



ФИЗИКА
ФИЗИКА
PHYSICS

DOI 10.51885/1561-4212_2021_1_73
MFTAA 29.19.16

Р.Е. Сакенова^{1,2}, А.Д. Погребняк², Н.К. Ердыбаева¹, М.Қ. Қылышқанов³

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: sakenova_rimma@mail.ru*

¹E-mail: nerdybaeva@mail.ru

²Сумы мемлекеттік университеті, Сумы қ., Украина

²E-mail: alex@i.ua

³С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан

³E-mail: kylyshkanov@mail.ru

**КРЕМНИЙ ИОНДАРЫМЕН ИМПЛАНТТАЛҒАН CrN/ZrN/Cr/Zr НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ
ЖАБЫНДАҒЫ ДИФFUЗИЯ ЖӘНЕ МИКРОСЕГРЕГАЦИЯ ПРОЦЕСТЕРІ
ПРОЦЕССЫ ДИФFUЗИИ И МИКРОСЕГРЕГАЦИИ В НАНОСТРУКТУРНОМ ПОКРЫТИИ
CRN/ZRN/CR/ZR, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ КРЕМНИЯ
DIFFUSION AND MICROSEGREGATION PROCESSES IN A NANOSTRUCTURED
CRN/ZRN/CR/ZR COATING IMPLANTED WITH SILICON IONS**

Аңдатпа. Бұл жұмыста болаттан жасалған төсеніш бетінде вакуумды катодты-доғалы әдіспен тұндырылған CrN/ZrN/Cr/Zr жабындысы алынады. Көпқабатты CrN/ZrN/Cr/Zr жабындысын төменгі энергиялы кремний иондарымен импланттау кезінде алынған нәтижелер көрсетілген. Эксперименттік SAED және XRD, HRTEM, EDS, SIMS, HRTEM, TEM мен MAP-EDX және теориялық әдістері қолданылды, фазалық құрылымы зерттелді. Кремний ассиметриялы түрде хром нитридi мен цирконий нитридiнiң қабаттары арасындағы бөліну шекарасын алып жатқан концентрациялары 10 және 6 пайызды құрады. Екі қабаттың орташа кезеңі 26 нм құрса, ал орташа ауытқуы 1-2 нм құрады. Жабынды кремний ионымен импланттауға дейінгі кезеңде CrN қабатының қалыңдығы 16,5÷17,2 нм, ал ZrN жуық шамамен 26 нм құрады, ал импланттау нәтижесінде ZrN қабаты 35÷36 нм-ге дейін кеңейген.

Түйін сөздер: құрылым, катодты доға, көпқабатты жабындар, наноқабаттардың архитектурасы, иондық имплантация, интерфейсстер, диффузия, сегрегация.

Аннотация. В данной работе покрытие CrN/ZrN/Cr/Zr, нанесенное вакуумным катодно-дуговым методом, получено на поверхности стального пола. Показаны результаты, полученные при имплантации многослойного покрытия CrN/ZrN/Cr/Zr низкоэнергетическими ионами кремния. Использованы экспериментальные SAED и XRD, HRTEM, EDS, SIMS, HRTEM, TEM и MAP-EDX и теоретические методы, изучена фазовая структура. Концентрации кремния, ассиметрично занимающего границу между слоями нитрида хрома и нитрида циркония, составляли 10 и 6. Средний период двух слоев составлял 26 нм, а среднее отклонение составляло 1-2 нм. При предварительной имплантации покрытия ионами кремния толщина слоя CrN составляла 16,5÷17,2 нм, а ZrN - около 26 нм, а в результате имплантации слой ZrN расширился до 35÷36 нм.

Ключевые слова: структура, катодная дуга, многослойные покрытия, архитектура

нанополенок, ионная имплантация, границы раздела фаз, диффузия, сегрегация.

Abstract. In this work, a CrN / ZrN / Cr / Zr coating applied by the vacuum cathode-arc method was obtained on the surface of a steel floor. The results obtained during the implantation of a multilayer CrN / ZrN / Cr / Zr coating with low-energy silicon ions are shown. Experimental SAED and XRD, HRTEM, EDS, SIMS, HRTEM, TEM and MAP-EDX and theoretical methods were used, the phase structure was studied. The concentrations of silicon asymmetrically occupying the boundary between the chromium nitride and zirconium nitride layers were 10 and 6. The average period of the two layers was 26 nm, and the average deviation was 1–2 nm. Upon preliminary implantation of the coating with silicon ions, the thickness of the CrN layer was $16.5 \div 17.2$ nm, and the ZrN layer was about 26 nm, and as a result of implantation, the ZrN layer expanded to $35 \div 36$ nm.

Key words: structure, cathode arc, multilayer coatings, nanofilm architecture, ion implantation, phase boundaries, diffusion, segregation.

Кіріспе. Ғарышта, әуе техникасында және ядролық реакторларда жұмыс істеуге арналған заманауи құрылғылар, механизмдер мен аппарат бөлшектерінің тозуға төзімділігі, үйкеліс коэффициенті, қаттылық, коррозияға төзімділігі және тағы басқа да жоғары өнімділік қасиеттерімен бірге плазма мен сәулелену ағындарына жоғары радиациялық төзімділікті қажет етеді. Беттік модификация құралдар мен бұйымдардың қызмет ету мерзімін ұзартудың тиімді және үнемді шешімдерінің бірі екені белгілі [1]. Осыған қатты жабындарды қолдану арқылы оңай қол жеткізуге болады. Ал, жабындар тұрғысынан алғанда олардың барлық механикалық-трибологиялық параметрлері [2, 3], тозуға төзімділігі, температуралық тұрақтылығы [4], қабаттар арасындағы өзара үйлесімділіктері, соның ішінде ең бастысы зерттеуді жүргізуге себепші болған жағдай өзге жұмыстарда зерттелмегендіктен радиациялық сәулеленудің жақсы сіңіп, жұтылуы болып табылды [5].

Si иондарын импланттау – бұл иондарды араластыру үрдісінің әсерінен бөлу шекараларының «бұлыңғырлану» үрдісін күшейтетін факторлардың бірі болып табылады [6, 7]. Айта кететін болсақ, ионды импланттау әртүрлі құрамдағы иондарға әсер еткенде жұқа қабаттардағы жаңа фазалар мен құрылымдарды құрудың және бетінің геометриялық өлшемдерін өзгертпейтін әдістің бірі. Ол қолданылатын энергиясы мен дозаларына қатысты үрдістердің қайталануы мен көбеюінің жоғарғы пайызымен сипатталады. Өзге де өңдеу әдістерімен салыстырғанда модификацияланған беткі қабаттар тамаша адгезияға, тозуға төзімді, термиялық тұрақтылыққа және тағы басқа да жағдайларға төзімді келеді [8].

Мультиқабаттардың элементтік құрамы CrN/ZrN нитридтері мен Cr/Zr металдардың жақсы үйлесімділігінің, сондай-ақ олардың ерекше қасиеттерінің арқасында таңдалды. Атап айтқанда, цирконий қабықшалары жылу өткізгіштігі төмен, жарыққа төзімділігі мен ионды өткізгіштігі жоғары және биосәйкестілігі бар перспективалы материалдар ретінде қарастырылады. Хром қабықшаларының механикалық қасиеттері жоғары, үйкеліс коэффициентті мен коррозияға төзімділігінің арқасында материалдарды коррозия мен тозудан жақсы қорғайды [9].

Сондықтан да, бұл жұмыста алдыға қойған мақсат наноқабатты CrN/ZrN/Cr/Zr құрылымды жабынның микроқұрылымын, элементтік құрамын, диффузиясын, сонымен бірге кремний ионымен импланттау кезіндегі сегрегация үрдісін қарастыру болып табылады.

Материал және зерттеу әдістері. Зерттеу материалы ретінде наноқабатты CrN/ZrN/Cr/Zr жабындары таңдалды. Эксперименттік зерттеулер Сумы мемлекеттік университетінің (Украина) және Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Veritas» озық даму орталығының ғылыми зерттеу зертханаларында, Шығыс Қазақстан университетінің «Ұжымдық қолданыстағы ұлттық ғылыми зертханасында жүргізілді.

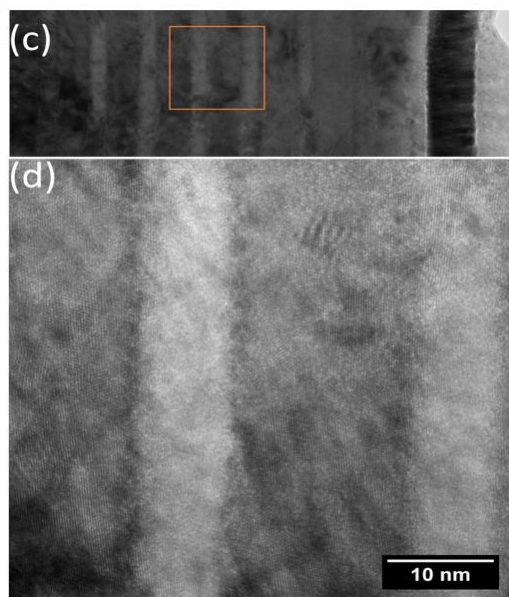
Зерттеу жұмысын жүргізуде төсеніш ретінде өлшемі 22x20x2 мм³, тот баспайтын SUS321 болаттан жасалған төсеніш алынды. Вакуумды-доғалы үдеткіште жабынның шөгугіне дейін вакуумда үлгілердің беті 300 В дейінгі потенциалды жарқырау разрядымен тазартылып дайындалады. Тұндыру реакция газы азот жіберілген кезде құрамы Zr ~99,98, Cr ~99,98 екі металды катодпен жүргізілді.

Ионды импланттау Nissin High Voltage Co Ltd [10] үдеткішінде жүргізілді. Үлгіні талдау кезінде авторлар мына әдістерді қолданды: XRD рентгендік талдау әдісін; TEM (HRTEM) жарықтандырғыш электронды микроскопия әдісін; JEOL F 2100 микроскопында электронды қуаты 200 кВ және STEM-EDX энергия дисперсиялы рентген спектрометрі бар электронды микроскопия мен электронды дифракция. SAED – таңдалған аймақ (электрон) дифракциясы, есептеулер жүргізу үшін молекулалық динамика, SIMS әдістері, сонымен бірге HAADF-STEM және STEM-EDX әдісі жеке жүргізілген [11-14].

Жабынның элементтік құрамын талдау үшін SIMS әдісін қолдандық. Біз зерттеу жұмысымызда CrN/ZrN/Cr/Zr наноқабатты құрылымдық жабындысының микроқұрылымын, элементтік құрамын, диффузиясын, сонымен қатар сегрегация үрдістерін анықтауда $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² мөлшеріндегі Si-мен иондау арқылы 60 кэВ энергияда имплантация жасадық. Иондар шоғырының энергиясы O_2^+ 2 кэВ құрады және вакуумды камераға 1×10^{-8} Торр қысымға дейін берілді. Ион имплантациясы 60 кэВ иондық энергиясында және 1,36 мА/см² ток тығыздығы кезінде «Nissin High Voltage Co Ltd» үдеткішінде жүргізілді.

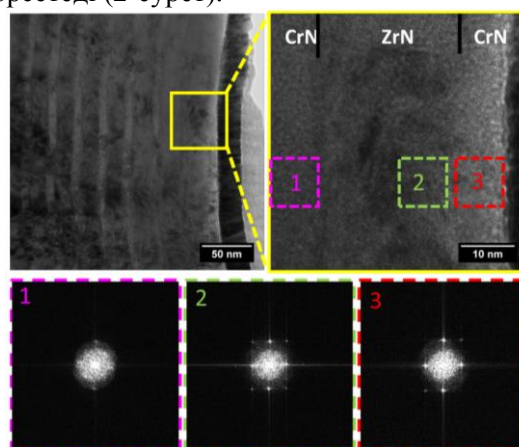
Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Тұндырылып алынған жабынның құрылымына зерттеу жүргізу үшін рентгендік фазалық талдау әдісі қолданылды. Алынған нәтижелер нанокристаллиттердің өсуі бойынша бағытталған (200) жазықтықтардың орташа қарқындылығымен (311) және (222) CrN мен ZrN қырлары центрленген текше (200) жазықтығынан басым дифракцияны көрсетеді.

1-суретте кремний ионымен имплантталмаған (1, с-сурет) және ионмен имплантталған (1, d-сурет) үлгінің көленең қимасы бойынша кремний ионымен имплантталған бөлімдерінің HRTEM және SAED кескіндері көрсетілген. HRTEM көмегімен алынған нәтижелер кремнийсіз аймақта мөлшері шамамен 10 нм болатын дәндердің дамуын көрсетті, ал имплантталған бөлікте дәндер тереңдікке байланысты біртіндеп 8-ден 4 нм өлшемге дейін таралады.



1-сурет. с – имплантталмаған, d – кремниймен имплантталған HRTEM және SAED көрінісі

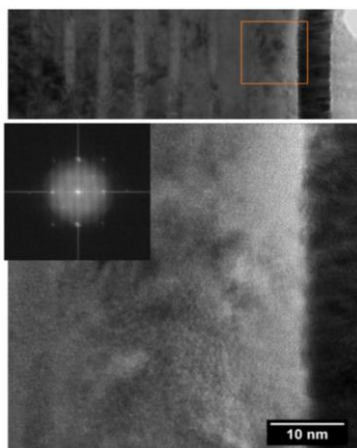
Суреттерден көрініп тұрғандай, жабынның айқын поликристалды фазасы және дифракциялық спектрлерінде сақиналар түрінде көрінетін аймақтары бар. Дифракциялық кескіндерде CrN мен ZrN қабаттарыда айқын көрінеді, бұл осы қабаттардың релаксация үдерісінен өткендігін көрсетеді (2-сурет).



2-сурет. HRTEM кескіні және имплантталған CrN/ZrN жабынының таңдалған аймақтарының сәйкес келетін Фурьең жылдам түрлендірулерінің үлгілері

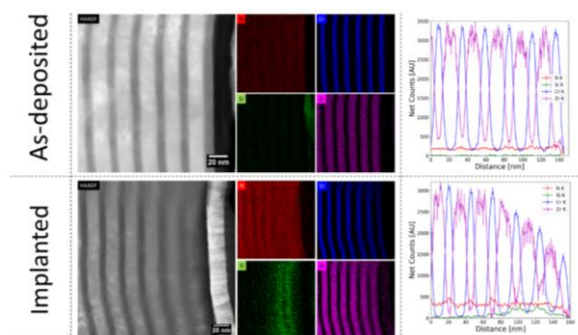
Жабынды TEM мен SAED әдістері бойынша зерттеу нәтижесі 3-суретте бетіне жақын Pt қабатының астында кремний иондарын импланттау арқылы пайда болған аморфты аймақ және карбид қышқылдарының (нитрид қышқылдарының) ішінара «иондық араласқан» қабатында аморфты аймақтың дифракциялық көрінісі байқалады, бірақ бұл аймақтың CrN мен ZrN фазаларына және қандай қабаттарына сәйкес келетінін болжау

қиын. Екі қабаттың орташа кезеңі 26 нм құраса, ал орташа ауытқуы 1-2 нм құрады.



3-сурет. «Ион аралас» беттік қабаттың аморфталған аймағының TEM бейнесі мен SAED кескіні

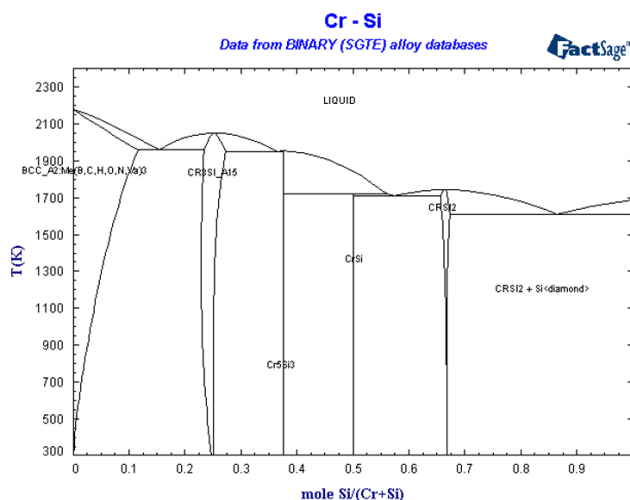
Si иондарын импланттаудан кейінгі көпқабатты наноқұрылымды жабынның бірінші қабаттарының элементтік құрамының нәтижелерін талдау (STEM, SIMS, MAP-EDX) диффузия, CrN торында кремнийдің еруі және бөліну сияқты үрдістерге байланысты бірінші қабаттар құрылымында айтарлықтай өзгерістер болғанын көрсетеді. SixNy фазасы арқылы Cr(Si)N қатты ерітіндісінің және дәннің (нано) қоршалған ортасының жоғарғы қабаттарында, дәлірек айтқанда 2 мен 3-ші қабаттарының жоғарғы жағында стехиометрия $(Cr_{20}Si_{10}Zr_{28})N$ болады, сол кезде олардың арасындағы аралықта ZrN қабатында стехиометрия айтарлықтай ерекшеленеді, айта кетсек $(Cr_{20}Si_6Zr_{25})N$ және қалыңдығы 10 нм құрайды. Жабынды кремний ионымен импланттауға дейінгі кезеңде CrN қабатының қалыңдығы $16.5 \div 17.2$ нм, ал ZrN жуық шамамен 26 нм құрады, ал импланттау нәтижесінде ZrN қабаты $35 \div 36$ нм-ге дейін кеңейген (4-сурет).



4-сурет. MAP-EDX имплантталған және тұндырылған үлгілердің элементтік құрамын салыстыру

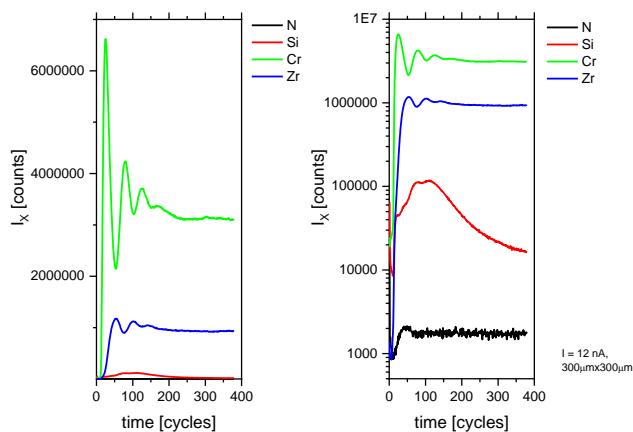
Иплантталған үлгіде азот жабын бетінен ішке қарай қайта бөлінеді және оның шоғыры бастапқыға қарағанда 2-2,5 есе жоғарылайды. Сонымен қатар Cr-Si күй диаграммасынан

(5-сурет) бөлме температурасында Cr-да 10 at. %-ке дейін кремнийдің жақсы еруін көруге болады.

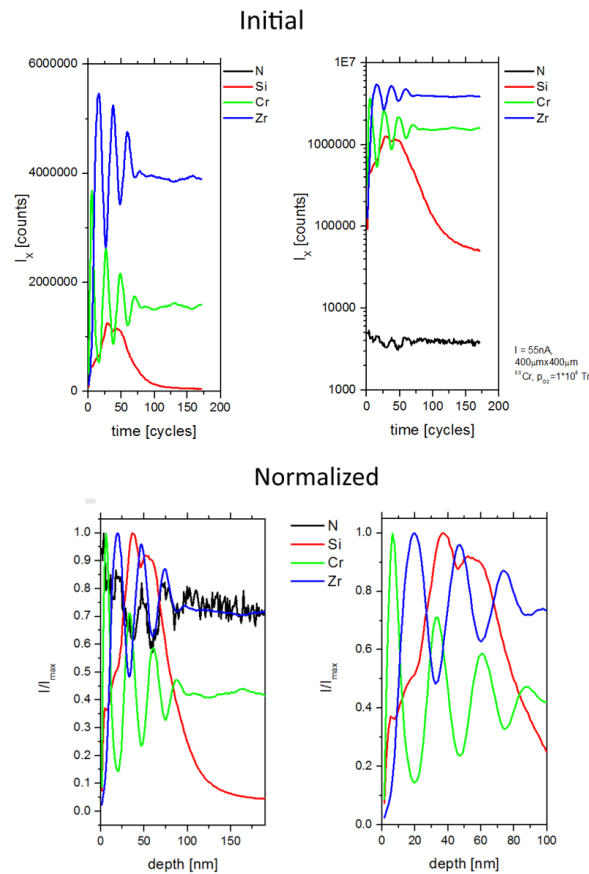


5-сурет. Cr-Si фазалық диаграммасы
(екілік қорытпалардың FactSage ашық деректер базасынан қайта қаралған)

Жабындағы хром қабаттарында және бөліну шекараларында кремний бар екендігі туралы белгіні дәлелдеу үшін SIMS элементтік талдауы (жоғары дәлдікпен) жүргізіледі. Бұл (6, *a*, *b*-суретте) жабын бойымен элементтердің типтік таралуын көрсетеді. Барлық қабықша құрамының біркелкілігін тексеру үшін талдау 300×300 мкм (5-сурет) (иондық ток 12 нА) және 450×450 мкм (7-сурет) (иондық ток 55 нА) болатын, бірнеше жеке аудандарда жүргізіледі. Бұл Si^+ тогының сигналы тереңдікте өзгеріп отырады және бұл токтың жоғары мәндері цирконий нитридінің қабаттарына қарағанда хром нитридінің қабаттарында байқалды.



6-сурет. SIMS көмегімен тереңдік профилін талдау. Кратер 300×300 мкм.
Бастапқы ионды сәуленің тогы 12 нА

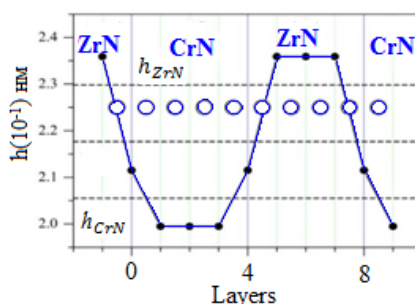


7-сурет. SIMS көмегімен тереңдік профилін талдау. Кратер 450×450 мкм.
Бастапқы ион сәулесінің тогы 55 нА құрайды

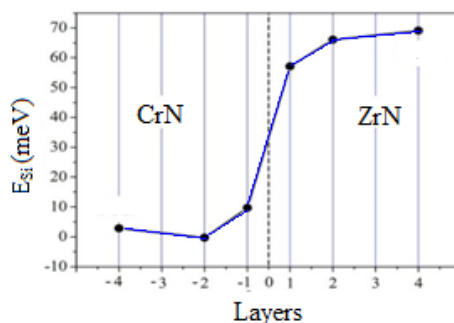
SIMS әдісімен алынған профиль тереңдігі EDS сканерлеумен алынған нәтижеге карағанда үлкен, яғни 120 нм емес, 150 нм-ден жоғары екендігін көреміз. Бұл жерде негізгі себеп, кремнийдің кері көлемді таралуына байланысты ішінара эрозия болуы мүмкін, себебі терең SIMS әдісі көлеміндегі элементтер сигналдарының жергілікті тербелістеріне сезімтал. Сонымен қатар, кремнийдің екі есе бөлінуін жоғарғы қабаттар арасындағы бөліну шекараларындағы шыңдардың концентрациясымен анықтауға болады және де бұл күй диаграммасында көрсетілген. Cr-Si тепе-теңдік ығысуы туралы болжаммен жақсы үйлеседі.

Тұндырылған қабықшалардың интерфейстік қасиеттерін неғұрлым толық зерттеу үшін CrN және ZrN жаппай құрылымдарының алғашқы принциптердегі есептеулері (молекулалық динамика әдісі), сонымен қатар CrN/ZrN (001) негізіндегі суперторларға есептеулер жүргізілді. Жабын CrN/ZrN (001) ауысуында мәндері көлемді CrN және ZrN жабынындағы қабаттар арасындағы қашықтықтардың орташа мәнінен аз, бұл интерфейс айналасындағы күшті химиялық байланысты көрсетеді (8-сурет). Шынында да, CrN/ZrN (001) супертор үшін интерфейснің есептелген энергиясы $0,269 \text{ Дж/м}^2$ болады. Бөліну шекараларының теріс энергиясы хром нитридін және цирконий нитридінің кернеулік көлемімен салыстырғанда интерфейснің қалыптасуы энергетикалық тұрғыдан қолайлы екенін көрсетеді. Демек, формула бойынша есептелген қабат энергиясы $0,745 \text{ Дж/м}^2$,

деформация энергиясының үлкен мәніне байланысты $1,014 \text{ Дж/м}^2$ оң нәтижені береді. Демек, CrN/ZrN (001) суперторлары торлардың сәйкес келмеуі нәтижесінде деформация энергиясының көп жиналуына байланысты метақалыпты болады (9-сурет).

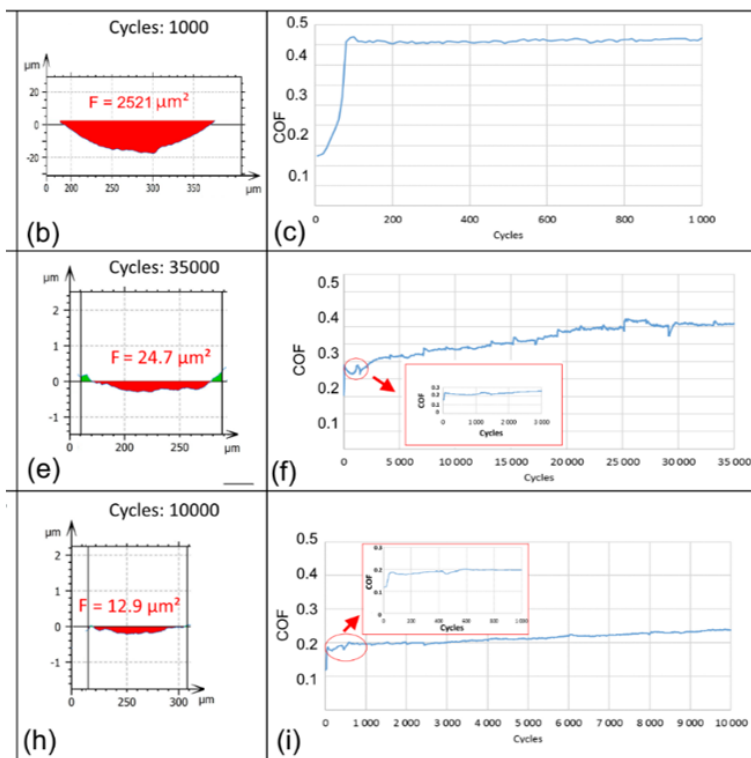


8-сурет. Кабаттар арасындағы қашықтық (h) (001) бағытында. Үлкен ақ шеңберлер (001) бағыты бойынша атомдар тізбегін білдіреді. Нүктеленген көлденең сызықтар CrN (h_{CrN}), ZrN (h_{ZrN}) және $h_{AV} = 1/2 (h_{CrN} + h_{ZrN})$ көлемдегі аралық кабаттарын білдіреді



9-сурет. 128 атомдық CrN/ZrN (001) гетероқұрылымдарында (001) бағытына перпендикуляр әртүрлі кабаттардағы металл атомын кремний атомына алмастыру энергиясы

Зерттеу барысында тозған бұйымдарға, сонымен бірге зерттелетін жабындылардың бетіндегі тозу ойықтарының құрылымын зерттеу мен шариктегі тозу дақтарының өзгерісін анықтау арқылы талдау жүргізілді. Кремний бөлшектерінің CrN/ZrN жабындысының тозуға қарсы тұру қабілетіне әсерін тексеру үшін жасалды. 10-суретте трибологиялық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Имплантталмаған жабынға қарағанда кремний иондарымен имплантталған жабынның тозуға төзімділік қабілеті шамамен үш сатыға жоғары болды.



10-сурет. Трибологиялық тестілеудің нәтижесі:

b, e, h – тозуы бар іздер; c, f, i – үйкеліс ауытқуларының орташа коэффициенттері

Үйкелістің орташа коэффициенті 0,25-0,37-ден 0,19-0,22 аралығында болады. Тозудың екі жолындағы тозу аймағындағы жылжымалы бағытта ешқандай ақаудың болмағанын көрсетеді.

Қорытынды. Бұл жұмыста қалың нитридті қабаттары бар және жұқа металл қабаттары бар көпқабатты нанокұрылымды (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) жабындары зерттелді. Беткі және көлденең қимасын зерттеу Cr, Zr, CrN және ZrN қабықшаларының тегіс қабаттармен және олардың арасындағы жақсы анықталған бөліну шекаралары сапалы жабынның алынғанын көрсетті.

Бұл зерттеу кремний ионымен импланттаудың CrN/ZrN наноқабаттарының микроқұрылымына, құрамына және тозуға төзімділігіне әсері туралы алғашқы нәтижелерді ұсынды. SRIM есептеулері, STEM-EDS және SIMS көмегімен құрамын өлшегенде алынған нәтижелер көрсеткендей, 2 және 3 қосқабаттар арасындағы шекарада иондардың тиімді диапазоны 10 ат. % Si концентрациясы бар 60 нм өлшемінен асатынын көрсетеді.

Алынған жабынды кремний ионымен импланттауға дейін CrN қабатының қалыңдығы 16.5÷17.2 нм, ал ZrN жуық шамамен 26 нм құрады, ал импланттау нәтижесінде ZrN қабаты 35÷36 нм-ге дейін кеңейген. Импланталған үлгіде азот жабын бетінен ішке қарай қайта бөлінеді және оның шоғыры бастапқыға қарағанда 2-2,5 есе жоғарылайды. Сонымен қатар Cr-Si күй диаграммасынан бөлме температурасында Cr-да 10 ат. %-ке дейін кремнийдің жақсы еруін көруге болады.

Үйкелістің орташа коэффициенті 0,25-0,37-ден 0,19-0,22 аралығында болады. Тозудың

екі жолындағы тозу аймағындағы жылжымалы бағытта ешқандай ақаудың болмағанын көрсетеді. Қорытындылай келе, кремний ионымен импланттау әдісі құралдың ұзақ уақыт бойы жұмыс істеу сапасын арттырып, тозуға беріктігін жоғарылатады.

CrN/ZrN (001) гетероқұрылымының түзілу энергиясы алғашқы принциптерден есептеу көрсеткендей, хром мен цирконийдің тетрагональды деформацияланған көлемді нитридтерімен салыстырғанда интерфейстердің пайда болуы энергетикалық тұрғыдан тиімді. Дегенмен, түзілу энергиясы оң болды, бұл CrN/ZrN (001) суперторлардың сәйкес келмеуі нәтижесінде деформация энергиясының көп жиналуына байланысты метақалыпты болуы керек екенін көрсетеді.

Бұл жұмыс Украинаның мемлекеттік бюджеттік бағдарламасымен қолдау тапты [№0119U100787 және 0120U100475 гранттар]. Авторлар Сумы мемлекеттік университетінің докторы Александр Бондарға кейбір эксперименттер жүргізуге және нәтижелерді талқылауға көмектескені үшін алғыс айтады. Авторлар Microscopy Australia компаниясы қолдайтын жабдықты Сиднейдегі Марк Уэйнрайт (MWAC) аналитикалық орталығының электронды микроскоп (EMU) бөлімінде жүргізілгенін растайды.

Бұл жұмыс 2018 жылғы 16-наурызда №197 келісімшарты «Машина жасау өнімі үшін тозуға төзімді материалдар өндірісінің инновациялық технологияларын зерттеу және әзірлеу (Исследования и разработка инновационных технологий получения износостойких материалов для изделий машиностроения)» Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі Ғылым комитетінің ПЦФ қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды.

Әдебиеттер тізімі

1. Surface modification of stainless steel for biomedical applications: revisiting a century-old material. A.Bekmurzayeva, W.J. Duncanson, H.S. Azevedo, D. Kanayeva // *Mater. Sci. Eng. C* 93 (2018) 1073-1089
2. Hardness and tribology measurements on ZrN coatings deposited by reactive sputtering technique. M.A. Auger, J.J. Araiza, C. Falcony, O. Sánchez, J.M. Albella // *Vacuum*.81.2007; 1462-1465.
3. Enhancing mechanical and tribological performance of multilayered CrN/ZrN coatings. J.J. Zhang, M.X. Wang, J. Yang, Q.X. Liu, D.J. Li // *Surf. Coatings Technol.* 201. 2007; 5186–5189.
4. Microstructural evolution of nanochannel CrN films under ion irradiation at elevated temperature and post-irradiation annealing. J. Tang, M. Hong, Y. Wang, W. Qin, F. Ren, L. Dong, H. Wang, L. Hu, G. Cai, C. Jiang J. Nucl. // *Mater.* 500 (2018) 242–251.
5. A study on the corrosion resistance of ZrN/CrN multilayer nanostructured coating applied on AISI 304 stainless steel using Arc-PVD method in 3.5 wt% NaCl solution. P. Mohamadian Samim, A. Fattah-alhosseini, H. Elmkhah, O. Imantalab // *Mater. Res. Express.* 6 (2019) 126426. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5ab6>.
6. The study of multilayer coatings based on MoN(MoZr)ZrN and (TiMo)N/(TiMo), (CrZr)N/(CrZr) obtained by the method of vacuum-arc deposition. R.E.Sakenova, N.K. Erdybaeva, A.D. Pogrebnyak, M.K. Kylyshkanov // *Bulletin of the Karaganda university PHYSICS Series.* – 2019. – № 2(94). – P. 14-21.
7. Сакенова Р.Е., Погребняк А.Д., Қылышқанов М.Қ. (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) негізіндегі көп қабатты жабынның микроқұрылымы мен элементтік құрамы. // Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТУ Хабаршысы. – Алматы, 2020. – № 3(139). – С. 615-622.
8. Ion Mixing. S. Matteson, M.A. Nicolet // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 13. 1983;339-362.
9. Antibacterial Effect of Au Implantation in Ductile Nanocomposite Multilayer (TiAlSiY)N/CrN Coatings. A. D. Pogrebnyak, 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, M. Opielak, P. Zukowski, P. Konarski // *ACS Appl. Mater. & Interfaces.* 11. 2019;48540-48550.
10. High-Current Heavy-Ion Accelerator System and Its Application to Material Modification. Kishimoto, N.; Takeda, Y.; Lee, C.-G.; Umeda, N.; Okubo, N.; Iwamoto, E. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001, 40 (Part 1, No. 2B), 1087–1090.
11. Nanoscale Architecture of (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) Nanocomposite Coatings: Microstructure, Composition, Mechanical Properties and First-Principles Calculations. 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.; Pogrebnyak, A. D. // *J. Alloys Compd.* 2020, 831, 154808.
12. Сакенова Р.Е., Ердыбаева Н.К., Погребняк А.Д., Қылышқанов М.Қ. Вакуумды-доғалық әдіспен алынған көп қабатты жабындардың құрылымы мен қасиеттері. // Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университетінің хабаршысы. – Өскемен, 2019. – № 4(86). – С.144-151.
 13. Nanoscale Architecture of (CrN/ZrN)/(Cr/Zr) Nanocomposite Coatings: Microstructure, Composition, mechanical properties and first-principles calculations. O.V. Maksakova, R. F. Webster, R. D. Tilley, V. I. Ivashchenko, B. O. Postolnyi, O. V. Bondar, Y. Takeda, V. M. Rogoz, R.E.Sakenova,P.V. Zukowski, M. Opielak, V. M. Beresnev, A.D. Pogrebnyak // *Journal of Alloys and Compounds.* – Volume 831. – 154808.2020.– P. 1-15. ISSN: 0925-8388, IF=4,175
 14. Сакенова Р.Е., Ердыбаева Н.К., Погребняк А.Д. ZrN/CrN/ZrCr/ZrN/CrN көп қабатты композиттік жабынды зерттеу әдістері // Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университетінің хабаршысы. – Өскемен, 2020. – № 2(88). – С.175-180.
-