

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-142-149>

УДК 669

НАНОКОМПОЗИТТИ (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) НЕГІЗІНДЕГІ ЖАБЫНДАРДЫҢ НАНОӨЛШЕМДІ АРХИТЕКТУРАСЫ

Р. Е. Сакенова^{1*}, А. Д. Погребняк², Л. С. Баймолданава¹

¹ «Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті» КЕ АҚ, Өскемен, Қазақстан

² Сумы мемлекеттік университеті, Сумы, Украина

* Байланыс үшін E-mail: sakenovirim@gmail.com

Ауыспалы металл нитридтерінен (CrN/ZrN) және (Cr/Zr) таза металдардан тұратын периодты түрде алмасатын көпқабатты нанокұрылымды қабықшаның микроқұрылымы мен механикалық қасиеттері зерттелді. Өрқайсысы модуляциялық кезеңде 7 металл мен 40 нитридті қосақталған қабаттан тұратын арнайы көпқабатты құрылым алынды. Өрбір металл қабатының қалыңдығы 16 нм болса, ал нитрид қабаттарының қалыңдығы 25 нм құрайды. Жабын беріктігінің арту механизмін түсіндіру үшін, алынған нәтижелер бойынша бірінші принциптерге негізделген есептеулер жүргізілді.

Микроқұрылымдық зерттеулер нәтижесі (200) және (111)/(200) бағыттарында ерекше айқындалған кубтық құрылымды CrN мен ZrN фазалары басым екені анықталды. Наноқабаттар мен нанокристалдардың наноөлшемдеріне қарамастан, CrN мен ZrN қабаттарының шекараларында дислокациялар мен кристалл жазықтықтарының құрылымдық ретсіздігі байқалды.

Зерттелген көпқабатты құрылымның ең жоғары қаттылығы 34 ГПа, төмендетілген серпімділік модулі 330 ГПа, пластикалық деформацияға дейінгі серпімділік шегі 0,1, сонымен бірге пластикалық деформацияға төзімділігі 0,36 құрайтын жоғары механикалық қасиеттерге қол жеткізуге мүмкіндік берді.

Аталған жоғары қасиеттер жабындардың ерекше көпқабатты-құрылымды (ішкі көпқабатты) архитектурасы мен оның құрылымдық сипаттамаларының нәтижесінде іске асырылды.

Түйін сөздер: фазалық құрам, нитридтер, микроқұрылым, көпқабатты жабын, дислокация, қатты жабын.

КІРІСПЕ

Өндірісте құралдар мен бұйымдардың сапасын арттыру мен қызмет ету мерзімін ұзартудың ең тиімді әрі экономикалық жағынан оңтайлы тәсілдерінің бірі – олардың беткі қабатын қатты жабындармен модификациялау болып табылады. Жабындарды алу үшін химиялық бу фазасында тұндыру (CVD), атомдық қабаттық тұндыру (ALD) [1], физикалық бу фазасында тұндыру (PVD) [2] және тағы басқа әртүрлі әдістер қолданылады. Бұл әдістердің көптігі нақты технологиялық талаптарға сай келетін оңтайлы үрдісті таңдауға жол ашады.

Бүгінгі таңда құрал-саймандардың жұмыс тиімділігі мен қызмет ету мерзімін арттырудың маңызды бағыттарының бірі – өтпелі металдар мен отқа төзімді элементтер негізінде нитридтік жабындар алу болып табылады. Автордың [3] зерттеуінде қатты жабындарды олардың байланыс типтеріне қарай жіктеу ұсынылған. Өтпелі металдардың нитридтері, карбидтері және оксинитридтері (әсіресе Периодтық жүйенің IV, V және VI топтарына жататын элементтер) тозуға төзімді жабындарды қалыптастыруда жоғары тиімділік көрсетеді.

Көпқабатты жабын құрылымындағы градиенттік ауысу аймағы адгезияны жақсартуға, коррозия мен тозуға қарсы тұру қабілетін арттыруға, сондай-ақ түрлі функцияларды бір құрылымда біріктіруге мүмкіндік береді. Нанометрлік қалыңдықтағы әртүрлі физикалық және механикалық қасиеттерге ие қабаттардың кезектесіп орналасуы ішкі кернеулерді

шоғырландыру, жарықшақтардың таралу жолын өзгерту және сынуға төзімділікті арттыру арқылы көпқабатты жүйенің жалпы механикалық қасиеттері айтарлықтай жақсартады [4].

Қатты қорғаныш жабындар үшін 1960 жылдардан бастап бірқатар материалдар әлемдік деңгейде мойындалған [5]. Дегенмен, қазіргі таңда TiN негізіндегі жабындар мен өзге де бірқабатты екі компонентті металл нитридтері күрделі өндірістік міндеттер мен заманауи талаптарды толықтай қанағаттандыра алмай отыр [6, 7].

Қорғаныш ретінде қолданылатын жабындардың қаттылығын арттыруға арналған тәсілдердің көбі материалдың түйіршіктер өлшемін реттеу арқылы беріктікті күшейтетін Холл-Петч заңдылығына негізделді. Алайда қатты жабындар көп жағдайда морт сынғыштыққа бейім болады [8, 9]. Сондықтан бұл материалдардың зақымдануға төзімділігін арттыру үшін серпімділік қасиеттері мен тұтқырлығының, яғни жарықшақ таралуына қарсы тұру қабілетінің қолайлы деңгейін сақтау өте маңызды.

Алынған көпқабатты жабын құрылымы жарықшақтардың таралуын тежей отырып, олардың қабатаралық шекаралар бойымен бағыттанып, төсенішке дейін жетуін болдырмауға мүмкіндік тудырады. Мұндай әсер көптеген зерттеулермен дәлелденген және қазіргі заманғы қаптамаларда кеңінен байқалады [10]. Бұл механизм қаттылығы мен ығысу модульдері әртүрлі фазалардан тұратын қабаттар қолданылған жағдайда өте тиімді жұмыс жасайды.

Me/MeN типтегі (мұндағы Me – «металл») көпқабатты құрылымдарды қолдану арқылы жоғары нәтижелерге қол жеткізілгені белгілі. Мұндай жүйелерге Ti/TiN [11], Cr/CrN [12] және өзге де жабын құрамалары жатады. Зерттеулер көрсеткендей, қатты, бірақ морт CrN сияқты металл нитриді мен жұмсақ, бірақ тұтқыр Cr сияқты металл фазасын көпқабатты «сэндвич» түрінде біріктіру арқылы әрбір компоненттің тозуға төзімділігі айтарлықтай жақсарады.

Бұл зерттеуде (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) құрылымына ие көпқабатты жабынды алу әдісін ұсынды. (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) жабынын екі металл нысанмен және азот жеткізу жүйесімен жабдықталған кез келген көпқабатты жабынға арналған PVD қондырғысының көмегімен алуға болады.

CrN және ZrN материалдары (Me_1N/Me_2N)/(Me_1/Me_2) түріндегі құрылымдарды зерттеу үшін таңдалды, себебі олар екі компонентті нитридтер мен таза металдар ретінде жоғары қаттылық пен трибологиялық сипаттамаларға ие [13]. Бұл материалдар TiN-мен салыстырғанда тозуға және коррозияға төзімділік жағынан жоғары нәтижелер көрсетуі мүмкін [14].

CrN жабыны 600 °C-қа дейінгі термиялық тұрақтылығымен, тотығуға қарсы тұру қабілетімен және болат құралдармен жақсы адгезиясымен ерекшеленеді. Сонымен қатар, Cr және CrN қабаттары тотығу кезінде майлау әсерін беретін қосылыстар түзе отырып, үйкеліс коэффициентін төмендетуге ықпал етеді.

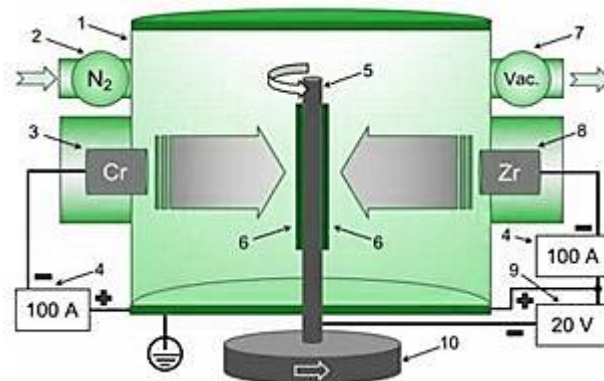
CrN және ZrN қабаттарының тор тұрақтарының (торлық параметрлерінің) аз айырмашылығы жүйедегі ішкі кернеулерді азайтып, жабынның өнеркәсіптік қолданудағы сенімділігін арттыра түседі.

Бұл жұмыс нәтижесінде (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) көпқабатты жабындар құрылымдық ерекшеліктері мен жақсартылған функционалдық қасиеттерінің арқасында күрделі жұмысқа қажетті құралдардың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттыруға мүмкіндік береді. Осы жабындар жаңа буындағы тозуға төзімді, тиімді және ұзақ мерзімді қорғаныс материалдары ретінде болашағы зор болады.

МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Вакуумдық-доғалық буландыру әдісімен көпқабатты жабындарды алу. Қондырғы доғалық буландыру (Arc-PVD) әдісіне тән тамшы тәрізді макробөлшектердің (тамшы тәрізді бөлшектердің) жабынға түсуін болдырмау үшін арнайы сүзгілеу жүйесімен жабдықталған. Жабындарды тұндыру үшін алдын ала айнадай жылтыратылған, тот баспайтын болаттан жасалған үлгілер қолданылды. Үлгі 12X18H9T маркалы болаттан жасалған, ол халықаралық стандарттағы SUS321 және 321S20 маркаларына сәйкес келеді.

Көпқабатты жабындар Bulat-6 қондырғысында хром және цирконий катодтарын пайдалана отырып, вакуумдық-доғалық буландыру (Arc-PVD) әдісімен алынған. Жабынды тұндыру жүйесінің принциптік сызбасы 1-суретте көрсетілген.

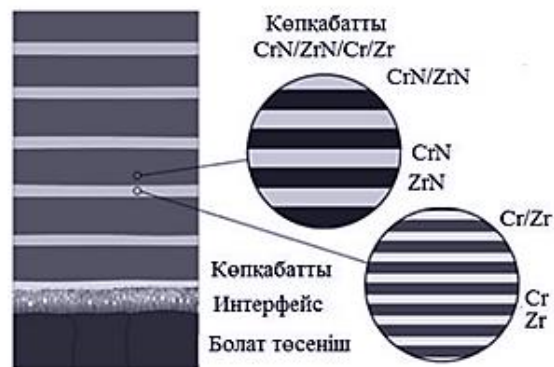


1 – вакуумды камера; 2 – азотпен қамтамасыз ету құралы; 3 – хром катоды; 4 – доғалық қуат көздері; 5 – төсенішті ұстағыш; 6 – төсеніш; 7 – вакуумдық сорғы; 8 – цирконий катоды, 9 – төсеніштің қорек көзі; 10 – төсенішті ұстағышты автоматты түрде айналдыру жүйесі

1-сурет – Көпқабатты жабынды алуға арналған вакуумды-доғалық тұндыру жүйесінің сызбасы [15]

Жабынды тұндыру процесі кезінде үлгілердің ұстағышы тұрақты түрде 8 айн/мин жылдамдықпен айналып тұрды, бұл жабынның біркелкі түсуіне мүмкіндік береді. Жұмыс барысында азот қысымы үнемі реттеліп отырды және металл нитриді мен таза металл қабаттарын кезектестіріп алу үшін қолайлы жағдай жасалды. Қысым келесі режимде өзгертілді: $P_N = 0,53$ Па кезінде 5 минут – нитрид қабаттарын тұндыру үшін, және $P_N = 0,03$ Па кезінде 1 минут – таза металл қабаттарын алу үшін.

Азот қысымының осындай циклдік реттелуі және үлгінің тұрақты айналуы нәтижесінде 2-суретте көрсетілген көпқабатты құрылым түзіледі.



2-сурет – Көпқабатты жабындарға арналған вакуумды-доғалық тұндыру жүйесінің сызбасы [16]

Хром (Cr) және цирконий (Zr) катодтарына берілген ток күші 100 А болды, ал үлгіге қолданылған ығысу кернеуі –100 В деңгейінде сақталды. Жабындарды тұндырудың жалпы ұзақтығы 6 сағатты құрады. Катодтар мен үлгінің арақашықтығы 200 мм болды.

Жабындардың фазалық құрамын анықтау үшін рентгендік дифракциялық (XRD) талдау жүргізілді.

891-нөмірлі үлгіге, яғни (CrN–ZrN)/(Cr–Zr) типті көпқабатты құрылымы бар жабынға, трансмиссия-

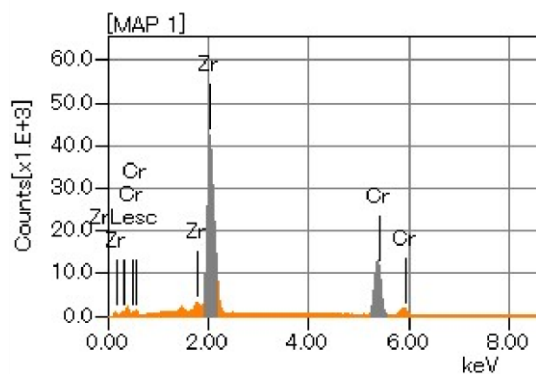
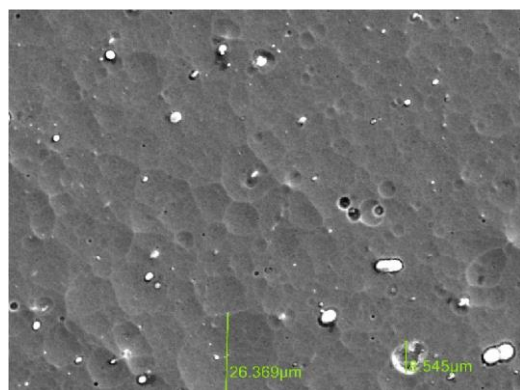
лық электрондық микроскопия (TEM) арқылы зерттеу жүргізілді. Үлгілер TEM-ге дайындау үшін дәстүрлі көлденең қималау әдісімен дайындалды. Алдымен үлгі механикалық түрде жылтыратылып, қалыңдығы шамамен 100 мкм-ге дейін жұқартылды. Содан кейін үлгі аргон ионды сәулесімен өңделді (Gatan PIPS 2 құрылғысы қолданылды): бастапқыда 5 кВ кернеуде тесік пайда болғанша, кейін 3 кВ кернеуде 30 минут, соңғы кезеңде 1 кВ кернеуде 15 минут бойы өңдеу жүргізілді.

ТЕМ зерттеулері JEOL F200 S/TEM құрылғысында 200 кВ үдеткіш кернеуінде орындалды.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛДАУЛАР

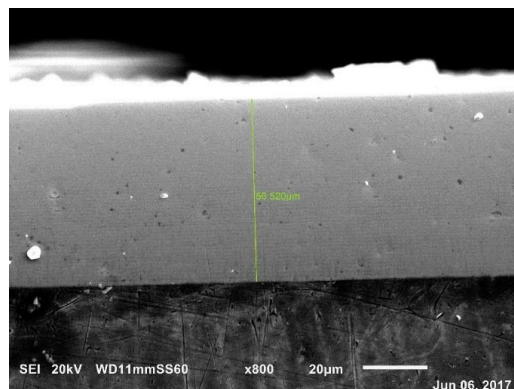
(CrN/ZrN)/(Cr/Zr) үлгісінің беткі морфологиясы 3-суретте көрсетілген. Ұсынылған ЭШМ (SEM) бейнесінде жабынның тығыз орналасқан, баған тәрізді өсу құрылымы анық байқалады. Бағаналы дәндердің арасындағы шекаралар мен олардың түбінде түзілген сайлар жақсы көрінеді. Кейбір дәндердің бетінде ұсақ құрылымдардың әлсіз білінетін шыңдары байқалады. Суреттегі ақ нүкте тәрізді бөлшектердің көпшілігі – вакуумдық камерада түскен бөгде бөлшектер немесе үлгіні дайындау кезінде түскен шаң-тозаң болуы мүмкін.

Тұндыру қондырғысына арнайы сүзгілеу жүйесі орнатылғанына қарамастан, Arc-PVD әдісіне тән бірнеше микротамшы бөлшектердің жабын бетінде және көлденең қимадағы SEM бейнелерінде кездесетіні байқалды.

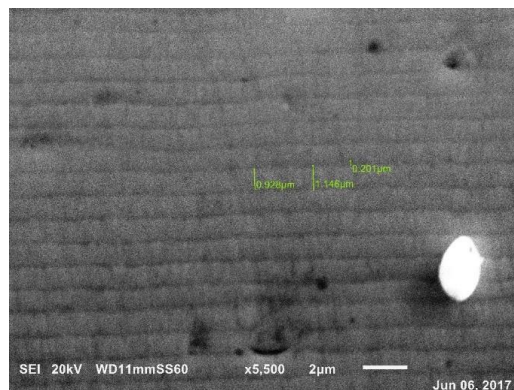


3-сурет – EDS көмегімен алынған жабын беті

Энергия-дисперсиялық спектроскопия (EDS) арқылы алынған элементтік құрам нәтижелеріне сәйкес, жабындағы Cr/Zr қатынасы 0,59-ға тең болды. 3-суретте бұл мәліметтер үлгінің беткі қабатында алынғанымен, жеке қабаттардың қалыңдығы өте жұқа (15 нм-ге дейін) болғандықтан, нәтижелер жабынның бүкіл тереңдігіне тән деп есептеледі.



а)



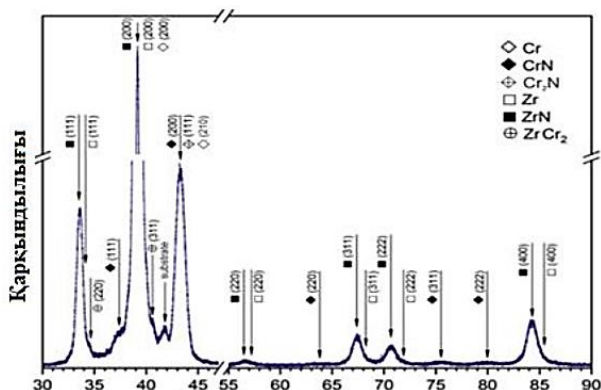
б)

4-сурет – (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) жабындарының көлденең қимасының SEM көмегімен алынған талдау нәтижелері: (а) көлденең қимасының толық профілінің көрінісі, жалпы қалыңдығы; (б) ұлғайтылған SEM-көрінісі, кезекпен орналасқан жабын қалыңдығы

(CrN/ZrN)/(Cr/Zr) көпқабатты жабындысының $\theta/2\theta$ геометриясында, параллель сәуле режимінде жүргізілген рентгендік дифракциялық (XRD) талдауының нәтижелері 5-суретте көрсетілген. Үлгіде кубтық құрылымға ие CrN және ZrN негізгі екі фазасы анықталды. Хром және цирконий нитридтері қабаттарында кристаллдардың (200) бағытында жоғары дәрежеде бағдарланған өсуі байқалады.

ZrN фазасының дифракциялық шыңдарының интенсивтігі CrN-нің шыңдарына қарағанда әлдеқайда жоғары. Жұқа Cr және Zr металл қабаттары XRD спектрлерінде айтарлықтай әлсіз көрінеді.

Сонымен бірге, $34,5^\circ$, $40,7^\circ$ және $41,8^\circ$ бұрыштардағы әлсіз шыңдар Cr₂Zr қосылысының (220) және (311) жазықтықтарының, сондай-ақ (CrN–ZrN) қатты ерітіндісінің (200) жазықтығына сәйкес келуі ықтимал.



5-сурет – Темір болат төсенішке тұндырылған (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) көпқабатты жабынның рентгендік дифракциялық үлгілері ($\theta/2\theta$, параллель сәуле режимі)

Ескерту керек, зерттелген XRD спектрінде дифракциялық шыңдардың төмен бұрыштар жағына ығысуы байқалады. Бұл құбылыс қабаттағы жазықтықаралық қашықтықтың ұлғаюымен қатар, жабындағы қалдық кернеулердің бар екендігін көрсетеді. CrN және ZrN фазаларының кристаллиттерінің өлшемдері мен жетілдірілген тор параметрлері 1-кестеде берілген. Ал таза Cr және Zr металдарының қабаттары үшін осы параметрлерді анықтау қиындық туғызды, өйткені олардың дифракциялық шыңдары әлсіз көрініп, металл нитридтерінің шыңдарымен қабаттасады.

1-кесте – CrN және ZrN фазаларының кристаллиттерінің өлшемдері мен жетілдірілген тор параметрлері

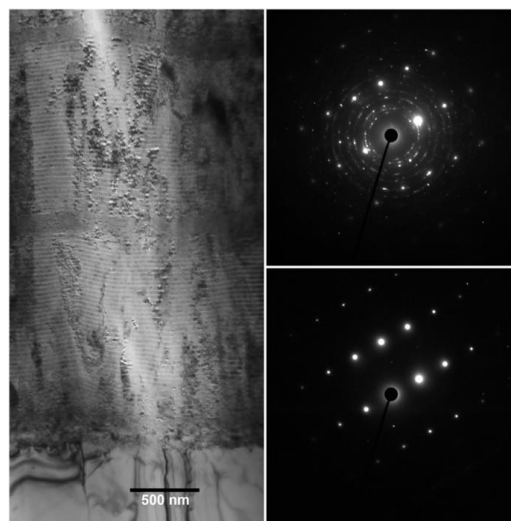
Фазалар	Тор тұрақтысы a , Å	Орташа түйіршік мөлшері, nm
CrN	4,19	9,1
ZrN	4,60	12,6

Жабынның жеке қабаттарын бөлек талдау үшін төмен бұрыштық (grazing incidence) рентгендік дифракция (XRD) әдісі де қолданылды. Дегенмен, қабаттардың қалыңдығы өте жұқа болғандықтан, алынған XRD спектрлері дәстүрлі $\theta/2\theta$ өлшемдерімен салыстырғанда ешқандай айтарлықтай айырмашылық көрсетпеді.

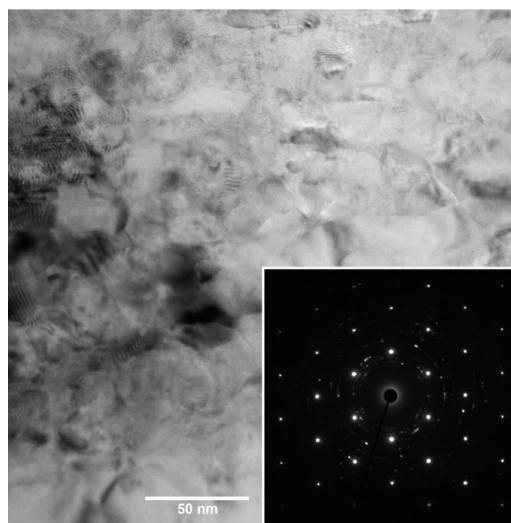
6-суретте 891-нөмірлі үлгінің металл мен жабын қабаттарының шекарасындағы жалпы BF-TEM бейнесі көрсетілген. А бөлімінде болат негізінен алынған таңдамалы аудандық дифракция (SAED) үлгісі берілген, ал В бөлімінде интерфейстен алынған SAED бейнесі көрсетілген. А бөлімінде болат [311] зона осіне бағытталған. В бөлімінде болаттың дифракциялық дақтары әлі көрінетін болса да, дифракциялық шеңберлер де анық байқалады. Бұл шеңберлер интерфейстің көпкристалды құрылымын білдіреді. Сары түспен белгіленген дифракциялық шеңберлер ZrN тор аралықтарына сәйкес келеді. Таза Zr немесе Cr фазаларына тән шеңберлер табылған жоқ.

6-суретте болат пен Cr–Zr қабаттарының арасындағы интерфейс көрсетілген. Аталмыш аймақтан алынған дифракциялық үлгілер BCC (денгіз

құрылысы) торына сай келеді, оның тор параметрі 0,461 нм-ге тең. Бұл көрсеткіштер ZrN тор аралықтарына сәйкес келеді (өлшемдері 1-кестеде берілген). Көкпен ерекшеленген 0,219 нм аралық болаттың {101} жазықтықтарына сәйкес келеді. Таза Zr немесе Cr металдарына тән дифракциялық шеңберлер табылмады.



а)



б)

6-сурет – Болат негізге тұндырылған (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) қабаттарының TEM зерттеу нәтижелері:

BF-TEM бейнесі (Z1 – негіз зонасы, Z2 – диффузиялық қабат зонасы) және Z1 мен Z2 аймақтарынан алынған SAED үлгілері (а); Негіз-бұйым интерфейсінің BF-TEM бейнесі және оның SAED үлгісі (б)

7-суретте қабаттың төменгі бөлігінен алынған түсіндірмелі Bright field STEM (а) және HAADF STEM (б) бейнелері берілген. А және В аймақтары 4 және 5-суреттердегі EDX карталарымен сәйкес келеді. Сары жебе (в) бөліміндегі сызықтық сканерлеудің қай аймақта жүргізілгенін көрсетеді. Бұл талдау нитридті қос қабаттың қалыңдығын 1095 нм екенін анықтады.

Суперторда 40 қабат CrN/ZrN бар, олардың орташа қос қабат қалыңдығы 25 нм. Металл қабатының қалыңдығы 100 нм, ал әр қос қабаттың орташа қалыңдығы 16 нм.

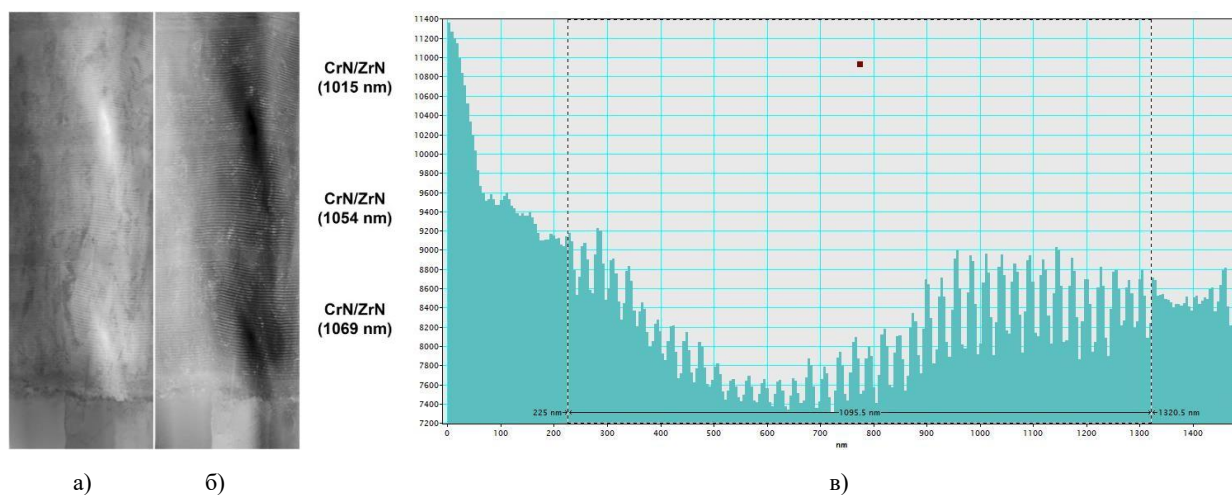
8-суретте А аймағындағы болат пен металдық қос қабаттардың интерфейсындағы EDX элементтік карта көрсетілген. Bright field (BF) және HAADF STEM суреттерінен бастапқы металдық қос қабаттың қалыңдығы шамамен 200 нм екенін байқауға болады. Бұл қабат ұсақ (< 30 нм) түйірлерден тұрады.

Элементтік картада көрсетілгендей, бұл түйірлер (Fe, Cr) және Zr қоспасынан құралған, сондай-ақ қабатта аз мөлшерде азот кездеседі. Fe мен Cr сигналдарының қиылысуы осы аймақта болаттың құрамдас элементтерінің араласқанын білдіреді, ал Zr сигналы

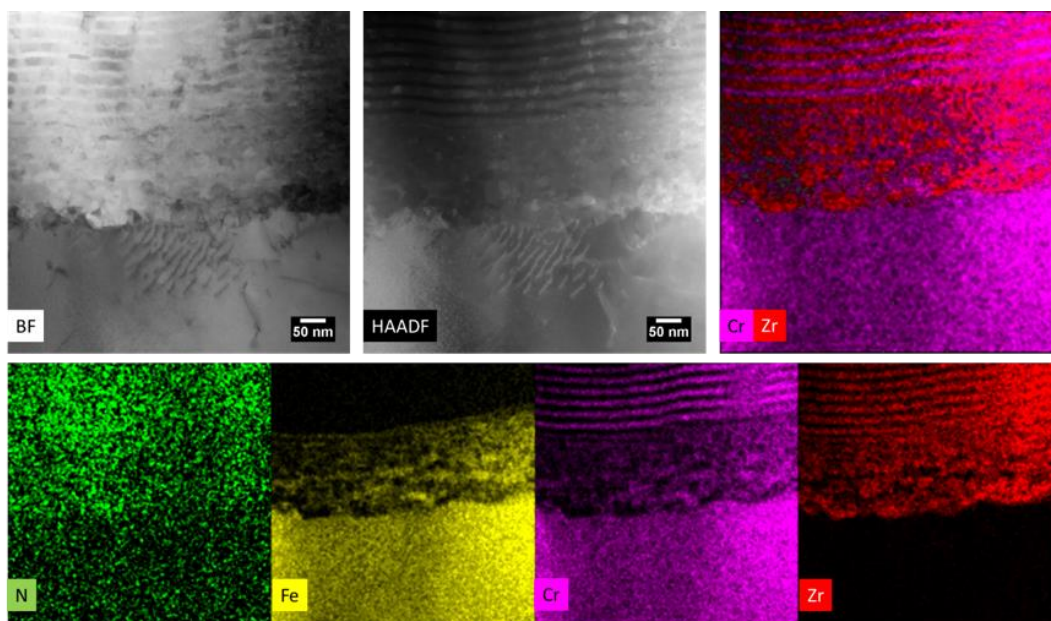
олардан кеңістіктік жағынан бөлініп тұр. Бұл жағдай 2-суреттегі дифракциялық үлгімен сәйкес келеді. Zr элементінің (Fe, Cr) болатына диффузиялануы осы аймақта Zr таралуының дәлелі болуы мүмкін.

2-кесте – Суретте көрсетілген дифракциялық үлгіден алынған d_{hkl} аралықтары

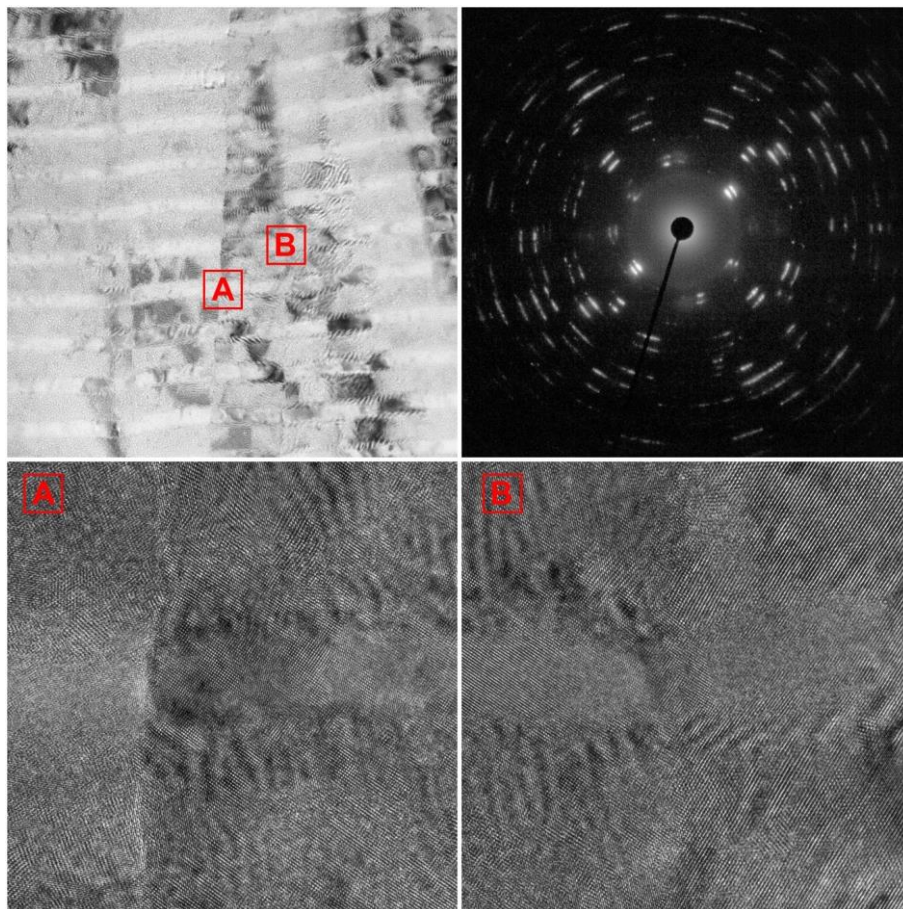
№	h	k	l	d_{hkl} , нм
1	1	1	1	0,266454
2	2	0	0	0,231
3	2	2	0	0,164935
4	3	1	0	0,146929
5	1	1	3	0,141743



7-сурет – CrN/ZrN/Cr/Zr жабынның көлденең қимасының бейнесі: BF-STEM (а); HAADF-STEM (б); интенсивтілік профилі (в)



8-сурет – Төсеніш пен жабын арасындағы бөліну шекарасының Z3 аумағынан STEM-EDS көмегімен анықталған элементтер кескіні



9-сурет – Көпқабатты (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) жабындарының CrN/ZrN аймағының BF-TEM бейнесі және SAED үлгісі

9-суретте нитрид қабаттарының TEM бейнесі көрсетілген. Әрбір интерфейсте ZrN мен CrN арасындағы тор сәйкессіздігін көрсететін моирле жолақтары байқалады. Бұл жолақтар, мүмкін, сәйкессіздікті өтейтін дислокацияларға сәйкес келеді, дегенмен олар тікелей анықталған жоқ. Осы аймақтан алынған дифракциялық үлгі ZrN және CrN торларының құрылымымен белгіленген. Бұл қабаттардың эпитаксиялық өскенін және шамамен 9,4% тор сәйкессіздігін өтеу үшін дислокациялардың болуы қажеттігін көрсетеді.

Жабындардың микроқаттылығы (HV) HNMV-G сериялы Виккерс қаттылық сынағышы көмегімен өлшенді. Сынақ кезінде жабынға 980,7, 4,903, 9,807 және 19,61 Н мөлшеріндегі жүктемелер түсірілді. Әрбір үлгіге кемінде 10 рет өлшеу жүргізіліп, алынған нәтижелер бойынша орташа мәндер есептелді. Бұл әдіс, әсіресе, қалыңдығы аз, жұқа және жоғары қаттылыққа ие жабындардың қаттылық көрсеткіштерін анықтауға қолайлы болып табылады.

Қорытынды

Мақалада вакуумды-доғалық тұндыру әдісінің көмегімен алынған нанокөпозитті жабынның физикалық, механикалық қасиеттері, микроқұрылымы және фазалық құрамы зерттелді.

Бұл жұмыстың негізгі нәтижелері төмендегідей:

1. Вакуумды-доғалық жолмен алынған бір ғана жазықтықта көлденең орналасқан доғалық буландырығыштардың арқасында CrN, ZrN нитридтері мен Cr, Zr металдарының кезекпен алмастырылған қабаттарынан тұратын тозуға төзімді, берік CrN/ZrN/Cr/Zr негізіндегі қатты жабынды тұндыру тәсілі дайындалды.

2. Қалың қабатты нитридті және жұқа металлдың қабаттарынан құралған нанокөпозитті CrN/ZrN/Cr/Zr жабыны зерттелді. Алынған жабынның беткі қабатында және қимасы бойынша жүргізілген зерттеулер нәтижесінде Cr, Zr, CrN және ZrN қабаттарының өзара арасындағы бөліну шекараларын нақты көрсетіп, қабаттар арасының өзара тегістігі мен орналасу сапасының жоғарылығын көрсетті. Көп қабатты CrN/ZrN/Cr/Zr жабынындағы ауыспалы металдар мен нитридтердің кубтық фазалары бар поликристалды қабықшаларын микро- және наноқұрылымдық талдаулар нәтижесінен көреміз. HR-TEM әдісі арқылы жүргізілген талдау CrN/ZrN наноқабаттарындағы бөлім шекаралары маңында дислокациялардың пайда болуын және кристаллиттер арасындағы кристаллографиялық бағыттардың айырмашылығы байқалады.

3. CrN/ZrN негізіндегі көпқабатты жабындарға жүргізілген Виккерс әдісімен өлшеу нәтижесінде олардың қаттылығы 29 ГПа-ға дейін жететіні анықталды. Бұл мән бір қабатты CrN немесе ZrN жабындарымен салыстырғанда әлдеқайда жоғары екені белгілі. Сонымен қатар, микромеханикалық сынақтар нәтижесінде жабынның наноқаттылығы $H = 34$ ГПа, ал серпімділік модулі $E = 330$ ГПа деңгейінде тіркелді. Жабын бетінің кедір-бұдырына қарамастан, трибологиялық зерттеулер оның тұрақты абразивтік тозуға қарсы тұра алатынын көрсетті. Үйкеліс коэффициенті бастапқы 0,4 деңгейінен 0,18–0,2 аралығына дейін төмендегені байқалды. Бұл көрсеткіштер жабынның трибологиялық тиімділігін арттырып, жұмыс істеу мерзімін ұзартатынын көрсетеді. Тозуға төзімділіктің артуы, бір жағынан, жабынның көпқабатты және құрылымдық тұрғыдан күрделі болуымен, екінші жағынан – оның құрамында пайда болған CrSi және SiNx нанобөлшектерінің өзін-өзі майлайтын қасиетке ие болуымен түсіндіріледі. Мұндай бөлшектер үйкеліс күшін азайтып, механикалық жүктемелерге тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Жалпы алғанда, CrN/ZrN жабындары трибомеханикалық тұрғыдан тиімділігі жоғары материал ретінде кең қолдануға қолайлы. Мұндай жабындар үйкеліс күшін азайтып, тозуға төзімділікті және икемділік деңгейін арттыруға мүмкіндік береді.

ӘДЕБИЕТТЕР / REFERENCES

1. X. Liu, Q. Yang, Z. Li, W. Yuan, Y. Zheng, Z. Cui, X. Yang, K.W.K. Yeung, S. Wu, A combined coating strategy based on atomic layer deposition for enhancement of corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. – Vol. 434. – P. 1101–1111. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.032>
2. Q.M. Mehran, M.A. Fazal, A.R. Bushroa, S. Rubaiee, A critical review on physical vapor deposition coatings applied on different engine components, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 43 (2018) 158e175, <https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1320648>.
3. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // *Surface and Coatings Technology.* – 1995. – Vol. 76–77. – P. 328–336.
4. Contreras E., Galindez Y., Rodas M.A., Bejarano G., Gómez M.A. CrVN/TiN Nanoscale Multilayer Coatings Deposited by DC Unbalanced Magnetron Sputtering // *Surface and Coatings Technology.* – 2017. – Vol. 332. – P. 214–222.
5. F. Vaz, J. Ferreira, E. Ribeiro, L. Rebouta, S. Lanceros-Mendez, J.A. Mendes, E. Alves, P. Goudeau, J.P. Riviere, F. Ribeiro, I. Moutinho, K. Pischow, J. de Rijk, Influence of nitrogen content on the structural, mechanical and electrical properties of TiN thin films // *Surf. Coating. Technol.* – 2005. – Vol. 191. – P. 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.033>
6. A.D. Pogrebnjak, V.I. Ivashchenko, P.L. Skrynskyy, O.V. Bondar, P. Konarski, K. Zalecki, S. Jurga, E. Coy, Experimental and theoretical studies of the physicochemical and mechanical properties of multi-layered TiN/SiC films: temperature effects on the nanocomposite structure // *Compos. B Eng.* – 2018. – Vol. 142. – P. 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.004>
7. S.C. Vettivel, R. Jegan, J. Vignesh, S. Suresh, Surface characteristics and wear depth profile of the TiN, TiAlN and AlCrN coated stainless steel in dry sliding wear condition // *Surfaces and Interfaces.* – 2017. – Vol. 6. – P. 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.surfint.2016.10.008>
8. S. Yip, The strongest size // *Nature.* – 1998. – Vol. 391. – P. 532–533. <https://doi.org/10.1038/35254>
9. J. Musil, Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness // *Surf. Coating. Technol.* – 2012. – Vol. 207. – P. 50–65, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.073>.
10. A.A. Bagdasaryan, A.V. Pshyk, L.E. Coy, P. Konarski, M. Misnik, V.I. Ivashchenko, M. Kempinski, N.R. Mediukh, A.D. Pogrebnjak, V.M. Beresnev, S. Jurga, A new type of (TiZrNbTaHf)N/Mon nanocomposite coating: microstructure and properties depending on energy of incident ions // *Compos. B Eng.* – 2018. – Vol. 146. – Art. 132e144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.015>
11. S. Labdi, P. Houdy, P. Psyllaki, M. Jeandin, Elaboration and characterization of Ti and TiN thin films and multilayers for hard coating applications // *Thin Solid Films.* – 1996. – Vol. 275. – P. 213–215. [https://doi.org/10.1016/00406090\(95\)07046-X](https://doi.org/10.1016/00406090(95)07046-X)
12. Lousa, J. Romero, E. Martinez, J. Esteve, F. Montalà, L. Carreras, Multilayered chromium/chromium nitride coatings for use in pressure diecasting // *Surf. Coatings Technol.* – 2001. – Vol. 146–147. – P. 268–273. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01476-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01476-1)
13. D.J. Li, F. Liu, M.X. Wang, J.J. Zhang, Q.X. Liu, Structural and mechanical properties of multilayered gradient CrN/ZrN coatings // *Thin Solid Films.* – 2006. – Vol. 506–507. – P. 202–206. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.031>
14. Z.G. Zhang, O. Rapaud, N. Allain, D. Mercs, M. Baraket, C. Dong, C. Coddet, Microstructures and tribological properties of CrN/ZrN nanoscale multilayer coatings // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 255. – P. 4020–4026. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.075>
15. Maksakova O.V., Webster R.F., Tilley R.D., Ivashchenko V.I., Postolnyi B.O., Bondar O.V., Takeda Y., Rogoz V.M., Sakenova R.E., Zukowski P.V., Opielak M., Beresnev V.M., Pogrebnjak A.D. Nanoscale Architecture of (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) Nanocomposite Coatings: Microstructure, Composition, Mechanical Properties and First-Principles Calculations // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2020. – Vol. 831. – P. 154808-1-154808-15
16. Bondar O.V., Pogrebnjak A., Takeda Yo., Postolnyi B., Zukowski P., Sakenova R.E., Postolnyi B. Structure and Properties of Combined Multilayer Coatings Based on Alternative Triple Nitride and Binary Metallic Layers // *NAP2018, 2018 IEEE 8th Int. Conf. “Nanomaterials Applications and Properties, Zatoka, Ukraine.* – 2018. – Vol. 3. – P. 03TFNMC73-1- 03TFNMC73-5.

НАНОРАЗМЕРНАЯ АРХИТЕКТУРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ (CrN/ZrN)/(Cr/Zr)

Р. Е. Сакенова^{1*}, А. Д. Погребняк², Л. С. Баймолданова¹

¹ *Восточно-Казахстанский университет им. Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан*

² *Сумский государственный университет, Сумы, Украина*

* E-mail для контактов: sakenovarim@gmail.com

Исследованы микроструктура и механические свойства периодически чередующегося многослойного наноструктурированного покрытия, состоящего из чередующихся металлических нитридов (CrN/ZrN) и чистых металлов (Cr/Zr). Была получена специально разработанная многослойная структура, включающая в одном модуляционном периоде 7 металлических и 40 нитридных слоев. Толщина каждого металлического слоя составляла 16 нм, а толщина нитридных слоев – 25 нм. Для объяснения механизма повышения прочности покрытия были проведены расчёты на основе первых принципов, опираясь на полученные экспериментальные данные.

Результаты микроструктурных исследований показали преобладание кубических фаз CrN и ZrN с чётко выраженной ориентацией по направлениям (200) и (111)/(200). Несмотря на наноразмерные размеры нанослоёв и нанокристаллов, на границах между слоями CrN и ZrN наблюдались дислокации и структурные нарушения кристаллических плоскостей.

Исследуемая многослойная структура продемонстрировала высокие механические свойства: максимальную твёрдость 34 ГПа, приведённый модуль упругости 330 ГПа, предел упругой деформации до пластической деформации 0,1, а также сопротивление пластической деформации 0,36.

Указанные высокие характеристики были достигнуты благодаря уникальной многослойной (внутренней многослойной) архитектуре покрытия и его специфическим структурным особенностям.

Ключевые слова: фазовый состав, нитриды, микроструктура, многослойное покрытие, дислокации, твердое покрытие.

NANOSCALE ARCHITECTURE OF NANOSTRUCTURED COATINGS BASED ON (CrN/ZrN)/(Cr/Zr)

R. E. Sakenova^{1*}, A. D. Pogrebnyak², L. S. Baimoldanova¹

¹ *Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

² *Sumy State University, Sumy, Ukraine*

* E-mail for contacts: sakenovarim@gmail.com

The microstructure and mechanical properties of a periodically alternating multilayered nanostructured coating composed of alternating metal nitrides (CrN/ZrN) and pure metals (Cr/Zr) were investigated. A specially designed multilayer structure was fabricated, consisting of 7 metal and 40 nitride layers within one modulation period. The thickness of each metal layer was 16 nm, while the thickness of each nitride layer was 25 nm. To explain the mechanism of increased coating strength, first-principles calculations were conducted based on the obtained experimental results.

Microstructural studies revealed that cubic CrN and ZrN phases predominate, clearly oriented along the (200) and (111)/(200) crystallographic directions. Despite the nanoscale dimensions of the nanolayers and nanocrystals, dislocations and structural disorder of crystal planes were observed at the interfaces between CrN and ZrN layers.

The investigated multilayer structure demonstrated outstanding mechanical properties, including a maximum hardness of 34 GPa, a reduced elastic modulus of 330 GPa, an elastic strain limit before plastic deformation of 0.1, and a plastic deformation resistance of 0.36.

These superior properties were achieved as a result of the unique multilayered (internal multilayer) architecture of the coating and its specific structural features.

Keywords: phase composition, nitrides, microstructure, multilayer coating, dislocation, hard coating.