымы мен механикалық қасиеттеріне Ag және Cu қоспаларының әсері растрлы электронды микроскопия (SEM), энергия-дисперсиялық микроанализ (EDX) және рентгендік дифрактометрия (XRD) әдістері арқылы зерттелді. Жабын беттің кедір-бұдырлық сипаттамалары атомдық-күштік микроскопия (AFM) арқылы талданды, ал жабындардың қасиеттеріндегі өзгерістерді жан-жақты бағалау үшін нанокаттылық пен трибологиялық сынақтар жүргізілді. PVD әдісімен  $Ti_6Al_4V$  төсеніш бетінің модификациясы оның тозуға төзімділігін арттырып, үйкеліс коэффициентін төмендететіні көрсетілді. Рентгендік фазалық талдау нәтижелері бойынша, алынған жұқа жабындардың трибологиялық қасиеттерінің жақсаруы, тікелей негізгі  $Ti_3Au$  фазасының түзілуімен және оның мөлшерінің артуымен байланысты екені анықталды.

**Тірек сөздер:** жабын және жұқа қабықшалар, магнетронды бүрку жүйесі, морфология, қаттылық, элементтік құрам.

## Кіріспе

Соңғы онжылдықтарда биомедициналық материалдар саласында, әсіресе медициналық имплантаттар мен хирургиялық құралдарға арналған биоүйлесімді және тозуға төзімді инновациялық жабындар әзірлеу технологиялары қарқынды дамып келеді [1–5]. Бұл бағытта жүргізіліп жатқан зерттеулер адамның ағзасымен ұзақ мерзімді өзара әрекеттесу кезінде жабын материалдарының сенімділігі мен тұрақтылығын қамтамасыз етуге бағытталған. Аталған саладағы ғылыми және инженерлік ізденістердің басым бағыты ретінде титан (Ti) және оның қорытпалары негізінде синтезделген жұқа қабықшалы жабындарды қолдануға ерекше назар аударылып отыр [6–10]. Бұл таңдау олардың жоғары коррозияға төзімділігімен, биоинерттілігімен, сондай-ақ жақсы физикалық-механикалық сипаттамаларымен (жоғары қаттылық, тығыздық, адгезия) тікелей байланысты [11, 12]. Сонымен қатар, мұндай жабындардың функционалдық қасиеттерін (мысалы, тозуға қарсы тұрақтылық, үйкеліс коэффициенті, беткі энергия және антибактериалдық белсенділік) мақсатты түрде жақсарту – олардың химиялық құрамын, микро- және нанокұрылымдық ерекшеліктерін, сондай-ақ бүрку технологиясының параметрлерін оңтайландыру арқылы мүмкін болады [13–15]. Бұл тәсілдер жабындардың қолданбалы тиімділігін арттырып, оларды биомедициналық мақсаттарда кеңінен пайдалануға жол ашады.

Осы тұрғыда титан мен алтынның қорытпаларына, атап айтқанда Ti-Au қосылуына ерекше назар аударылады, себебі олар жоғары биосәйкестікпен және қаттылықпен ерекшеленеді. Соңғы зерттеулер мұндай қорытпалардың жоғары механикалық төзімділікке ие болатынын көрсетіп отыр, бұл оларды имплантаттарға арналған жабындар үшін тиімді үміткерлер қатарына қосады. Ti-Au құрылымына Ag және Cu микроэлементтерін енгізу арқылы тек антимикробтық қасиеттерге қол жеткізіп қана қоймай, сонымен қатар тозуға төзімділік сипаттамаларын да жақсартуға болады. Ал бұл тәсіл – тозуға төзімділік пен антимикробтық тиімділікті бір уақытта арттыру – медициналық құрылғылардың қызмет ету мерзімін ұзарту және инфекциялық асқыну қаупін азайту үшін перспективті бағыт.

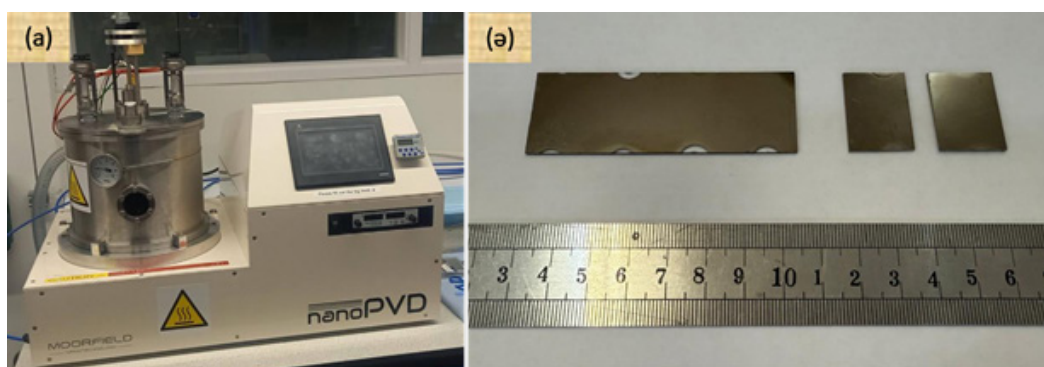
Жоғарыда айтылған жұқа қабықшалы жабындарды синтездеу технологиясына келер болсақ – магнетронды бүрку (PVD) немесе газды фазадан физикалық тұндыру мұндай жабындарды алудың ең перспективті әдістерінің бірі екенін дәлелдеп отыр, себебі ол жабынның құрылымы, құрамы және қалыңдығы үстінен жоғары деңгейде бақылау жүргізуге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, көпмақсатты нысаналарды қолдану және тұндыру режимдерін оңтайландыру жабынның морфологиясы мен фазалық құрамын басқаруға мүмкіндік береді, оны биомедициналық қолданудың нақты талаптарына бейімдеуге жағдай жасайды [16–29].

Бұл ғылыми зерттеу жұмысы инновациялық заманауи технология ретінде мойындалған «NanoPVD» қондырғысы арқылы синтезделген Ti-Au негізіндегі жұқа қабықшалы жабындарды және олардың құрамына Ag (күміс) мен Cu (мыс) элементтерін қосымша енгізу арқылы алынған модификацияланған жүйелерді кешенді түрде зерттеуге бағытталған. Жұмыстың басты мақсаты – алынған жабындардың микроқұрылымдық ерекшеліктерін, физикалық-механикалық сипаттамаларын (қаттылық, тозуға төзімділік, үйкеліс коэффициенті және т.б.), сондай-ақ электрохимиялық коррозиялық төзімділігін жүйелі түрде бағалау. Сонымен қатар, зерттеу барысында алынған нәтижелер негізінде осы жабындарды биомедициналық имплантаттардың беттерін модификациялау және функционалдық инженерлік жабындар ретінде қолдану мүмкіндіктерін қарастыру. Бұл бағыттағы жұмыстар биосәйкестілік, коррозиялық тұрақтылық және беткі морфологияны басқару тұрғысынан перспективті шешімдерді айқындауға мүмкіндік береді, әрі биомедицина мен материалтану салаларындағы қолданбалы зерттеулер үшін өзекті.

## Материалдар мен әдістер

Бұл зерттеуде химиялық құрамды дәл бақылауға мүмкіндік беретін және үлкен аумаққа біртекті тығыз жұқа жабын түзу қабілеті бар синтездеу әдісі ретінде (NanoPVD) иннова-

циялық магнетрондық бүрку әдісі қолданылды. Магнетронды (PVD) бүрку әдісімен Ti-AuX (X=Ag, Cu) негізіндегі жұқа жабындарды синтездеп алу үшін төсеніш ретінде зертханалық шыны және  $Ti_6Al_4V$  жоғары сапалы медициналық қорытпа қолданылды. Аталған жұқа жабындар Ұлыбританияның Moorefield Nanotechnology Ltd компаниясының «NanoPVD-S10A» магнетрондық бүрку жүйесі арқылы синтезделді (1а-суретті қараңыз).  $76 \times 25 \times 1$  мм<sup>3</sup> өлшемдегі  $Ti_6Al_4V$  төсеніштер SiC қағазын (P240-тен P4000-ге дейінгі кедір-бұдырлықпен) пайдалана отырып, жылтырату станогында өңделіп, бетінің кедір-бұдырлығы 40 нм-ден аспайтын тегіс күйге дейін жылтыратылды және кез келген бағытта бетінің кедір-бұдырлығы өлшеу жүйесі Alicona Infinite Focus арқылы тексерілді. Содан кейін жылтыратылған  $Ti_6Al_4V$  төсеніштер бірдей өлшемді ұсақ бөліктерге ( $19 \times 25$  мм<sup>2</sup>) кесіліп, стандартты зертханалық әйнек пластиналарымен ( $76 \times 25 \times 1$  мм<sup>3</sup>) бірге 5:1 қатынасындағы су ерітіндісіндегі Decon 90 тазарту ерітіндісімен, кейін ультрадыбыстық ваннада, сондай-ақ изопропанол (IPA) мен ацетонмен жуу арқылы беткі ластанулардан тазартылды (1ә-сурет). Осыдан кейін төсеніштер құрғақ азотпен кептіріліп, плазма көзіне дейінгі арақашықтығы 100 мм болатын күйде бүрку камерасына орналастырылды және жұқа қабықшалы жабын тұндыру процесі кезінде тұрақты 5 айн/мин жылдамдықпен айналдырылды. Жұқа қабықшалы жабын тұндыру үшін бір-біріне симметриялы орналастырылған екі магнетрон қолданылып, олар бір мезгілде екі бүтін материалды шашырата отырып, интерметаллиттік қосылыстардың түзілуін қамтамасыз ететін бірлескен бүрку режимінде жұмыс істеді. Бір магнетрон диаметрі 50,8 мм және қалыңдығы 6,35 мм болатын мозаикалық титан (Ti) нысанымен жабдықталып, (DC) тұрақты ток көзіне қосылды, ал екінші магнетрон дәл осындай өлшемдегі стандартты алтын (Au) нысанымен жабдықталып, (RF) радиожиілікті қуат көзіне қосылды. Мозаикалық титан (Ti) нысаны легирлеуші элементтер Ag және Cu-ды орналастыру үшін шашырату бетінде диаметрі 3 мм және тереңдігі 4 мм болатын 8 түйік тесігі бар етіп жасалды.



Сурет 1 – «NanoPVD-S10A» қондырғысының сыртқы көрінісі (а) және алынған әртүрлі төсеніштердегі Ti-Au негізіндегі жұқа жабындар (ә)  
(зертханалық әйнек және  $Ti_6Al_4V$  қорытпасы)

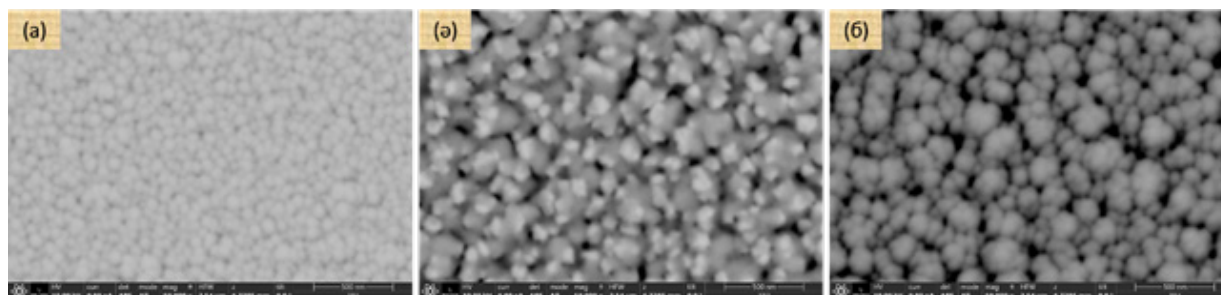
NanoPVD әдісімен алынған жұқа қабықшалы Ti-Au негізіндегі жабынның химиялық құрамын талдау және беткі морфологиясын зерттеу үшін рентгендік энергия-дисперсиялық спектрометрия, сондай-ақ растрлық электронды микроскопия (SEM/EDX) әдістері қолданылды. Зерттеулер «Scios 2, ThermoScientific» және «TESCAN VEGA» құрылғыларында 10–15 кВ кернеулер аралықтарында жүргізілді. Жабындардың кристалдық құрылымын зерттеу үшін рентгендік дифракция (XRD) әдісі қолданылды. Зерттеулер «D8 VENTURE» (BRUKER) негізгі рентгендік дифрактометрі мен қосымша «MiniFlex II» (RIGAKU) үстелдік шағын рентгендік дифрактометр арқылы 40 кВ кернеу мен 40 мА токта, мыс анодымен ( $\lambda = 1,5418$  Å) жүргізілді. Сканерлеу қадамы  $0,05^\circ$ , әр қадамда ұстау уақыты 0,2 с құрады, ал бұрыштар диапазоны  $20^\circ$ -нан  $90^\circ$ -қа дейін болды. Жабындардың беттік морфологиясын мұқият нанодәрежеде зерттеу үшін атомдық-күштік микроскопия (AFM) әдісі қолданылды.

AFM талдауы плазмалық тазартудан өткен бастапқы күйіндегі үлгілерде жүргізілді. Бейнелеу жұмыстарының барлығы тербелмелі режимде орындалды және әрбір үлгі үшін кемінде 3 аймақ сканерленді. Жабындардың наноқаттылығын анықтау «FISCHERSCOPE HM2000 S» жүйесімен жүргізілді.

Ti-Au негізіндегі жабындарының бетінің үйкеліс коэффициентін анықтау үшін трибологиялық зерттеулер  $26,14^{\circ}\text{C}$  бөлме температурасымен  $71,44\%$  ылғалдылықта ауа атмосферасында «шар-диск» схемасы бойынша «Tribometer TRB<sup>3</sup>» (ANTON PAAR) құрылғысында жүргізілді. Үлгілердің беті зерттеу алдында  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  сұйықтығымен тиянақты тазартылды. Қарсы дене ретінде диаметрі 6 мм болатын, престелген сертификатталған 100Cr6 материалынан жасалған шар қолданылды. Шарға түсірілген жүктеме 1 Н, сырғу жылдамдығы – 1 см/с, тозу ізінің радиусы – 2,5 мм, ал қарсы дененің жалпы жүріп өткен жолы 70 м болды. Талдау шарттары халықаралық ASTM G133-95 және ASTM G99 стандарттарына сәйкес жүргізілді.

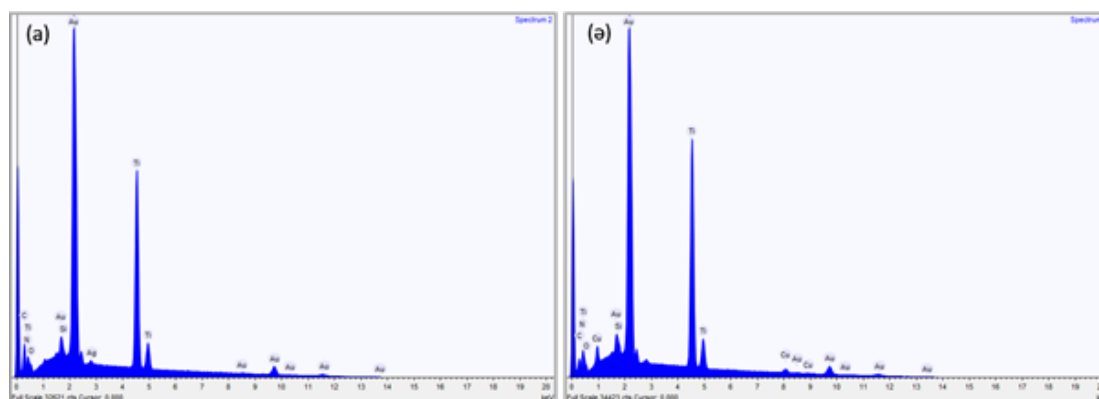
### Нәтижелер мен талқылау

Растрлы-сканерлеуші электронды микроскопиядан (SEM) алынған деректерге сәйкес, PVD әдісімен титан-алтын (Ti-Au) негізіндегі жұқа қабықшалы жабындарды синтездеу беттің морфологиясын қалыптастыруда белгілі бір ерекшеліктерге ие екені айқындалды. 2-суретте «NanoPVD-S10A» магнетрондық бүрку жүйесі арқылы синтезделген Ti-Au негізіндегі жұқа қабықшалы жабындар бетінің SEM-суреті көрсетілген. Жабын вакуумды-термиялық бүрку әдістеріне тән типтік құрылымға ие: жоғары тығыздық, біртекті құрамы мен өте жұқа қабат қалыңдығы байқалады. Көріп тұрғанымыздай, беткі қабат анық реттелген құрылым мен құрамға ие. PVD кезінде таза титаннан алынған жұқа қабықша жақсы бағдарланған, үшбұрышты пирамида тәрізді түйіршіктер түзетіні белгілі [16, 27], ал Ti-Au жұқа қабықшалары өте тығыз күмбез тәрізді түйіршіктерге ие болатыны алынған нәтижелерден байқалды (2а-сурет). SEM-көріністерінен Ag және Cu элементтерінің аз мөлшерде қосылуы (2ә, б-суреттер, сәйкесінше) Ti-Au матрицасының сұр түсті фонында біркелкі таралған ашық түсті қырлы көп бұрышты (2ә-сурет) және сфералық (2б-сурет) қосымша түйіршіктердің түзілуіне алып келетінін көрсетеді. Осындай қырлы-дөңгелек түйіршіктер бұған дейін мыс (Cu) титанды (Ti) матрицаға қосылған кезде де байқалған болатын [28, 29]. Азот ( $\text{N}_2$ ) газымен қосымша өңделген Ti-Au негізіндегі үлгілер, негізгі матрица түйіршіктерінің ұсақталуы (нанотүйіршіктерге айналуы), азотпен қосылыс түзілгендіктен SEM зерртеуіне спецификалық (азот әсерінен информативті ақпаратты дұрыс қабылдамау) кедергі келтіруінің себебінен бұл жерде көрсетілмеді. SEM бақылаулары жабындардың морфологиялық құрылымында түбегейлі өзгерістер орын алғанын көрсетті. Сонымен қатар, азотпен әрекеттесу нәтижесінде түзілген қосылыстардың болуы SEM әдісінің ажыратымдылық мүмкіндіктеріне әсер етіп, сурет контрастының төмендеуіне және бейненің бұлдырауына (diffusion effect) әкелгені байқалады. Бұл азоттың жабын құрылымына терең еніп, морфологиялық және электрондық қасиеттерге елеулі әсер ететінін айғақтайды.



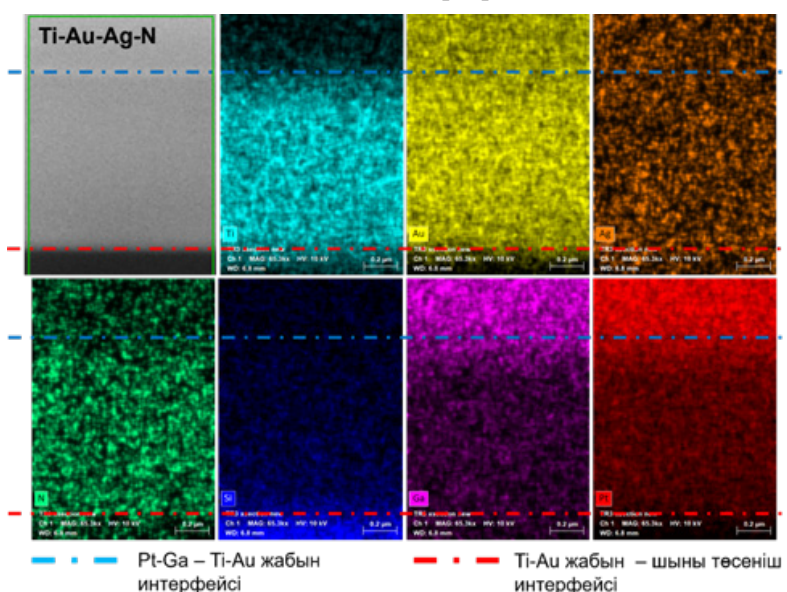
Сурет 2 – Титан-Алтын (Ti-Au) негізіндегі жұқа жабындар бетінің SEM-көріністері:  
(а) – таза Ti-Au, (ә) – күміс (Ag) қосылған Ti-Au және (б) – мыс (Cu) қосылған Ti-Au

Ti-Au негізіндегі жабындардың химиялық құрамын сипаттау мақсатында энергия-дисперсиялық рентгендік спектроскопия (EDX) әдісімен элементтік талдау жүргізілді. Бұл талдау жабын бетінің бес түрлі аймағында алынған бес өлшеу нүктесінің орташа мәндеріне негізделіп жүргізіліп, нәтижелері 3-суретте гистограмма және 1-кесте ретінде көрсетілді. Бұдан бөлек, жабындардың көлденең қималарына бағытталған EDX-талдау жасалды, ол кескіндегі жасыл түспен белгіленген ауданның толық көлемін қамтыды. Көлденең қима бойынша жүргізілген талдау нәтижелері барлық үлгілерде титан (Ti) мен алтын (Au) элементтерінің салыстырмалы түрде біркелкі таралғанын көрсетті. Бұдан бөлек, жабындардың көлденең қималарына бағытталған EDX-талдау жасалды, ол кескіндегі жасыл түспен белгіленген ауданның толық көлемін қамтыды. Көлденең қима бойынша жүргізілген талдау нәтижелері барлық үлгілерде титан (Ti) мен алтын (Au) элементтерінің салыстырмалы түрде біркелкі таралғанын көрсетті.



Сурет 3 – Азот ( $N_2$ ) газымен өңделген Ti-Au жабындарының SEM/EDX-талдау көрінісі:  
(а) – күміс (Ag) қосылған және (б) – мыс (Cu) қосылған (элементтік талдау жабынның бетіне жүргізілген)

Азот ( $N_2$ ) газымен иондық-бұрку процесі кезінде вакуумдық камерада жүретін физикалық-химиялық өзара әрекеттесу нәтижесінде Ag және Cu элементтерінің бүкіл жабын көлеміне біркелкі енуіне ықпал ететінін көрсетеді (4-сурет). Аталған деректер азотпен ( $N_2$ ) модификациялау жабын құрамындағы легирлеуші элементтердің таралуын оңтайландыруға мүмкіндік беретін тиімді тәсіл екенін дәлелдейді [30].



Сурет 4 – Азот ( $N_2$ ) газымен өңделген Ag қосылған Ti-Au негізіндегі жабынның көлденең қимасына EDX-талдау нәтижесі

Жүргізілген элементтік талдау нәтижелері бойынша алынған спектрлерде оттегі (O) мен кремний (Si) элементтерінің байқалуы, негізінен, EDX талдауы үшін қолданылған зертханалық төсеніштердің құрамымен түсіндіріледі. Атап айтқанда, бұл элементтердің пайда болуы кремний диоксидінен ( $\text{SiO}_2$ ) жасалған арнайы шыны төсеніштердің әсерінен туындаған. Сонымен қатар, үлгілердің көлденең қималарын алу барысында қолданылған фокусталған иондық шокпен біріктірілген сканерлейтін электрондық микроскопия (FIB-SEM) әдісінің нәтижесінде жабын бетінде галлий (Ga) және платина (Pt) элементтері тіркелді. Бұл элементтер GaPt негізіндегі уақытша өткізгіш қабат ретінде жабын бетіне әдейі енгізілген, ол FIB әдісімен өңделетін аймақты дәл локализациялау және иондық бүрку кезінде жабынның бүлінуін алдын алу мақсатында қолданылатын өте танымал әдіс болып есептеледі [30].

Жабындардың морфологиялық сипаттамаларын жан-жақты зерттеу мақсатында, SEM нәтижелерімен қатар, Ti-Au жабындардың беткі рельефінің кеңістіктік құрылымын, микро-және наномасштаптағы ерекшеліктерін, сондай-ақ олардың орташа кедір-бұдырлық көрсеткіштерін ( $R_q$ ) нақты әрі сапалы бағалау үшін қосымша зерттеулер атомдық-күштік микроскопия (AFM) әдісі арқылы жүргізілді. Бұл әдіс жабынның үшөлшемді беткі профилін жоғары дәлдікпен визуализациялауға және беткі құрылымдық элементтердің өлшемдері мен таралу сипатын сандық түрде сипаттауға мүмкіндік береді.

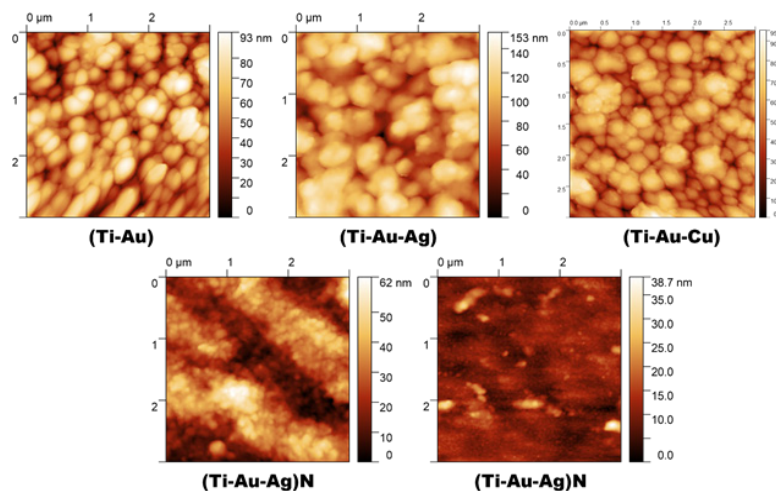
Кесте 1 – Ti-Au негізіндегі жабындарды SEM/EDX әдісі арқылы элементтік талдау кезіндегі алынған нәтижелері

| Үлгі № | Орташа қалыңдығы (нм) | EDX (ат. %) Орт. 5 нүкте мен 5 түрлі аймақтағы орташа мәні |      |     |      |      |       | Ti/Au қатынасы |
|--------|-----------------------|------------------------------------------------------------|------|-----|------|------|-------|----------------|
|        |                       | Ti                                                         | Au   | Ag  | Cu   | N    | Total |                |
| 1      | 1167                  | 73,3                                                       | 26,7 | -   | -    | -    | 100   | 2,7            |
| 2      | 1044                  | 65,2                                                       | 32,4 | 2,4 | -    | -    | 100   | 2,0            |
| 3      | 1046                  | 60,7                                                       | 27,7 | 0,2 | -    | 11,4 | 100   | 2,2            |
| 4      | 1549                  | 64,6                                                       | 19,8 | -   | 15,6 | -    | 100   | 3,3            |
| 5      | 1101                  | 63,2                                                       | 20,1 | -   | 2,9  | 13,8 | 100   | 3,1            |

5-суретте Ti-Au негізіндегі жұқа қабықшалы жабындардың беткі морфологиясын сипаттайтын AFM бейнелері ұсынылған, олар жабындардың бетінің біртектілігі мен құрылымдық элементтерінің өлшемдік сипаттамалары туралы қосымша мәлімет береді. AFM арқылы алынған талдау нәтижелері күміс (Ag) элементін қосу жабын бетінің морфологиясына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Атап айтқанда, 4-суретте ұсынылғандай, Ag қоспасының енгізілуі нәтижесінде жабын бетінде ірілеу рельефті және көпқырлы құрылымдардың түзілуі байқалды. Бұл морфологиялық өзгерістер жабын бетінің энергиясының қайта таралуымен және кристалдану үдерістерінің өзгеруімен байланысты болуы мүмкін. AFM әдісімен алынған жоғары ажыратымдылықтағы беткі бейнелер жабын бетінің салыстырмалы түрде жоғары біртектілігін және төмен кедір-бұдырлық мәндерін көрсетті, бұл SEM арқылы алынған морфологиялық бақылауларды растайды. Жабындардың беткі кедір-бұдырлығы бойынша өлшенген орташа мәндері келесідей болды: 1-ші үлгі (Ti-Au) үшін –  $13,4 \pm 1,0$  нм; 2-ші үлгі (Ti-Au-Ag) үшін –  $17,4 \pm 1,8$  нм; 3-ші үлгі (Ti-Au-Ag-N) үшін –  $8,7 \pm 2,4$  нм; 4-ші үлгі (Ti-Au-Cu) үшін –  $13,5 \pm 2,7$  нм; және 5-ші үлгі (Ti-Au-Cu-N) үшін –  $2,3 \pm 0,8$  нм. Бұл деректер Ag, Cu және  $\text{N}_2$  (азот) өңдеудің жабындардың беткі құрылымына және микрогеометриялық сипаттамаларына елеулі әсер ететінін дәлелдейді.

SEM/EDX және AFM әдістерімен келтірілген нәтижелерге сүйене отырып, күміс (Ag), мыс (Cu) бөлшектерінің агломерациясы Ti-Au негізіндегі жұқа қабықшалар мен жабындардың құрылымдық-морфологиялық сипаттамаларына айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Атап айтқанда, Ag мен Cu бөлшектерінің бірігуі (агломерациясы) кристаллдық торлардың бағдарлану бағытын өзгертуге, кристаллдық түйін пішіні мен өлшемін қайта қалыптастыруға, қабықшаның көлденең қимасының құрылымын түрлендіруге, оның тығыздығына және беткі

кедір-бұдырлық деңгейіне тікелей ықпал етеді. Бұл құбылыс жабынның жалпы физикалық-механикалық қасиеттерін анықтайтын негізгі факторлардың бірі және легирлеуші элементтердің морфологиялық тұрақтылыққа әсерін түсіну тұрғысынан маңызды ғылыми және практикалық мәнге ие.



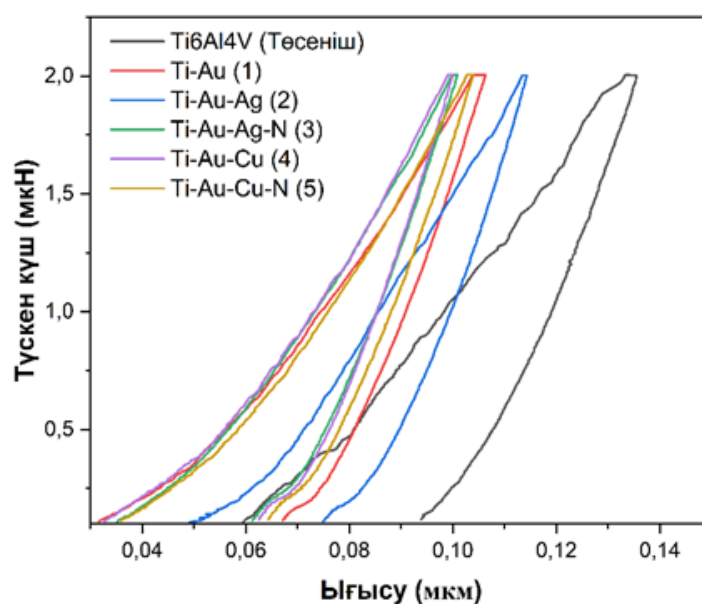
Сурет 5 – AFM-талдау нәтижесінде алынған жабындардың 2D көріністері

Ti-Au негізіндегі алынған жабындардың фазалық құрамын анықтау мақсатында рентгендік дифракциялық талдау (XRD) жүргізілді. Белгілі болғандай, XRD әдісінде қолданылатын рентген сәулесінің материалға ену тереңдігі сәуленің түсу бұрышына тәуелді болып және орта есеппен шамамен 0,3 мкм-ды құрағандықтан. Осыны ескере отырып, аталған зерттеу әдісінің шынайы нәтижелерін алу үшін зертханалық шыны төсеніштеріне тұндырылған жабын үлгілері пайдаланылды. Бұл тәсіл жабынның тек өзіне тән дифракциялық сигналдарды тіркеуге мүмкіндік береді және төсеніш материалының ( $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ) ықтимал рентгендік сигналдарының тіркелу ықтималдығын барынша төмендетеді. Сонымен қатар, жабындардың жалпы қалыңдығы орташа есеппен 1 мкм (1-кесте) құрағандықтан, XRD өлшеулерінде шыны төсеніштер қолданылған жағдайда ғана фазалық құрамды бұрмаламай анықтау мүмкіндігі жоғары болуы ескерілді.

Ti-Au жүйесіндегі элементтерді жоғары температурада, атап айтқанда шамамен 450 °C температурада физикалық вакуумдық бүрку (PVD) әдісімен тұндыру барысында, термодинамикалық тұрғыдан тұрақты  $\beta\text{-Ti}_3\text{Au}$  интерметаллидтік фазаның түзілуі жүзеге асады. Бұл құбылыс температураның материал құрылымына әсер етуімен, сондай-ақ Ti және Au элементтерінің өзара әрекеттесу кинетикасының жоғарылауымен түсіндіріледі. XRD әдісі арқылы жүргізілген фазалық талдау нәтижелеріне байланысты, Ti-Au, Ti-Au-Ag және Ti-Au-Cu үлгілері үшін құрылымы  $\beta\text{-Ti}_3\text{Au}$  (кубты кристалл кеңістіктік тобы:  $\text{Pm-3n}$ ,  $a=5,09600 \text{ \AA}$ ) негізгі фазадан құралатындығын көрсетті. Сонымен қатар, жабын құрамында қосымша аз мөлшерде  $\alpha\text{-Ti}_3\text{Au}$  (кубты кристалл кеңістіктік тобы:  $\text{Pm-3m}$ ,  $a=4,14700 \text{ \AA}$ ) фазалық құрылымын бар екенін анықтады. Ti-Au-Ag-N негізіндегі нитридті үлгі үшін дифракциялық спектрлерде айқын өзгерістер құрылымдық орналасуда едәуір ерекшеліктері болатынын көрсетеді.  $\beta\text{-Ti}_3\text{Au}$  құрылымына тиесілі (101), (200), (201), (211), (202), (301), (222), (230), (321), (400), (411) және (402) жазықтықтарына сәйкес келетін шыңдар жоғалып, оның орнына TiN (кубты кристалл кеңістіктік тобы:  $\text{Fm-3m}$ ,  $a=4,10500 \text{ \AA}$ ) фазалық құрылымына тиесілі (111), (200), (202), (311), (222) және (400) жазықтықтарына сәйкес келетін жаңа шыңдар пайда болғанын көруге болады. TiN мен AgN (кубты кристалл кеңістіктік тобы:  $\text{Fm-3m}$ ,  $a=4,10900 \text{ \AA}$ ) фазалық құрылымдары бір VN (225) типті кубты кеңістіктік тобына жататындықтан, кристалдық торлардың ұштарында Ti, Cu және Ag элементтерінің атомдары орналасуына негіз болады. Ал Ti-Au-Cu-N үлгісінде  $\beta\text{-Ti}_3\text{Au}$  фазалық құрылымы азайып, оның орнына  $\alpha\text{-Ti}_3\text{Au}$  құрылымы

артады. Бұл үлгіде  $\alpha$ -Ti<sub>3</sub>Au фазалық құрылымына тиесілі (101), (200), (201), (211), (300) және (202) жазықтықтарына сәйкес келетін шыңдар арқылы дәлелдейміз.

Ti-Au негізіндегі үлгілердің наноқаттылығын анықтау сынағынан алынған жүктемемен ығысу қисықтық графигі алмаз инденторының ұшы мен оның астындағы жұқа қабықшалы материал арасындағы өзара әрекеттесу туралы ақпаратты 6-суреттен көруімізге болады. Ti-Au үлгілері және жабынсыз төсеніш ретінде қолданылған Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V қорытпаны индентациялау нәтижелері салыстырылып көрсетілген. Көрсетілген қисықтардың барлығы ең жоғары жүктемесі 2000 мкН болатын тұрақты максимум жүктемеде, жүктеп ұстау- жүктемеден босату кезеңдерінің әрқайсысының ұзақтығы 20 с аралығында орындалған индентация нәтижелерінен алынған [31, 32].



Сурет 6 – Ti-Au негізіндегі жабын мен Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V төсенішіне жасалған жүктемемен ығысу қисықтық графигі (наноқаттылықты анықтау)

Жабынсыз Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V төсеніш үшін индентор ұшы ең жоғары 2000  $\mu$ N жүктемеде 175 нм-ден астам тереңдікке енеді, содан кейін жүктеме алынғаннан кейін есептелген 134 нм байланыс тереңдігіне дейін серпімді қалпына келеді. Серпімділік модулі 81,4 ГПа және механикалық қаттылықты шамамен 4 ГПа болды. Ti-Au (1) жабыны бар үлгісі үшін индентор ұшы ең жоғары жүктемеде – 102,8 нм тереңдікке енеді және жүктеме алынғаннан кейін 67 нм байланыс тереңдігіне қайта оралады. Бұл қисық механикалық қаттылығы 12,6 ГПа және серпімділік модулі 190,8 ГПа болатын берік жұқа қабатқа сәйкес келеді. Ag қосылған Ti-Au (2) үлгісі индентор ұшының енуі тереңдігі 132 нм-ге жетіп, кейін серпімді түрде 75 нм байланыс тереңдігіне қалпына келеді. Бұл үлгі үшін серпімділік модулі мен механикалық қаттылық 168,1 ГПа және 13,2 ГПа құрайды, сәйкесінше. Ti-Au-Ag-N (3) үлгісі индентор ұшының енуі тереңдігі 91 нм-ге жетіп, кейін серпімді түрде 61 нм байланыс тереңдігіне қалпына келеді. Бұл үлгі үшін серпімділік модулі мен механикалық қаттылық 251,2 ГПа және 16,8 ГПа құрайды, сәйкесінше. Cu қосылған Ti-Au (4) үлгісі индентор ұшының енуі тереңдігі 100 нм-ге жетіп, кейін серпімді түрде 62,5 нм байланыс тереңдігіне қалпына келеді. Бұл үлгі үшін серпімділік модулі мен механикалық қаттылық 282,5 ГПа және 16,2 ГПа құрайды, сәйкесінше. Азотты атмосферада алынған Ti-Au-Cu-N (5) үлгісі индентор ұшының енуі тереңдігі 104 нм-ге жетіп, кейін серпімді түрде 64,4 нм байланыс тереңдігіне қалпына келеді. Бұл үлгі үшін серпімділік модулі мен механикалық қаттылық 219,8 ГПа және 17,3 ГПа құрайды, сәйкесінше.

### Қорытынды

Сонымен, зерттеу нәтижелері бойынша қорытындылай келе, NanoPVD әдісімен алынған Ti-Au негізіндегі жұқа жабындар орташа қалыңдығы 1 мкм құрады және олардың қасиеттері технологиялық параметрлерге тікелей тәуелді екені анықталды. Ag және Cu қоспалары жабын морфологиясына айтарлықтай әсер етіп, беттік кедір-бұдырлық мәндерін тиісінше  $17,4 \pm 1,8$  нм және  $13,5 \pm 2,7$  нм-ге өзгертті, ал азотпен өңдеу бұл көрсеткішті  $2,3 \pm 0,8$  нм-ге дейін төмендетті. XRD талдауы негізгі  $\beta$ -Ti<sub>3</sub>Au фазасының түзілуін және азотты ортада TiN немесе  $\alpha$ -Ti<sub>3</sub>Au фазаларының артуын көрсетті. Наноқаттылық сынақтары Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V төсенішіне қарағанда барлық үлгілерде жоғары нәтижелер берді: ең жоғары мән Ti-Au-Cu-N негізіндегі жабында – 17,3 ГПа, серпімділік модулі 219,8 ГПа болды. Трибологиялық сынақтар жабындардың үйкеліс коэффициентін едәуір төмендетіп, тозуға төзімділігін арттырды. Осылайша, алынған жабындар морфологиясы, механикалық беріктігі және тозуға төзімділігі жағынан биомедициналық имплантаттар үшін перспективті материалдар ретінде қолдануға жасалған зерттеулер толық негіз бола алады.

### Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігінің Ғылым Комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № AP22683206, BR24992854).

### ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Wilches, L.V., Uribe, J.A. and Toro, A. Wear of materials used for artificial joints in total hip replacements. *Wear*, 265(1–2), 143–149 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.09.010>.
- 2 Rahmati, B., Sarhan, A.A., Zalnezhad, E., Kamiab, Z., Dabbagh, A., Choudhury, D., and Abas W.A. Development of tantalum oxide (Ta-O) thin film coating on biomedical Ti-6Al-4V alloy to enhance mechanical properties and biocompatibility. *Ceramics International*, 42(1), 466–480 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.133>.
- 3 Panjwani, B., Satyanarayana, N., and Sinha, S.K. Tribological characterization of a biocompatible thin film of UHMWPE on Ti6Al4V and the effects of PFPE as top lubricating layer. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4(7), 953–960 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.02.005>.
- 4 Guan, J., Jiang, X., Xiang, Q., Yang, F., and Liu, J. Corrosion and tribocorrosion behavior of titanium surfaces designed by electromagnetic induction nitriding for biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*, 409, 126844 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126844>.
- 5 Wei, M., Yu, H., Song, Z., Yin, Y., Zhou, X., Wang, H., et al. Microstructural evolution, mechanical properties and wear behavior of in-situ TiC-reinforced Ti matrix composite coating by induction cladding. *Surface and Coatings Technology*, 412, 127048 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127048>.
- 6 Mu, J., Wang, H., Qin, B., Zhang, Y., Chen, L., and Zeng, C. Improved wear and corrosion resistance of biological compatible TiZrNb films on biomedical Ti6Al4V substrates by optimizing sputtering power. *Surface and Coatings Technology*, 428, 127866 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127866>.
- 7 Wang, Y.H., Yang, Z.B., Hu, S.Y., Zhao, Y.H., Ren, H., Gong, F., and Xie, Z.W. Tailoring growth structure, wear and corrosion properties of TiN coatings via gradient bias and arc enhanced glow discharge. *Surface and Coatings Technology*, 450, 129015 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129015>.
- 8 Özkan, D., Yılmaz, M.A., Szala, M., Türküz, C., Chocyk, D., Tunç, C., et al. Effects of ceramic-based CrN, TiN, and AlCrN interlayers on wear and friction behaviors of AlTiSiN+TiSiN PVD coatings. *Ceramics International*, 47(14), 20077–20089 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.015>.
- 9 Çomaklı, O., Yazıcı, M., Demir, M., Yetim, A.F., and Celik, A. Effect of bilayer numbers on structural, mechanical, tribological and corrosion properties of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> multilayer film-coated  $\beta$ -type Ti45Nb alloys. *Ceramics International*, 49(2), 3007–3015 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.285>.
- 10 Bai, H., Zhong, L., Kang, L., Liu, J., Zhuang, W., Lv, Z., and Xu, Y. A review on wear-resistant coating with high hardness and high toughness on the surface of titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 882, 160645 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160645>.

- 11 Lopes, C., Gonçalves, C., Borges, J., Polcar, T., Rodrigues, M.S., Barradas, N.P., et al. Evolution of the functional properties of titanium–silver thin films for biomedical applications: Influence of in-vacuum annealing. *Surface and Coatings Technology*, 261, 262–271 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.020>.
- 12 Łępicka, M., Grądzka-Dahlke, M., Pieniak, D., Pasierbiewicz, K., Kryńska, K., and Niewczas A. Tribological performance of titanium nitride coatings: A comparative study on TiN-coated stainless steel and titanium alloy. *Wear*, 422, 68–80 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.029>.
- 13 Birkett, M., Penlington, R., Wan, C., and Zoppi, G. Structural and electrical properties of CuAlMo thin films prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 540, 235–241 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.05.145>.
- 14 Ruggiero, A., D’Amato, R., and Gómez, E. Experimental analysis of tribological behavior of UHMWPE against AISI420C and against TiAl6V4 alloy under dry and lubricated conditions. *Tribology International*, 92, 154–161 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.005>.
- 15 Ait-Djafer, A.Z., Saoula, N., Aknouche, H., Guedouar, B., and Madaoui, N. Deposition and characterization of titanium aluminum nitride coatings prepared by RF magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 350, 6–9 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.053>.
- 16 Lukose, C.C., Anastopoulos, I., Mantso, T., Bowen, L., Panayiotidis, M.I., and Birkett, M. Thermal activation of Ti(1-x)Au(x) thin films with enhanced hardness and biocompatibility. *Bioactive Materials*, 15, 426–445 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.02.027>.
- 17 Villapún, V.M., Lukose, C.C., Birkett, M., Dover, L.G., and González, S. Tuning the antimicrobial behaviour of Cu<sub>85</sub>Zr<sub>15</sub> thin films in “wet” and “dry” conditions through structural modifications. *Surface and Coatings Technology*, 350, 334–345 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.094>.
- 18 Lukose, C.C., Chavignon, C., Mantso, T., Panayiotidis, M.I., and Birkett, M. Enhanced mechanical and biocompatibility performance of Ti(1-x)Ag(x) coatings through intermetallic phase modification. *Materials Characterization*, 194, 112401 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112401>.
- 19 Birkett, M., Dover, L., Lukose, C.C., Zia, A.W., Tambuwala, M.M., and Serrano-Aroca, Á. Recent advances in metal-based antimicrobial coatings for high-touch surfaces. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1162 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms23031162>.
- 20 Lukose, C.C., Anastopoulos, I., Panagiotidis, I.S., Zoppi, G., Black, A.M., Dover, L.G., et al. Biocompatible Ti<sub>3</sub>Au–Ag/Cu thin film coatings with enhanced mechanical and antimicrobial functionality. *Biomaterials Research*, 27(1), 93 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40824-023-00435-1>.
- 21 Macías, H.A., Yate, L., Coy, L.E., Olaya, J.J., and Aperador, W. Effect of nitrogen flow ratio on microstructure, mechanical and tribological properties of TiWSiN<sub>x</sub> thin film deposited by magnetron co-sputtering. *Applied Surface Science*, 456, 445–456 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.129>.
- 22 Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., and Pinto, G. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8(11), 402 (2018). <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>.
- 23 Palmero, A., Alcalá, G., and Alvarez, R. Editorial for Special Issue: Nanostructured Surfaces and Thin Films Synthesis by Physical Vapor Deposition. *Nanomaterials*, 11(1), 148 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11010148>.
- 24 Yumusak, G., Leyland, A., and Matthews, A. The effect of pre-deposited titanium-based PVD metallic thin films on the nitrogen diffusion efficiency and wear behaviour of nitrided Ti alloys. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125545 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125545>.
- 25 Yumusak, G., Leyland, A., and Matthews, A. A microabrasion wear study of nitrided  $\alpha$ -Ti and  $\beta$ -TiNb PVD metallic thin films, pre-deposited onto titanium alloy substrates. *Surface and Coatings Technology*, 442, 128423 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128423>.
- 26 Thampi, V.A., Bendavid, A., and Subramanian, B. Nanostructured TiCrN thin films by Pulsed Magnetron Sputtering for cutting tool applications. *Ceramics International*, 42(8), 9940–9948 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.095>.
- 27 Wojcieszak, D., Osekowska, M., Kaczmarek, D., Szponar, B., Mazur, M., Mazur, P., and Obstarczyk A. Influence of material composition on structure, surface properties and biological activity of nanocrystalline coatings based on Cu and Ti. *Coatings*, 10(4), 343 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10040343>.
- 28 Stranak, V., Wulff, H., Ksirova, P., Zietz, C., Drache, S., Cada, M., et al. Ionized vapor deposition of antimicrobial Ti–Cu films with controlled copper release. *Thin Solid Films*, 550, 389–394 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.001>.

29 Karimi, A., and Cattin, C. Intermetallic  $\beta$ -Ti<sub>3</sub>Au hard thin films prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 646, 1–11 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.11.027>.

30 Yeskermessov, D., Toleukhanova, Z., Aringozhina, Z., Tabiyeva, Y., & Ahmed, W. Hard and Superhard Multicomponent Nitride Coatings Deposited Using Vacuum-Arc Evaporation: The Effects of Cr and Si on the Structure and Properties of the Nanostructured (Zr-Ti-Nb)N Coatings. In *Innovations in Materials Chemistry, Physics, and Engineering Research* (pp. 136–196). IGI Global (2023). <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6830-2.ch004>.

31 Yeskermessov, D., Rakhadilov, B., Zhurerova, L., Apsezhanova, A., Aringozhina, Z., Booth, M., & Tabiyeva, Y. Surface modification of coatings based on Ni-Cr-Al by pulsed plasma treatment. *AIMS Materials Science*, 10(5), (2023). <https://doi.org/10.3934/matricsci.2023042>.

33 Rakhadilov, B., Bayatanova, L., Kengesbekov, A., Magazov, N., Toleukhanova, Z., & Yeskermessov, D. Study of the Influence of Air Plasma Spraying Parameters on the Structure, Corrosion Resistance, and Tribological Characteristics of Fe-Al-Cr Intermetallic Coatings. *Coatings*, 15(7), 790. (2025). <https://doi.org/10.3390/coatings15070790>.

**<sup>1</sup>Ескермесов Д.К.,**

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-2206-8132,  
e-mail: [dyeskermessov@edu.ektu.kz](mailto:dyeskermessov@edu.ektu.kz)

**<sup>2</sup>Лукос С.С.,**

PhD, научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0001-9668-0079,  
e-mail: [c.c.lukose@northumbria.ac.uk](mailto:c.c.lukose@northumbria.ac.uk)

**<sup>2</sup>Биркетт М.,**

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-6135-6639,  
e-mail: [martin.birkett@northumbria.ac.uk](mailto:martin.birkett@northumbria.ac.uk)

**<sup>3</sup>Пазылбек С.А.,**

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-2318-9155,  
e-mail: [sapargali.pa@gmail.com](mailto:sapargali.pa@gmail.com)

**<sup>1</sup>Ескермесова А.С.,**

магистр, м.н.с., ORCID ID: 0009-0004-8454-3615,  
e-mail: [ardakeskermesova@gmail.com](mailto:ardakeskermesova@gmail.com)

**<sup>1\*</sup>Төлеуханова Ж.Т.,**

магистр, ст. преподаватель, ORCID ID: 0009-0002-9254-3901,  
\*e-mail: [ztoleukhanova@ektu.kz](mailto:ztoleukhanova@ektu.kz)

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2</sup>Университет Нортумбрия, г. Ньюкасл, Великобритания

<sup>3</sup>Университет им. Ж.А. Ташенева, г. Шымкент, Казахстан

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА-ЗОЛОТА (Ti-Au) ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### Аннотация

В данной научной статье исследованы структура и свойства поверхности тонких покрытий на основе Ti-Au, полученных методом PVD (магнетронного распыления) в вакуумной среде при высокой температуре 450 °C в режимах постоянного (DC) и высокочастотного (RF) тока. Тонкие покрытия, полученные на установке NanoPVD, имели среднюю толщину около 1 мкм. Экспериментальные исследования показали, что химический состав, микроструктура и свойства покрытий находятся в тесной зависимости от технологических параметров метода магнетронного распыления. Влияние добавок Ag и Cu на микроструктуру и механические свойства покрытий Ti-Au исследовалось с использованием растровой электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионного микроанализа (EDX) и рентгеновской дифрактометрии (XRD). Характеристики шероховатости поверхности покрытий анализировались методом атомно-силовой микроскопии

(AFM), а для комплексной оценки изменений свойств были проведены испытания на нанотвердость и трибологические тесты. Показано, что модификация поверхности подложки Ti6Al4V методом PVD повышает ее износостойкость и снижает коэффициент трения. По результатам рентгенофазового анализа установлено, что улучшение трибологических свойств полученных тонких покрытий напрямую связано с образованием основной фазы Ti3Au и увеличением ее содержания.

**Ключевые слова:** покрытие и тонкие пленки, система магнетронного распыления, морфология, твердость, элементный состав.

**<sup>1</sup>Yeskermessov D.K.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-2206-8132,

e-mail: [dyeskermessov@edu.ektu.kz](mailto:dyeskermessov@edu.ektu.kz)

**<sup>2</sup>Lukose C.C.,**

PhD, Researcher, ORCID ID: 0000-0001-9668-0079,

e-mail: [c.c.lukose@northumbria.ac.uk](mailto:c.c.lukose@northumbria.ac.uk)

**<sup>2</sup>Birkett M.,**

PhD, Professor, ORCID ID: 0000-0002-6135-6639,

e-mail: [martin.birkett@northumbria.ac.uk](mailto:martin.birkett@northumbria.ac.uk)

**<sup>3</sup>Pazylbek S.A.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-2318-9155,

e-mail: [sapargali.pa@gmail.com](mailto:sapargali.pa@gmail.com)

**<sup>1</sup>Yeskermessova A.S.,**

MSc., Junior Researcher, ORCID ID: 0009-0004-8454-3615,

e-mail: [ardakeskermesova@gmail.com](mailto:ardakeskermesova@gmail.com)

**<sup>1\*</sup>Toleukhanova Zh.T.**

MSc., Sr. Lecturer, ORCID ID: 0009-0002-9254-3901,

\*e-mail: [ztoleukhanova@ektu.kz](mailto:ztoleukhanova@ektu.kz)

<sup>1</sup>D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>2</sup>Northumbria University, Newcastle, United Kingdom

<sup>3</sup>Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan

## SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF TITANIUM-GOLD (TI-AU) BASED THIN COATINGS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS WITH ENHANCED PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

### Abstract

This scientific article investigates the structure and surface properties of Ti-Au-based thin coatings obtained by the PVD (magnetron sputtering) method in a vacuum environment at a high temperature of 450°C under direct current (DC) and radio frequency (RF) modes. The thin coatings deposited using the NanoPVD system had an average thickness of about 1 μm. Experimental studies showed that the chemical composition, microstructure, and properties of the coatings are closely dependent on the technological parameters of the magnetron sputtering process. The effect of Ag and Cu additions on the microstructure and mechanical properties of the Ti-Au coatings was studied using scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and X-ray diffraction (XRD). The surface roughness characteristics of the coatings were analyzed by atomic force microscopy (AFM), and nanoindentation and tribological tests were carried out to comprehensively evaluate the changes in their properties. It was shown that the modification of the Ti6Al4V substrate surface by the PVD method increases its wear resistance and reduces the coefficient of friction. X-ray phase analysis results revealed that the improvement in the tribological properties of the obtained thin coatings is directly related to the formation of the primary Ti3Au phase and the increase in its content.

**Keywords:** coating and thin films, magnetron sputtering system, morphology, hardness, elemental composition.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 09.08.2025