

А.И. Мухамедова<sup>1\*</sup> , А.Д. Погребняк<sup>2</sup> , Г.К. Уазырханова<sup>1</sup> , Б.Қ. Рахадиллов<sup>1</sup> 

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

<sup>2</sup>Сумы мемлекеттік университеті, Суми қ., Украина

\*e-mail: [aminamukhamedova17@gmail.com](mailto:aminamukhamedova17@gmail.com)

## КӨП ҚАБАТТЫ ҚАПТАМАЛАРДЫҢ АДГЕЗИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ ӨЗГЕРУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ (TiZrNbYAl)N

Жұмыста көп қабатты (TiZrNbYAl)N қаптамалардың адгезиялық және трибологиялық сипаттамалары зерттелді. Бұл жұмыстың негізгі мақсаты 12X18H9T болаттан жасалған төсенішке шөгілген (TiZrNbYAl)N қаптаманың адгезиялық және трибологиялық сипаттамаларына тигізетін қабаттар санының әсерін бағалау болып табылады.

Оже-электронды спектроскопия әдісімен элементтердің қаптама тереңдігі бойынша таралуын зерттеу химиялық элементтердің қаптама қимасы бойынша біркелкі бөлінетінін және элементтердің таралу қисықтарының үшкір төбесі бар екенін көрсетті. Қаптамалар тарапынан 2 мкм-ден астам тереңдікте қаптамалар құрамында темірдің болуы электрлік ығысуының ұлғаюы қаптаманың жабысу беріктігін сынау нәтижелерімен расталатын болат төсемнің сенімді адгезиясын қамтамасыз ететіндігін көрсетеді. Әрбір жеке қабаттың қолдану уақытының ұлғаюы  $U_{pp} = -100$  В және  $P = 4 \times 10^{-3}$  Torr болғанда элементтердің қаптамаларының қалыңдығы бойынша біркелкі таралмауына және салыстырмалы түрде кең өтпелі қаптама-төсеніш қабатының пайда болуына әкеледі.

Қаптамалардың адгезиялық беріктігін сынау көрсеткендей, олардың барлығы сызылған кезде желінеді, бірақ қабыршақтанбайды, яғни қаптама материалында пластикалық деформация және қажу жарықтарының пайда болуына байланысты когезиялық механизм арқылы бұзылады. Әр түрлі қамту режимдері жүктемеге байланысты акустикалық эмиссияның (АЭ) әр түрлі мәндеріне сәйкес келеді.  $GP = -100$  В;  $P = 4 \times 10^{-3}$  Torr кезінде алынған қаптамалар сынақтың максималды жүктемесі кезінде жоғары адгезия беріктігін және сызаттар аймағында белгілі бір дәрежеде қабыршақтанғаны анықталды.

Трибологиялық зерттеулердің нәтижелері (TiZrNbYAl)N қаптамалардың орташа мәні  $\mu = 0,85-0,95$  болатын үйкеліс коэффициенті жоғары екенін көрсетті. Мұндай мәндерді қаптамалардың когезиялық бұзылуына байланысты тозу іздерінің жоғары кедір-бұдырлығымен түсіндіруге болады.

**Түйін сөздер:** көп қабатты қаптама, (TiZrNbYAl)N, үйкеліс коэффициенті, адгезиялық беріктік, тозу көлемі.

**A. Mukhamedova<sup>1\*</sup>, A. Pogrebnyak<sup>2</sup>, G. Uazyrkhanova<sup>1</sup>, B. Rakhadilov<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Sumy State University, Sumi, Ukraine

\*e-mail: [aminamukhamedova17@gmail.com](mailto:aminamukhamedova17@gmail.com)

### Features of changes in adhesive and tribological characteristics of multilayer coatings (TiZrNbYAl)N

In this work, the adhesive and tribological characteristics of (TiZrNbYAl)N multilayer coatings were studied. The main goal of this work is to assess the influence of the number of layers on the adhesive and tribological characteristics of the (TiZrNbYAl)N coating deposited on 12X18H9T steel substrates. A study of the distribution of elements over the depth of coatings using Auger electron spectroscopy showed that chemical elements are distributed quite evenly over the cross section of the coatings and the element distribution curves have sharp peaks. The presence of iron in the coating composition at a depth of more than 2 microns on the coating side indicates that an increase in electrical displacement ensures reliable adhesion of the coating to the steel substrate, which is confirmed by the results of testing the coatings for adhesive strength. An increase in the application time of each individual layer at  $U_{pp} = -100$  V and  $P = 4 \times 10^{-3}$  Torr leads to an uneven

distribution of elements throughout the thickness of the coatings and the formation of a relatively wide transition coating-substrate layer.

Tests of the adhesive strength of coatings have shown that all coatings wear out when scratched, but do not peel off, i.e., they are destroyed by a cohesive mechanism associated with plastic deformation and the formation of fatigue cracks in the coating material. Different coating modes correspond to different values of acoustic emission depending on the load. It was determined that the coatings obtained at  $U_{pp} = -100$  V;  $P = 4 \times 10^{-3}$  Torr showed high adhesive strength and some degree of delamination in the scratch area at the maximum test load. The results of tribological studies showed that (TiZrNbYAl)N coatings have a high friction coefficient, the average value of which is  $\mu = 0.85-0.95$ . Such values can be explained by the high roughness of wear tracks due to cohesive destruction of coatings.

**Key words:** multilayer coating, (TiZrNbYAl)N, friction coefficient, adhesive strength, wear volume.

**А.И. Мухамедова<sup>1\*</sup>, А.Д. Погребняк<sup>2</sup>, Г.К. Уазырханова<sup>1</sup>, Б.К. Рахадиллов<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Сумский государственный университет, г.Сумы, Казахстан

\*e-mail: [aminamukhamedova17@gmail.com](mailto:aminamukhamedova17@gmail.com)

### **Особенности изменения адгезионных и трибологических характеристик многослойных покрытий (TiZrNbYAl)N**

В работе были изучены адгезионные и трибологические характеристики многослойных покрытий (TiZrNbYAl)N. Основной целью данной работы является оценка влияния количества слоев на адгезионные и трибологические характеристики покрытия (TiZrNbYAl)N, осажденные на подложки из стали 12X18H9T.

Исследование распределения элементов по глубине покрытий методом оже-электронной спектроскопии показали, что химические элементы распределяются довольно равномерно по сечению покрытий и кривые распределения элементов имеют острые пики. Наличие железа в составе покрытий на глубине более 2 мкм со стороны покрытий свидетельствует о том, что увеличение электрического смещения обеспечивает надежное сцепление покрытия со стальной подложкой, которое подтверждается результатами испытания покрытий на адгезионную прочность. Увеличение времени нанесения каждого индивидуального слоя при  $U_{nn} = -100$  В и  $P = 4 \times 10^{-3}$  Torr приводит к неравномерному распределению элементов по толщине покрытий и образованию сравнительно широкого переходного слоя покрытие-подложка.

Испытания адгезионной прочности покрытий показали, что все покрытия при царапании истираются, но не отслаиваются, т.е. разрушаются по когезионному механизму, связанному с пластической деформацией и образованием усталостных трещин в материале покрытия. Различные режимы покрытий соответствуют различным значениям акустической эмиссии (АЭ) в зависимости от нагрузки. Определено, что покрытия полученные при  $U_{nn} = -100$  В;  $P = 4 \times 10^{-3}$  Torr показали высокую адгезионную прочность и некоторую степень расслоения в области царапины при максимальной нагрузке испытания.

Результаты трибологических исследований показали, что (TiZrNbYAl)N покрытия обладают высоким коэффициентом трения, среднее значение которого равно  $\mu = 0,85-0,95$ . Такие значения могут быть объяснены высокой шероховатостью треков износа за счет когезионного разрушения покрытий.

**Ключевые слова:** многослойное покрытие, (TiZrNbYAl)N, коэффициент трения, адгезионная прочность, объем износа.

### **Кіріспе**

Қазіргі уақытта бу фазасының физикалық тұндыру (PVD) әдісімен орындалған өтпелі металдардың қатты нитридті қаптамалары өнеркәсіптік өндірісте кеңінен қолданылады. Жақсартылған пайдалану сипаттамалары бар

жаңа материалдарды, сондай-ақ аса қатты қаптамаларды жалату технологияларын алу Қазақстан Республикасының индустриялық-инновациялық дамуы үшін өзекті міндет болып табылады. Материалдардың сапасына қойылатын талаптарды арттыру олардың беткі қабаттарының фазалық құрамы мен құрылымын мақсатты түрде

өзгертудің жаңа әдістерін жасауға ықпал етеді. Өте жоғары балку температурасы мен тозуға төзімділігі бар ниобий Nb, цирконий Zr сияқты металдар титан Ti комбинацияларында нитридті қаптамаларында жиі қолданылады, бірақ олардың потенциалы әлі толық ашылмаған. Мұндай металдардың кешенді қосылысын "жоғары энтропиялық қорытпалардан" табуға болады. Мұндай қорытпалардың басты ерекшелігі - бір фазалы тұрақты және термодинамикалық тұрақты берік қасиеті болып табылады.

Мұндай қаптамалар коррозия мен тоздан айтарлықтай қорғаныс қасиеттерін көрсетті және олардың қаттылығы мен беріктігінің жоғарылауына, сондай-ақ жоғары жылдамдықты болатпен салыстырғанда үйкеліс коэффициентінің төмендеуіне байланысты машинажасау нысандарын пайдалануда маңызды рөл атқарады [1]. Осылайша, жоғары энтропиялық қорытпаларда, бір жағынан, жоғары энтропиялық қорытпа кристалданғаннан кейін де, одан кейінгі термомеханикалық өңдеу кезінде де алмастырудың көпэлементті қатты ерітіндісін қалыптастыру және сақтау мүмкіндігі пайда болады, ал екінші жағынан, қатты күйде қорытпа физика-механикалық сипаттамалардың бірегей комбинацияларына ие болады.

Соңғы уақытта жоғары механикалық және трибологиялық сипаттамаларына байланысты көпқабатты құрылымы бар нитридті қаптамаға көбірек көңіл бөлінуде. Алынған қаптамалардың көпқабатты құрылымы кезектесетін қабаттардың модульдеу кезеңін өзгерту арқылы қабаттардың құрылымдық-фазалық күйіне әсер етуге мүмкіндік береді, сонымен қатар олардың жеке қасиеттерін біріктіруге мүмкіндік береді [2, 3].

Әртүрлі қасиеттері бар екі қабаттың кезектесуі бірегей сипаттамалары бар қаптама жасауға мүмкіндік береді [4-6]. Қосқабатты кезеңнің өзгеруі өз кезегінде қаптамалардың қасиеттерінде маңызды рөл атқаратын тұндырылған материалдардың бөліну шекарасының күйіне әсер етеді [7]. Қосқабатты кезең көпқабатты қаптамалардағы ең маңызды параметрлердің бірі болып табылады, өйткені шекті қаттылық әдетте тар ауқымда (5-15 нм) пайда болады [8]. Дислокацияны қабат шекараларымен бұғаттау, Холл-Петч беріктігі, қабат шекараларындағы деформациялық әсерлер және супер модуль эффектісі сияқты бірнеше түсініктемелер ұсынылды [9]. Қаптаманың жалпы қалыңдығының тұрақты мәнінде қосқабаттың қалыңдығын наноөлшемдерге дейін төмендету дислокацияның кезуіне және микросызаттардың таралуына кедергі болатын қабаттар арасындағы интерфейсстер санын көбейтуге мүмкіндік береді

[10, 11]. Қарастырылып отырған тақырып бойынша бұрын жүргізілген зерттеулердің көрсетілген нәтижелері функционалды көпқабатты қаптамаларды кейіннен әзірлеу үшін негіз болып табылады.

Сонымен қатар, өтпелі металл нитридтерінен тұратын көпқабатты қаптамалар қазіргі уақытта көптеген өнеркәсіптік талаптарды қанағаттандыратын пайдалы қасиеттеріне, сондай-ақ олардың ерекше ғылыми маңыздылығына байланысты зерттеушілердің мұқият бақылауында [12-14]. Сондықтан бұрын зерттелмеген көпқабатты қаптамаларды алу және зерттеу (TiZrNbYAl)N үлкен қызығушылық тудырады. Бұл жұмыстың негізгі мақсаты - SA-PVD әдісімен болат төсенішке тұндырылған (TiZrNbYAl)N қаптамаларына олардың механикалық және трибологиялық сипаттамаларына қатысты камера қысымы мен қосқабаттар саны және/немесе қосқабаттар кезеңнің әсерін бағалау (TiZrNbYAl) болып табылады.

### Материалдар, жабдықтар және зерттеу әдістері

Төсем ретінде болат 12X18H9T пайдаланылды. Әр түрлі қабаттар санымен көп қабатты қаптамалар (ti Zr/Nb)N 1-кестеде көрсетілген режимдерде алынды.

**1-кесте.** Arc-PVD әдісімен (TiZr/Nb)N қаптамаларды шөктіру шарттары (ti Zr/Nb)N

Үлгінің атауы	Id, А	I <sub>ф</sub> , А	U <sub>пп</sub>	P, Вт	Ескертпе	Уақыты, сағ.
No.1	100 80	0,5 0,5	100	4·10 <sup>-3</sup>	536 қабаттан бастап интервал 10	1,5
No.2	100 80	0,5 0,5	100	4·10 <sup>-3</sup>	270 қабаттан бастап интервал 20	1,5

Үлгінің тереңдігі бойынша компоненттердің таралуын анықтауға бағытталған элементтік құрамды талдау Шхунер-2 оже-электронды спектрометрдің көмегімен жүргізілді.

Қаптамалардың механикалық қасиеттері "НаноСкан-4D Компакт" нано-қаттылық өлшегішінде зерттелді. CSEM Micro Scratch Tester өлшеу қондырғысы "тырнау" әдісімен

қаптамалардың адгезиялық сипаттамасын зерттеу үшін пайдаланылды. Скретч-тестілеу 30 Н максималды жүктемеде жүргізілді, үлгідегі қалыпты жүктеменің өзгеру жылдамдығы 29,99 Н/мин, индентордың қозғалыс жылдамдығы - 6,794 мм/мин, сызаттың ұзындығы - 7 мм, ұштың дөңгелектеу радиусы - 100 мкм. Сенімді нәтиже алу үшін әр жабылған үлгінің бетіне үш сызат түсірілді.

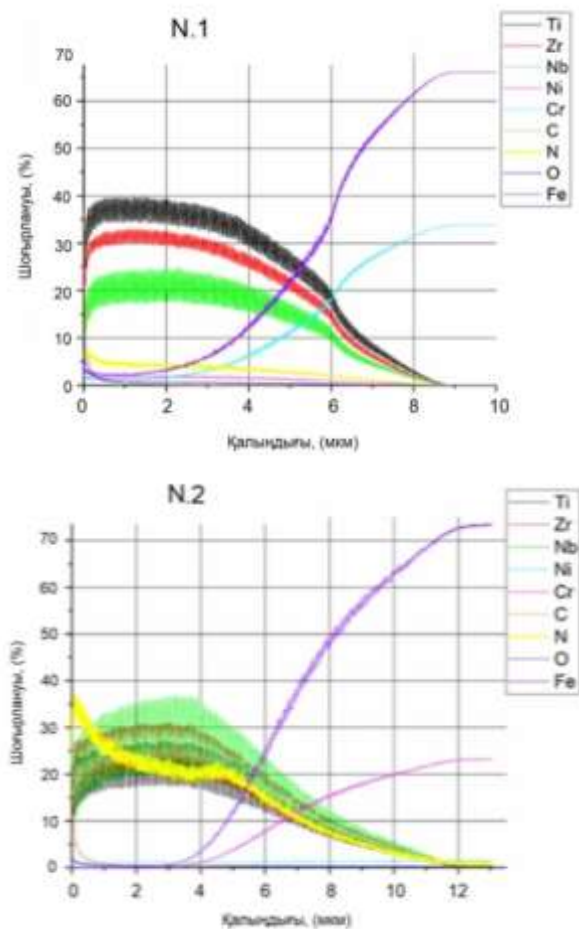
Трибологиялық сынақтар TRB<sup>3</sup> трибометрінде стандартты "шар-диск" әдісін қолдана отырып жүргізілді (ASTM G 133-95 және ASTM G99 халықаралық стандарттары). Қарсы дене ретінде диаметрі 3 мм болатын ШХ15 болаттан жасалған шар қолданылды. Сынақтар 5 Н жүктемеде және 15 см/с сызықтық жылдамдықта, 5 мм тозудың қисықтық радиусында, 600 м үйкеліс жолында жүргізілді. Қаптамалардың үйкеліс бетінің профилограммалары және қаптамалардың тозуының көлемдік жоғалуы түйіспесіз 3D-профилметр MICROMEASURE 3D station түйіспесіз 3D-профилметрін қолдану арқылы анықталды. Алынған профильдерді талдау Mountains Map Universal v.2.0.13 компьютерлік бағдарламасын қолдану арқылы жүргізілді.

### Эксперименттік нәтижелер және талдау

Элементтерді қаптамалардың қалыңдығына қарай үлестіру нәтижелері бойынша жағу режиміне байланысты олардың пайда болу сипатын талдауға болады. -200 В ығысу потенциалында әр жеке қабаттың тұндыру уақытына байланысты қалыңдығы шамамен 10-20 мкм болатын көпқабатты қаптамалар пайда болады, ал -100 В ығысу потенциалында қаптамалардың қалыңдығы 8-10 мкм құрайды. Қаптамалар тарапынан 2 мкм-ден астам тереңдікте олардың құрамында темірдің болуы электрлік ығысудың ұлғаюы олардың болат төсеммен сенімді адгезияны қамтамасыз ететіндігін көрсетеді (1-сурет, №1 және №2 үлгілер), ол қаптамалардың адгезиялық беріктігін сынау нәтижелерімен расталады (2-сурет). Қаптамалардағы (TiZrNbYAl)N элементтердің химиялық күйлерін талдау нәтижесі ретінде олардың құрамына негізгі үлес қосатын ниобий екенін атап өтуге болады.

Азот қысымының жоғарылауы қаптама құрамындағы азот концентрациясының жоғарылауына әкелетіні атап өтілді, ал металл элементтерінің мөлшері азаяды (1-сурет, №2 үлгі).  $U_{nn} = -100$  В және  $P = 4 \times 10^{-3}$  Торг кезінде әрбір жеке қабатты жағу уақытының ұлғаюы қаптамалардың қалыңдығы бойынша

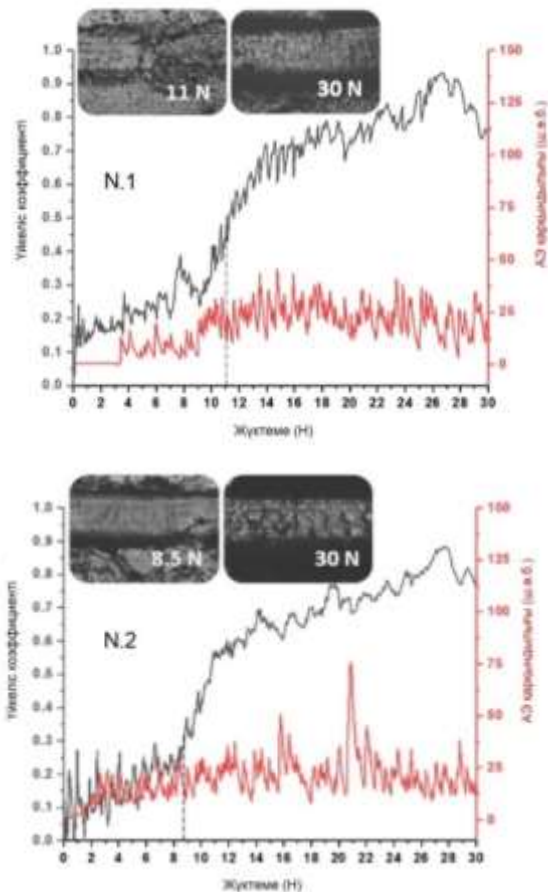
элементтердің біркелкі таралмауына және салыстырмалы түрде қаптама-төсеніштің кең өтпелі қабатының пайда болуына әкеледі (1-сурет, №1 және №2 үлгілер). Мұны әр қабат тұндырылған кезде диффузиялық қабаттағы металл иондарын қайта тарату үшін аз релаксация уақытымен түсіндіруге болады. Осылайша, композициядағы модуляция дұрыс жүрмейді және қаптамалардың сипаттамалары көп қабатты емес құрылымның монолитті қорытпасына жақындайды [15].



1-сурет. Элементтердің қаптамалардың қалыңдығына таралуы (TiZrNbYAl)N

2-суретте (TiZrNbYAl)N қаптамаларының адгезиялық беріктігін скретч-тестілеу әдісімен сынау нәтижелері көрсетілген. Қаптамалардың адгезиялық беріктігін сынау кезінде сыни жүктеменің әртүрлі шектік мәндерін анық ажыратуға болады. Қаптамаларға өткізілген сынақтарға сәйкес  $U_{nn} = -100$  В;  $P = 4 \times 10^{-3}$  Торг кезінде алынған (TiZrNbYAl)N қаптамалары үшін нәтижелер алынды, бұл сынақтың максималды жүктемесі кезінде жоғары адгезиялық беріктікті және сызат аймағында белгілі бір дәрежеде қатпарлануын көрсетті (2-сурет, №1, №2 үлгілер). Нәтижелер жұмыста алынған нәтижелермен байланысты [16].

Абразивті және адгезиялық тозуға кедергі келтіру үшін қаптамалар жоғары қаттылыққа және серпімді қалпына келтірудің жоғары мәніне ие болуы керек, бұл әсіресе соққы, абразивті және эрозиялық әсер ету жағдайында маңызды. Материалдың серпімді сыну деформациясына тұрақтылығын сипаттайтын және икемділік индексі деп аталатын Н/Е сияқты шаманы қаптамалардың тозуға төзімділігін бағалау үшін пайдалануға болады [17]. Өте қатты қаптамалардағы Н/Е икемділік индексі 0.1-ден жоғары болуы керек [18]. Ол үшін Н қаттылығы жоғары қаптаманың салыстырмалы түрде төмен Е серпімділік модулі болуы керек. Алайда, барлық зерттелетін (TiZrNbYAl)N қаптамалары үшін  $H/E \approx 0.05-0.06$  анықталды.



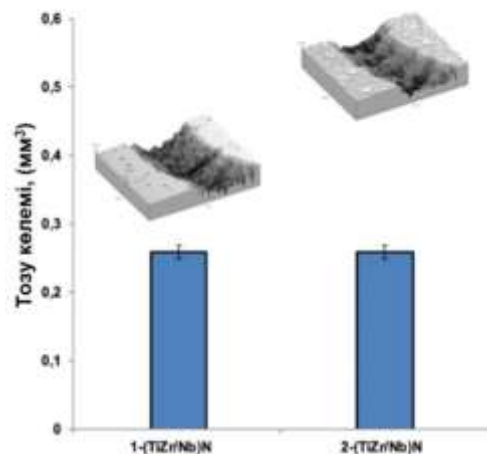
2-сурет. (TiZrNbYAl)N қаптамаларды скретч-тестілеу нәтижелері

Үйкеліс коэффициенті үйкеліс материалдарының ілінісу беріктігін, ал тозу көлемі бойынша қажалуға төзімділігін анықтайды, яғни тозу неғұрлым аз болса, тозуға төзімділік соғұрлым жоғары болады. Тозу ізінің көлденең профилінің ауданы бойынша (TiZrNbYAl)N қаптаманың тозу көлемі есептелді. Трибологиялық зерттеулердің нәтижелері (3-сурет) (TiZrNbYAl)N қаптамаларының үйкеліс

коэффициенті жоғары екенін көрсетті, оның орташа мәні  $\mu = 0,85-0,95$  тең (3-сурет). Мұндай мәндерді тозу іздерінің профилограммасына сәйкес қаптамалардың когезиялық бұзылуына байланысты тозу іздерінің жоғары кедір-бұдырлығымен түсіндіруге болады (4-сурет).



3-сурет. Үйкеліс коэффициентінің (TiZrNbYAl)N қаптамаларының қашықтыққа, цикл санына және эксперимент уақытына тәуелділігі



4-сурет. Тозу ізінің көлденең профилі бар (TiZrNbYAl)N қаптамалардың тозу көлемі

### Қорытынды

Оже-электронды спектроскопия әдісімен элементтердің қаптама тереңдігі бойынша таралуын зерттеу химиялық элементтердің қаптама қимасы бойынша біркелкі бөлінетінін

және элементтердің таралу қисықтарының үшкір төбесі бар екенін көрсетті. Қаптамалар тарапынан 2 мкм-ден астам тереңдікте олардың құрамында темірдің болуы электрлік ығысуының ұлғаюы қаптаманың жабысу беріктігін сынау нәтижелерімен расталатын болат төсемнің сенімді адгезиясын қамтамасыз ететіндігін көрсетеді. Әрбір жеке қабаттың қолдану уақытының ұлғаюы  $U_{np} = -100$  В және  $P = 4 \times 10^{-3}$  Вт болғанда элементтердің қаптамалардың қалыңдығы бойынша біркелкі таралмауына және салыстырмалы түрде кең өтпелі қаптама-төсеніш қабатының пайда болуына әкеледі.

Қаптамалардың адгезиялық беріктігін сынау көрсеткендей, барлық қаптамалар сызылған кезде тозады, бірақ қабыршақтанбайды, яғни пластикалық деформацияға және қаптама

материалында қажу сызаттарының пайда болуына байланысты когезиялық механизм бойынша бүлінеді. Қаптамалардың әртүрлі режимдері жүктемеге байланысты акустикалық эмиссияның (АЭ) әртүрлі мәндеріне сәйкес келеді.

$GP = -100$  В;  $P = 4 \times 10^{-3}$  Вт кезінде алынған қаптамалар сынақтың максималды жүктемесі кезінде жоғары адгезия беріктігін және сызаттар аймағында белгілі бір дәрежеде қабыршақтануды көрсеткені анықталды.

Трибологиялық зерттеулердің нәтижелері (TiZrNbYAl)N қаптамалардың орташа мәні  $\mu = 0,85-0,95$  болатын үйкеліс коэффициенті жоғары екенін көрсетті. Мұндай мәндерді қаптамалардың когезиялық бұзылуына байланысты тозу іздерінің жоғары кедір-бұдырлығымен түсіндіруге болады.

### Әдебиеттер

- 1 Smyrnova K., Sahul M., Haršani M., Pogrebnyak A., Ivashchenko V., Beresnev V., Stolbovoy V., Caplovic L., Caplovicová M., Vanco L, et. al. Microstructure, mechanical and tribological properties of advanced layered WN/MeN (Me = Zr, Cr, Mo, Nb) nanocomposite coatings. // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol.12 (3). – P.395.
- 2 Du J.W., Chen L., Chen J., Du Y. Mechanical properties, thermal stability and oxidation resistance of TiN/CrN multilayer coatings. // *Vacuum*. – 2020. – Vol.179. – Art.No 109468.
- 3 Pogrebnyak A., Smyrnova K., Bondar O. Nanocomposite multilayer binary nitride coatings based on transition and refractory metals: Structure and properties. // *Coatings*. – 2019. – Vol.9. – P.155.
- 4 Maksakova O.V., Simoës S., Pogrebnyak A. D., Bondar O.V., Kravchenko Y.O., Koltunowicz T.N., Shaimardanov Z.K. Multilayered ZrN/CrN coatings with enhanced thermal and mechanical properties. // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol.776. – P.679–690.
- 5 Abdeen D., El Hachach M., Koc M., Atieh M.A Review on the Corrosion Behaviour of Nanocoatings on Metallic Substrates. // *Materials (Basel)*. – 2019. – Vol.12. – P.210.
- 6 Pogrebnyak, A.D.; Kong, C.-H.; Webster, R.F.; Tilley, R.D.; Takeda, Y.; Oyoshi, K.; Bondar, O.V.; Buranich, V.V.; Konstantinov, S.V.; Baimoldanova, L.S.; et al. Antibacterial effect of au implantation in ductile nanocomposite multilayer (TiAlSiY)N/CrN coatings. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2019. – Vol.11. – P.48540-48550.
- 7 Bahadormanesh B., Ghorbani M., Kordkolaei N.L. Electrodeposition of nanocrystalline Zn/Ni multilayer coatings from single bath: Influences of deposition current densities and number of layers on characteristics of deposits. // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol.404. – P.101-109.
- 8 Caicedo J.C., Amaya C., Yate L., Gómez M.E., Zambrano G., Alvarado-Rivera J., Muñoz-Saldaña J., Prieto P. // *Applied Surface Science*. – 2010. – Vol.256. – P.5898–5904.
- 9 Yashar P.C., Sproul W.D. Nanometer scale multilayered hard coatings. // *Vacuum*. – 1999. – Vol.55. – P.179–190.
- 10 Ivashchenko V., Veprek S., Pogrebnyak A., Postolnyi B. First-principles quantum molecular dynamics study of  $Ti_xZr_{1-x}N$  (111)/SiNy heterostructures and comparison with experimental results // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2014. – Vol.15. – Art.No 025007.
- 11 Pogrebnyak A.D., Ivashchenko V.I., Skrynskiy P.L., Bondar O.V., Konarski P., Załęski K., Jurga S., Coy E. Experimental and theoretical studies of the physicochemical and mechanical properties of multi-layered TiN/SiC. Films: temperature effects on the nanocomposite structure // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol.142. – P.85–94.
- 12 Liu Y., Yu S., Shi Q., Ge X., Wang W. Multilayer coatings for tribology: A mini review. // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol.12. – P.1388.
- 13 Kovalev A.I., Vakhrushev V.O., Beake B.D., Konovalov E.P., Wainstein D.L., Dmitrivskii S.A., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S. Damage accumulation phenomena in multilayer (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N, monolayer (TiAlCrSiY)N coatings and silicon upon deformation by cyclic nanoindentation. // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol.12. – P.1312.
- 14 Vengesa Y., Fattah-alhosseini A., Elmkhah H., Imantalab O. Influence of post-deposition annealing temperature on morphological, mechanical and electrochemical properties of CrN/CrAlN multilayer coating deposited by cathodic arc evaporation- physical vapor deposition process. // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol.432. – Art.No 128090.

- 15 Pogrebnjak A.D., Rogoz V.M., Bondar O.V., Erdybaeva N.K., Plotnikov S.V. Structure and physicomechanical properties of NbN-Based protective nanocomposite coatings: A Review //Protection of metals and physical chemistry of surfaces. – 2016. – Vol.52(5). – P.802–813.
- 16 Лякишев Н.П. Диаграммы состояния бинарных металлических систем. – М.: Машиностроение, 2000. – 3968 с.
- 17 Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ration in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior. // Wear. – 2000. – Vol. 246. – P.1-11.
- 18 Musil J., Zeman P., Baroch P. Hard Nanocomposite Coatings. Comprehensive materials processing. // Book edited by M.S.J. Hashmi. - Elsevier Ltd., 2014. – P. 325–353.

## References

- 1 K. Smyrnova, M. Sahul, M. Haršáni, A. Pogrebnjak, V. Ivashchenko, V. Beresnev, V. Stolbovoy, L. Caplovic, M. Caplovicová, L. Vanco et al., *Nanomaterials* 12, 395 (2022).
- 2 J. W. Du, L. Chen, J. Chen, and Y. Du, *Vacuum* 179, Art. No. 109468 (2020).
- 3 A. Pogrebnjak, K. Smyrnova, and O. Bondar, *Coatings* 9, 155 (2019).
- 4 O.V. Maksakova, S. Simoės, A.D. Pogrebnjak, O.V. Bondar, Y.O. Kravchenko, T.N. Koltunowicz, and Z.K. Shaimardanov, *J. Alloys Compd.* 776, 679–690 (2019).
- 5 D. Abdeen, M. El Hachach, M. Koc, and M. A. Atieh, *Materials (Basel)* 12, 210 (2019).
- 6 A.D. Pogrebnjak, C.-H. Kong, R.F. Webster, R.D. Tilley, Y. Takeda, K. Oyoshi, O. V. Bondar, V. V. Buranich, S. V. Konstantinov, L. S. Baimoldanova et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11, 48540–48550 (2019).
- 7 B. Bahadormanesh, M. Ghorbani, and N. L. Kordkolaei, *Appl. Surf. Sci.* 404, 101–109 (2017).
- 8 J. C. Caicedo, C. Amaya, L. Yate, M. E. Gómez, G. Zambrano, J. Alvarado-Rivera, J. Muñoz-Saldaña, and P. Prieto, *Appl. Surf. Sci.* 256, 5898–5904 (2010).
- 9 P. C. Yashar and W. D. Sproul, *Vacuum* 55, 179–190 (1999).
- 10 V. Ivashchenko, S. Veprek, A. Pogrebnjak, and B. Postolnyi, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 15, Art. No. 025007 (2014).
- 11 A.D. Pogrebnjak, V.I. Ivashchenko, P.L. Skrynskyy, O.V. Bondar, P. Konarski, K. Załęski, S. Jurga, and E. Coy, *Compos. Part B Eng.* 142, 85–94 (2018).
- 12 Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, and W. Wang, *Nanomaterials* 12, 1388 (2022).
- 13 A.I. Kovalev, V.O. Vakhrushev, B.D. Beake, E.P. Konovalov, D.L. Wainstein, S.A. Dmitrivskii, G.S. Fox-Rabinovich, and S. Veldhuis, *Nanomaterials* 12, 1312 (2022).
- 14 Y. Vengesa, A. Fattah-alhosseini, H. Elmkhah, and O. Imantalab, *Surf. Coat. Technol.* 432, Art. No. 128090 (2022).
- 15 A.D. Pogrebnjak, V.M. Rogoz, O.V. Bondar, N.K. Erdybaeva, and S.V. Plotnikov, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 52, 802–813 (2016).
- 16 N.P. Lyakishev, *Diagrams of Binary Metallic Systems (Mashinostroenie, Moscow, 2000)*, 3968 p. (In Russ.)
- 17 A. Leyland and A. Matthews, *Wear* 246, 1–11 (2000).
- 18 J. Musil, P. Zeman, and P. Baroch, *Comprehensive Materials Processing*, (Elsevier Ltd., 2014), pp. 325–353.

### Мақала тарихы:

Түсті – 13.03.2024

Түзетілген түрде түсті – 14.06.2024

Қабылданды – 08.09.2024

### Article history:

Received 13 March 2024

Received in revised form 14 June 2024

Accepted 8 September 2024

### Авторлар туралы мәлімет:

1. **Мухамедова А.И.** (автор-корреспондент) - 8D05301 – Техникалық физика PhD докторанты; Д.Серікбаев ат.Шығыс Қазақстан техникалық университеті; Өскемен қ. Қазақстан; email: [aminamukhamedova17@gmail.com](mailto:aminamukhamedova17@gmail.com)

2. **Погребняк А.Д.** – физ.-мат. ғал. докт., проф., Сумы мемлекеттік университеті, Сумы қ. Украина, email: [alex@i.ua](mailto:alex@i.ua)

3. **Уазырханова Г.К.** – PhD, қауым. проф. Д.Серікбаев ат. Шығыс Қазақстан техникалық университеті; Өскемен қ., Қазақстан, email: [guazyrhanova@mail.ru](mailto:guazyrhanova@mail.ru)

4. **Рахадиллов Б. Қ.** - Д.Серікбаев ат.Шығыс Қазақстан техникалық университеті; Өскемен қ., Қазақстан; email: [bor1988@mail.ru](mailto:bor1988@mail.ru)

### Information about authors:

1. **Mukhamedova A.** (corresponding author) – PhD student, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. email: [aminamukhamedova17@gmail.com](mailto:aminamukhamedova17@gmail.com)

2. **Pogrebnjak A.** – Dr. Phys. Math. Sci., Prof.. Sumy State University, Sumy, Ukraine. email: [alex@i.ua](mailto:alex@i.ua)

3. **Uazyrhanova G.** – PhD, Ass. Prof., D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. email: [guazyrhanova@mail.ru](mailto:guazyrhanova@mail.ru)

4. **Rakhadilov B.** – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. email: [bor1988@mail.ru](mailto:bor1988@mail.ru)