

**O'ZBEKSTAN RESPUBLİKASI JOQARI HA'M ORTA ARNAWLI BİLİM
MİNİSTRLİĞİ**

**BERDAQ ATINDAG'I QARAQALPAQ MA'MLEKETLİK
UNİVERSİTETİ**

Qol jazba h'uqıqında

UDK 621.793:539.61:669.018:620.1

MASHARİPOVA DAMEXAN

**Ti-Hf-Si-N NANOSTRUKTURALI QAPLAMALARDIN' QATTILIG'I
HA'M FİZİKALIQ-MEXANİKALIQ QA'SİYETLERİNE FAZALIQ
SOSTAVI HA'M DEFECTLİK STRUKTURASININ' TA'SİRİ**

5A140204 – Kondensatsiyalang'an ortalıqlar fizikası h'a'm materialtanıw

Magistr

Akademiyalıq da'rejesin alıw ushın jazılǵ'an dissertatsiya

İlimiy basshısı:

f.-m.i.k. Jollıbekov B.

No'kis – 2013

M A Z M U N I

KIRISIW.....	3
	5
I BAP. A'DEBIYatLARG'A ShOLIW.....	
Zatlardın' razmerlik qa'siyetleri.....	5
Teoriyalıq bekkemlik.....	10
Kristallardın' plastikalıq deformatsiyası.....	14
Kompozitlerdi alıw printsipi. Nanorazmerli toltırğ' ıshlar.....	19
II BAP. EKSPERİMENTLER METODİKASI.....	23
Vakuum-dugalı qaplama alıw texnologiyası.....	23
Eksperimental ustanovkalar h'a'm o'lsheuler metodikası	29
III BAP. EKSPERİMENTLER NA'TIYJELERİ HA'M OLARDI	
TALQILAW.....	33
JUWMAQLAW	51
PAYDALANILG'AN A'DEBIYatLAR.....	52

K I R I S I W

Ko'p komponentalı qattı nanostrukturalardı (nanokompozit qaplamalar) mısalı Zr-Ti-Si-N, Zr-Ti-N, Mo-Si-N tiykarındag'ı, jaqsılang'an qa'siyetleri menen islep shıg'ıw h'a'zirgi zaman materialtanıw iliminin' aktual uazıypaların' biri [5-8]. Nanomasshtab razmerdegi materiallarg'a ta'n bolg'an unikal qa'siyetlerge iye bolg'an ko'p komponentalı nanostrukturalı qaplamalar h'a'zirgi zaman materialtanıwı h'a'm mashina qurılısı ushın u'lken qızıg'ıwshılıq payda etedi. (Zr, Ti)N yamasa TiN den turatug'ın nanoda'nesheledi α -Si₃N₄, BN kvaziamorf yamasa amorf fazaları qorshap alg'anda bul qaplamalardıń qattılıg'ı 80 GPa shekem, onnanda ko'p bolıwı mu'mkin. U'lken ju'k astında isleytug'ın mashina qurılısı buyımların' betindegi ko'pfunktsional juqa plenkalı materiallardın' adgeziyalıq bekkemligi, sharshawg'a shıdamlılıg'ı, jeliniwge h'a'm korroziyag'a shıdamlılıg'ı joqarı h'a'm kishi su'ykelis koeffitsientine iye bolıwı kerek. Sonlıqtan sho'giw temperaturası 550-600°S, bolg'an qaplamalardıń jan'a variantların islep shıg'ıw uazıypası payda boladı, sonda da'neshele shegerası do'geresinde spinodal (fazalı) segregatsiya protsessin juwmaqlawg'a mu'mkinshilik beredi. Bul jumıstın' **maqseti** joqarı qattılıqqa (> 40 GPa) iye, termikalıq turaqlı (> 1200°S), joqarı serpimlilik moduline iye bolg'an tiykarındag'ı qaplamalardıń jan'a variantların islep shıg'ıw h'a'm olardıń strukturasın h'a'm qa'siyetlerin olardı alıw rejimlerine g'a'rezli tu'rde izertlew bolıp esaplanadı.

Nanostrukturalı qaplamalardıń xarakteristikaların izertlew h'a'm olardı tu'sindiriw ushın betlik qatlamların nanometr h'a'm submikron qa'ddilerde analizlewdiń jan'a sertifikatsiyalang'an metodların qollanıwdı talap etedi. Deformatsiyalıq xarakteristikalardı izertlew indentordı u'zliksiz batırıw rejiminde isleytug'ın nanoindentirlew metodın qollanıw na'tiyjesinde son'g'ı jılları tez rawajlandı (qaplamalar ushın ISO/CD 14577-4 [12]), ol qaplamanın' serpimlilik modulin, qattılıg'ın h'a'm serpimli qata tikleniwın anıqlawg'a mu'mkinshilik beredi [13,14]. Usının' na'tiyjesinde adgeziyalıq (standart

ISO/DIS 20502) h'a'm tribologiyalıq (standart ISO 20808) sınaqlardı o'tkergende Ti-Hf-Si-N/podlojka sistemasının' deformatsiyalıq xarakteristikaların o'lsheuge, adgeziyalıq bekkemligin o'lsheuge u'lken dıqqat qaratıldı.

I BAP. A'DEBİYATLARG'A SHOLIW

1. Zatlardın' razmerlik qa'siyetleri. Materiallardın' bekkemligi tu'sinigine teoriyalıq jaqınlasıwlar.

O'tken a'sirdin' 60-shı jılları kristallardın' du'zilisi betine jaqınlasıwı menen o'zgeretug'ınlıg'ı belgili boldı. Bul betti izertlew din' jan'a eksperimental metodların' payda bolıwı menen mu'mkin boldı. Usınday effektiv metodlardın' biri a'ste elektronlardın' difraktsiyası (DME) boldı. Germaniy, kremniy h'a'm basqa kristallarda bettegi 5-6 monoqatlam stabil emes h'a'm qayta du'ziletug'ınlıg'ı anıqlandı. Bul qatlamlardag'ı atomlar jaylasqan yacheykalardın' xarakterli razmerleri ishtegi razmerlerinen u'lken. Bunın' sebebi betlik qatlam bir ta'repten regulyar kristall reshetkasına h'a'm da'wirli potentsialg'a iye, al ekinshi ta'repi bos kn'islik. Mine usı sharayatlarda kristall reshetkasının' potentsialı bette u'ziliwi mu'mkin emes – ol o'zgeredi h'a'm kemeyedi. Potentsialdın' kemeyiwi menen bet qayta du'ziledi. Keyin betlik monoqatlamlar ko'lemlik qa'siyetlerden sezilerli o'zgeshe qa'siyetlerge iye bolatug'ınlıg'ı anıqlandı. Mısalı, termikalıq ken'eyiw koeffitsienti, jıllılıq sıyımlıg'ı, diffuziya koeffitsienti ko'lemdegiden birneshe ese ko'p ekenligi belgili boldı. Bul betlik qatlamnın' ulıwma qalın'lıg'ı derlik barlıq materiallar ushın birdey h'a'm 2 nm den artpaytug'ınlıg'ı qızıq. Makro deneler ushın bul bettegi atomlardın' u'lesi esapqa almasay da'rejede az h'a'm olardın' materialdın' qa'siyetine qosatug'ın u'lesin bah'alap bolmaydı. Eger biz kristall zattın' bir kubigin alsaq, onın' h'a'rbir altı qaptalının' tek g'ana 5-6 betlik atomlıq qatlamnan turatug'ın bolsa onda qırı 10-12 atomnan turatug'ın, tek g'ana betlik atomlardan turatug'ın kubikti alamız. Bettegi atomlar bul kubikte derlik 100% h'a'm onı nanomaterial dep esaplasaq boladı. Bunday struktura barlıg'ı 1000-2000 atomnan ibarat bolıp onın' razmeri 10 nm boladı. Bunday struktura a'debiyatta nanoklaster dep ataladı. Demek bul joqarg'ı shegera, al to'mengi shegera – eki atom boladı. Bul struktura ko'lemlikten o'zgeshe bolg'an qa'siyetlerge iye boladı. Ulıwma alg'anda nanostrukturalardın' razmerleri h'a'm onın' qa'siyetleri h'aqqındag'ı h'a'rqıylı a'debiyatlardı ulıwmalastırıp to'mendegidey juwmaqlarg'a kelemiz. Bo'leksheler razmeri 10 nm den kishi bolsa

bul h'aqıyqıy nanomaterialar, olardıń qa'siyetleri ko'lemlik qa'siyetlerden ku'shli o'zgeshe boladı. 10 nm den 100 nm ge shekemgi oblasttı o'tiw oblastı yamasa nanometrli razmerler oblastı dep atasa boladı. Razmerleri 100 nm den u'lken bolg'an bo'leksheler submikroskopik yamasa ultradispers bo'lekshelerge kiredi.

Nanomateriallardın' strukturası. O'zara ta'sirlesetug'ın atomlar mug'darına g'a'rezli zattın' kondensirlengen h'alı qalay payda bolıwı qızıg'ıwshılıq payda etedi. Esaplawg'a bolatug'ın bunday birtekli atomlar birikpesi klasterler dep ataladı. Yadta tutıwımız kerek, klaster ju'da' belgili fizikalıq protsessler, mısalı, shan'lang'an yamasa erigen zattın' egregatsiyası, na'tiyjesinde payda bolatug'ın struktura. Ta'biyiy jag'daylarda klasterlerde sonday stomlıq struktura payda boladı, ol minimal betlik energiyag'a iye boladı. Ayırım jag'daylarda atomlardın' kishi mug'darında barlıq sistemanın' turaqlılıg'ın ta'miyinlew ushın atomlardın' sonday konfiguratsiyası payda bolıwı mu'mkin, ol kristalldın' ulıwma energiyasının' minimumına sa'ykes keledi. A'dette qaptaldan oraylasqan (GTsK) h'a'm geksagonal tıg'ız upakovkalang'an strukturalar (GPU) payda boladı, a'dettegi kristall jag'dayında basqa strukturalar bolg'an bolsada. 5-shi ta'rtpili simmetriyag'a iye klasterlerde ushırasadı.

GTsK struktura ushın minimal ko'lem 13 atomnan turadı ol kubooktaedr dep ataladı. Kishi deformatsiyadan kubooktaedr ikosaedrge ge aylanadı i besinshi ta'rtpili simmetriyag'a iye boladı. A'dette az mug'dardag'ı atomlardan turatug'ın klasterler defektke iye emes boladı. Klasterdegi atomlar mug'darı shama menen ikosoaedr h'a'm dodekaedr strukturalar payda etse olar GTsK strukturalı tetraedr bloklarg'a bo'linedi, olardıq shegeraları dvoynikler, dislokatsiyalar h'a'm diskolinatsiyalardan turadı. Strukturalıq elementlerinin' razmerleri 10 nm den 100 nm ge shekem bolg'an u'lken klasterler h'a'm nanokristall materiallar bunday defektlerge iye bolmaydı.

10 – 100 nm nanooblastında materialdın' qa'siyetleri a'dewir o'zgeredi. Kristall reshetkasının' parametri o'zgeredi, eriw temperaturası kemeyedi. Bul effektler 1– 10 nm oblastında anıq ko'rinedi, zattın' qa'siyetleri kardinal tu'rde o'zgerip jan'a h'allar payda bolıwı mu'mkin, ol a'dettegi jag'dayda iske aspaydı.

Strukturalıq elementlerdin' razmerleri ano da'rejege shekem kishireygende fazalıq o'tiw temperaturası o'zgeredi h'a'm joqarı temperaturalı faza stabillesedi. Xarakterli bolmag'an amorf fazalar, ko'p atomlı klasterler payda bolıwı mu'mkin. Usı waqıtta fazalıq o'tiwler jılısıp sozılıp ketedi. Jılılıq sıyımlıg'ı sıyaqlı termodinamikalıq xarakteristikanı retlep turatug'ın Debay temperaturasında o'zgeredi, zattın' terbelmeli spektrinde to'men jiyilikli modalar artadı, yag'nıy nanostruktura h'aldag'ı material jumsarg'an sıyaqlı boladı.

Teoriyalıq jaqtan rıxlıy lokal strukturag'a iye da'nesheler arasındag'ı shegeralar boylap atomlardın' diffuziyası esabınan, da'neshe ko'lemindegi ge qarag'anda kishi diffuziya energiyası esabınan kishi kristall bo'lekshelerdegi yamasa klasterlerdegi atomlardın' qozg'alıwshan'lıg'ı h'a'm transport qa'siyetleri a'dewir joqarı bolıwı kerek. Modellestiriwdin' ko'rsetiwinshe bunday sistemalardag'ı atomlardın' joqarı qozg'alıwshan'lıg'ı h'a'm migratsiyanın' kollektiv xakteri tastıyıqlanadı, biraq bul protsesslerdi eksperimental izertlew og'ada qıyın h'a'm na'tiyjeler qarama qarsılıqlarg'a iye.

Geterogen ko'p komponentalı qattı fazalı sistemalar ushın, nanokompozitler usıg'an kiredi, kmoponentalardın' ku'shli fazalar aralıq betlik o'z-ara ta'sirlesiwın esapqa alıw kerek. O'zliginen dispergleniw qubılısıda belgi, bunda komponentalardın' biri nano h'alda boladı, al basqa fazanın' effektiv razmeri ku'shli kishireyedi h'a'm eki fazalı nanokompozitti payda etedi, birqatar quramalı birikpeler qattı fazada spekanie bolg'anda bul qubılıs ayırm jag'daylarda a'melde bayqaladı.

Solay etip, nanokompozittin' tiykarg'ı qa'siyetin anıqlaytug'ın tiykarg'ı faktor – fazalar aralıq o'z ara ta'sirlesiwler xakteri.

Bekkemlik dep a'dette materialdın' bo'leklenip buzılıwına qarsılıq etiwı tu'siniledi. Buzılıwg'a qarsılıq atomlar arasındag'ı o'z ara ta'sirlesiwden payda boladı. Atomlar arasındag'ı o'z ara ta'sirlesiw tartısıw ku'shleri menende iyterisiw ku'shleri menende iske asadı. Atomlar arasındag'ı iyterisiw ku'shleri atomlardın' toltırılğ'an elektron qatlamları bir birine tiyiskendey ju'da' kishi qashıqlıqta ta'sir etedi. Atomlar arasındag'ı qashıqlıqtın' artıwı menen iyterisiw ku'shi tez kemeye

baslaydi. Ol a'dette $r^{A/n}$ g'a'rezliligi menen ta'riplenedi, bul jerde A turaqli shama, r –qashıqlıq, al n bolsa 8-12 shamaların qabıl etedi. Tartısıw ku'shi bolsa kulonlıq ta'biyatqa iye h'a'm $r^{B/2}$ g'a proporsional, bul jerde V turaqli shama. Juwmaqlawshı ku'sh $r = r_{min}$ bolg'anda minimumg'a iye. Bul jag'dayda sistema turaqli boladı.

Materialdın' bekkemligi atomlar arasındag'ı ximiyalıq baylanısqa g'a'rezli. Bul baylanıs energiyası qansha ko'p bolsa, bekkemlik sonsha u'lken boladı. Qattı denede barlıq parmetrler baylanısqa, kristall potenitsalı qansha u'lken bolsa, atomlar arasındag'ı baylanıs sonsha u'lken, bekkemlik sonsha joqarı boladı.

Potentsial qansha ko'p bolsa, kristalldın' ishki energiyası sonsha u'lken. Son'g'ı onjıllıqlarda atomlar aralıq potentsiallardı esaplawdın' empirikalıq ko'p tipleri usınıldı h'a'm qollanımaqta: Djonson, Morze, Brn–Mayer, Lenard–Djonson h'a'm t.b. Kristalldın' tolıq energiyası ishki h'a'm betlik energiyalar qosındısınan turadı. Ulıwma balans ishindegi betlik energıyanın' u'lesi kristall razmerinin' kishireyiwi menen artadı.

Serpimlilik teoriyasının' ayırım tu'siniklerin qarayıq. Eger material mexanikalıq ta'sirge duwshar bolsa, onda ol o'zinin' formasın o'zgetedi h'a'm demek o'zinin' geometriyalıq formaların o'zgetedi. Razmerdin' o'zgeriwi bul deformatsiya dep ataladı. Eger ta'sirdi alıp taslasaq dene o'zinin' da'slepki formasına qaytıp kelse onda bul deformatsiya qaytımlı yamasa serpimli deformatsiya dep ataladı. Eger dene o'zinin' formasına qaytıp kelmese, onda bunday deformatsiya qaytımsız boladı. Deformatsiya uzınlıq birlikleri menen o'lshenedi. Sİ sistemasında qattı denenin' deformatsiyası metrden kelip shıg'atug'ın qosımsha birliklerde – millimetr, mikrometr, anometrlerde o'lshenedi. Biraq ko'binese salıstırmalı deformatsiya ε qollanıladı. Salıstırmalı deformatsiya $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ menen anıqlanadı, bul jerde Δl denenin' l razmerinin' o'zgerisi. Jiwi jag'daylarda salıstırmalı deformatsiya protsentler menen an'latıladı. Deformatsiyalanbag'an kristall ten'salmaqlıq h'alda boladı. Ol deformatsiyalang'anda onı qurawshı atomlar ten'salmaqlıq h'aldan shıg'adı.

Denede deneni da'slepki h'al'g'a alıp keliwge umtilatug'ın ku'shler payda boladı. Bul ishki ku'shler molekulyar xarakterge iye bolıp o'zinin' ta'biyatı boyınsha jaqınnan ta'sir etiwshi boladı. Sonlıqtan, eger denenin' qandayda bir kishi ko'lemi basqasına F ku'shi menen ta'sir etse, onda bul ku'shler olardı ajıratıp turıwshı S bet arqalı ta'sir etedi. Mine usı jerden mexanikalıq kernew σ tu'sinigi payda boladı, ol

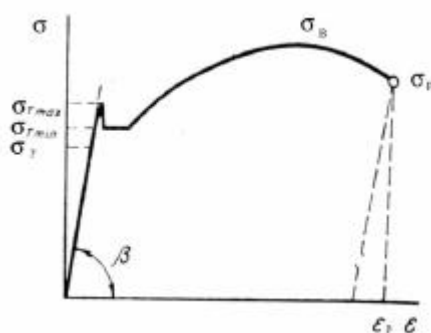
$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

tu'rinde anıqlanadı h'a'm SI sistemasında – N/m^2 o'lshe mine iye.

Real dene ushın F –deneni sozıwshı, tawlawshı yamasa qıysayıwshı ku'sh, S – denenin' kese kesiminin' maydanı. Mexanikalıq kernew σ menen serpimli deformatsiya Guktın' serpimlik nızamı menen baylanısqa:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (2)$$

bul jerde E serpimlilik moduli yamasa Yung moduli. –su'wrette qattı deneni deformatsiyalaw iymekligi ko'rsetilgen, iymekliktin' bastag'ı sızıqlı uchastkası Guk nızamın ta'ripleydi. (2.2) degi Yung moduli materialdın' serpimli deformatsiyasınin' tiykarg'ı xarakteristikası boladı h'a'm jiyyı jag'dayda praktikada anıqlanadı.



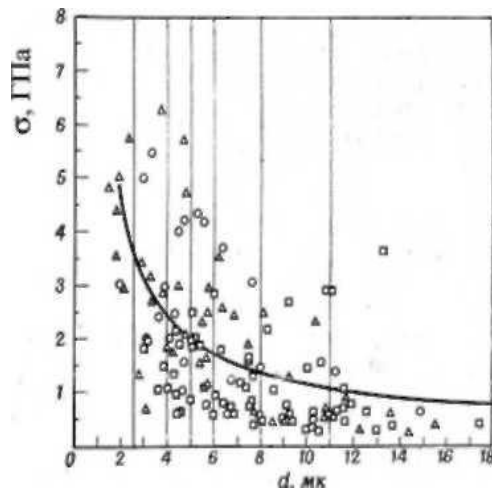
1-su'wret. Metall quymanı deformatsiyalaw iymekligi, baslapqı sızıqlı uchastka, plastikalıq ag'ımnın' σ_m minimal h'a'm maksimal ma'nisleri menen «aqqışlıq tisi», aqqışlıq uchastkası, yag'nıy u'lgini u'ziliwge shekem plastikalıq deformatsiyalaw (σ_e)- bekkemlik kernewdin' maksimal shaması sıpatında, σ_p -buzılıw kernewi [1].

2. Teorikalıq bekkemlik

Ha'zirgi waqıtta bekkemlik problemenasına eki tu'rli jantasıw bar. Biri defekti joq material ushın. Ol teorikalıq bekkemlik, yag'nıy bekkemliktin' joqarg'ı shegerası dep atalatug'ın ma'nisti beredi. Uzaq jıllar dawamında a'dettegi denelerge bunday jaqınlasıw bekkemlik ushın ju'da' ideallasqan shamanı berdi, ol tek tariyxıy h'a'm gnoseologichlıq ma'niske iye boldı, al basqa jantasıwda real denelerde barlıq waqıtta jetkilikli mug'darda h'a'rqıylı defektler bar bolıwın esapqa aldı. Biraq nanomateriallarg'a qarata eki jaqınlasıwda tolıq real, o'ytkeni nanomateriallar defektlide defektsizde bolıwı mu'mkin.

Real materiallardın' bekkemligi.

XX a'sirdin' birinshi yarımında materialdın' bekkemligi mikroskopik masshtabtag'ı mikrosan'laq, sıızıq, qattı denenin' betindegi kernew kontsentratorı sıyaqlı iri defektlerge g'a'rezli bolatug'ınlıg'ı ko'rsetildi. 2-su'wrette sabaq ta'rizli metall talshıqtın' onın' diametrine g'a'rezliligi ko'rsetilgen. To'mendegiler anıqlandı, obekttin' diametri qansha kishi bolsa onın' bekkemligi sonsha joqarı. Bekkemliktin' artıw sebebi diametrdin' kishireyiwi menen u'lginin' ulıwma betlik energiyası kishireyedi, demek defektler mug'darıda azayg'anlıqtan dep tu'sindiriledi. Bul grafik A.F.İoffenin' as duzının' bekkemligin anıqlaw boyınsha izertlewleri menen tastıyıqlanadı, ol u'lginin' bekkemligin betti qayta islew izleri menen baylanıstırdı, duz suwg'a batırılıp bettegi sıızıqtan payda bolg'an defektlerden tazalang'annan keyin onın' bekkemligi joqarı boldı, bekkemlik bul jag'dayda ju'z ese arttı. Mine solay etip bettegi defektlerdin' tutqan ornı anıq ko'rgizbeli ko'rsetilgen edi.



2–su’wret. Temirdin’ sabaq ta’rizli talshıg’ının’ (us) bekkemliginin’ onın’ diametrine g’a’rezliligi [2].

Sızıq ta’rizli defektleri bar deneler ushın buzılıw teoriyası Griffiths ta’repinen du’zildi. Ol qa’legen treshina kernew kontsentratorı boladı dep esapladı. Eger treshinanı eni b h’a’m uzınlıg’ı c bolg’an yarım ellips dep qarasaq, onda iymeklik radiusı ten’lemesi $r_c = \frac{b^2}{c}$ menen anıqlanadı. Onda treshinanın’ ushındag’ı mexanikalıq kernewdin’ maksimal ma’nisi

$$\sigma_{max} \approx 2\sigma \sqrt{\frac{c}{r_c}}, \quad (3)$$

bul jerde σ —sırttan tu’sirilgen kernew. Formuladan ko’rinip turg’anınday, treshina qansha uzın h’a’m su’yir bolsa kontsentratsiya koeffitsienti sonsha joqarı h’a’m kernewde u’lken boladı. Materiallarda bar treshinalar qandayda kritikalıq ju’kleme ta’siri menen qattı denenin’ katastrofalıq buzılıwına alıp keledi. Griffiths berilgen uzınlıqtag’ı treshinanın’ qadag’alanbaytug’ın o’siwin payda etetug’ın sırtqı kernewdin’ shamasın anıqlaw kriteriyasın taptı.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi c}}, \quad (4)$$

bul jerde γ_s -treshina diywallarının' salıstırmalı betlik energiyası, yag'nıy usınday ju'k tu'sirilgende berilgen s uzınlıqtag'ı treshina mort treshina sıyaqlı bolıp taraladı.

Real jag'dayda treshinanın' o'siwi mort buzılıw dada h'a'm kritikalıqtan to'men ju'k tu'siriliw waqtındada katastrofalıq emeste bolıwı mu'mkin, treshina jetkilikli a'ste o'siwi mu'mkin, kritikalıqqa shekemgi stadiya dep atalatug'ın jag'day. Onda (2.4) ten'lemenı treshina o'siw waqtında bo'linip shıqqan energiyanın' U treshina uzınlıg'ı s tin' o'simine qatnası tu'rinde ko'rsetiwge boladı. To'mendegidey belgilew kiriteyik

$$G_l = \frac{\partial U}{\partial c}, \quad (5)$$

G_l parametri buzılıw jabısqaqlıg'ı dep ataladı. O'ytkeni real deneler plastiklik qa'siyetke iye h'a'm ideal mort deneler bolmaydı, onda (2.4) formuladag'ı γ_s eksperimenttin' real sharayatlarında betlik energiya γ_s penen treshinanın' o'siwine jumsalatug'ın plastik deformatsiya jumısının' $\gamma_{n.l}$ summası menen almastırıladı. Onda G_l ushın sa'ykes formula to'mendegidey tu'rge iye boladı

$$G_l = 2(\gamma_s + \gamma_{n.l}) \quad (6)$$

Onda (2.4) formula to'mendegi tu'ge keledi

$$\sigma = \sqrt{\frac{EG_l}{\pi c}}, \quad (7)$$

A'dette materialdın' treshinag'a shıdamlılıg'ın xarakterlew ushın ja'ne bir shamanı – kernew intensivliligi koeffitsientin K paydalanadı:

$$K = \sigma \sqrt{\pi c}, \quad (8)$$

Kernew intensivliligi koeffitsienti treshina ushına jaqın jerde sozıwshı kernewdin' artqanlıg'ın xarakterleydi.

Bekkemlik ma'selesine joqarıda qaralg'an jaqınlasıwlarda waqıt faktorı esapqa alınbadı yamasa formulalarg'a anıq emes tu'rinde kirdi. Degen menen, katostrafalıq buzılıwg'a alıp kelmeytug'ın deneg'e tu'sirilgen kernewdin' o'zi bar defektlerdin' a'ste o'siwine h'a'm jan'aların'ın' payda bolıwına alıp keledi, ol waqıt o'tiwi menen buzılıwg'a alıp keliwi mu'mkin. Bekkemliktin' kinetikalıq yamasa

tempekratura–waqıtlıq teoriyası buzılıwdın’ waqıt aspektin tolıq esapqa alıwg’a mu’mkınshilik beredi. Bul buzılıwlar defektlerdin’ izbe iz ko’beyiwi bolg’an termikalıq aktiv protsess ekenligin tastıyıqlaytug’ın birqatar eksperimental faktlerge tiykarlanadı.

Kinetikalıq teoriyanın’ tiykarg’ı ten’lemesi (Jurkov ten’lemesi) a’dette to’mendegishe jazıladı

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right). \quad (9)$$

bul jerde τ – buzılıwg’a shekemgi waqıt, yag’nıy ju’klme astında turg’an u’lginin’ waqıt boyınsha shıdamlılıg’ı, τ_0 – turaqlı (atomlıq terbelisler da’wiri $10^{-13 \pm 2} \text{ c}$), U – buzılıw protsessinin’ aktivatsiya energiyası, k - Boltsman turaqlısı, T – temperatura $^{\circ}\text{K}$. U’lgige tu’sirilgen kernew σ to’mendegi ten’leme arqalı kiritiledi

$$U = U_0 - \gamma\sigma, \quad (10)$$

bul jerde U_0 – atomlar arasındag’ı baylanıs energiyası, ol sublimatsiya energiyasına jaqın, al γ – o’z ishine barlıq strukturalıq xarakteritikalardı alatug’ın struktura–sezgir parametr, ma’nisi boyınsha kernew kontsentratsiyası koeffitsienti. Solay etip, $\gamma\sigma$ shaması qansha ko’p bolsa buzılıwdın’ aktivatsiya energiyası sonsha kishi boladı h’a’m dene sonsha tez buzıladı.

Bul teoriyanın’ en’ a’h’miyetli fizikalıq rejesi sonda, qattı dene mexanikalıq kernew esabınan buzılmaydı, ol tek g’ana energetikalıq barerdi kishireytedi, al atomlar arasındag’ı h’a’lsiregen baylanıstı buzatug’ın jıllılıq fluktuatsiyası esabınan buzıladı. Solay etip, ju’k astında turg’an u’lginin’ uzaq waqıtqa shıdawı – bul atomlar arasındag’ı energetikalıq barerden o’tiwge mu’mkın bolg’an jıllılıq fluktuatsiyasın ku’tiw waqtı eken. Bunday jaqınlasıwda bekkemliktin’ kinetikalıq teoriyası qa’legen materialdın’ buzılıwın u’yreniw ushın universal usıl boladı.

Praktikada, degen menen, konstruktsion materiallardın’ qa’siyetlerin salıstırmalı h’a’m ekspress bah’alaw ushın bekkemlikti da’stu’riy anıqlag’anda sozılıw diagrammasında (1-su’wret) (σ_{p}) -nin’ maksimal ma’nisine sa’ykes keletug’ın kernew (waqıtsha bekkemlik) yamasa u’lginin’ buzılıw waqtına sa’ykes keletug’ın ma’nisi σ_{p} alınadı (u’ziliw bekkemligi).

3. Kristall materiallarning plastiklik deformatsiyasi

Kristall reshetkasining defektlari h'a'm deformatsiyalanuv mexanizmleri.

Kristall denelerding qasiyetlari a'dewir da'rejede kristall du'zilisining jetiskenligi menen aniq lanadi.

Qattı denelerding deformatsiyasi tu'sirilip atırg'an ku'sh penen atomlardın ten'salmaqlıq h'alınan awısıwınan boladı. Salıstırmalı deformatsiya

$$\varepsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0}, \quad (11)$$

bul jerde l_k – denenin aqırg'ı razmeri, l_0 – denenin baslapqı razmeri.

Ja'ne bir a'h'miyetli shama – ν Puasson koeffitsienti dep ataladı h'a'm salıstırmalı ko'ldenening jin'ishkeriwding (ken'eyiwding) $\frac{\Delta d}{d}$ salıstırmalı sozılıwg'a (qısılıwg'a) $\frac{\Delta l}{l}$ qatnası tu'rinde anıqlanadı

$$\nu = -\frac{\Delta d}{d} : \frac{\Delta l}{l}. \quad (12)$$

Deformatsiya serpimli h'a'm plastiklik bolıp bo'linedi, serpimli deformatsiya Guk nızamına bag'ınadı, ju'k alıp taslang'annan keyin dene o'zining baslapqı formasın h'a'm razmerin qayta iyeleydi, al plastiklik deformatsiyada ta'sir alıp taslang'annan keyin deformatsiya qalıp qoyadı. 1-cu'wrettegi deformatsiyalanuv iymekliginde qattı denenin deformatsiyalanıwının h'a'rqıylı etaplarına sa'ykes keletug'ın kernewding barlıq tiykarg'ı tochkaları h'a'm qa'ddileri ko'rsetilgen.

Serpimli deformatsiyalang'an deneler ushın Puasson koeffitsientinin joqarı ma'nisleri xarakterli. Elastik materiallar ushın onın maksimal ma'nisi 0,5 bolıwı mu'mkin (mısalı, rezina). Eger dene mort bolsa onda Puasson koeffitsienti nolge umtıladı (mısalı, shiyshe).

Plastiklik deformatsiya atomnıń ten'salmaqlıq h'alınan qaytımsız awısıwı menen baylanıslı. Basqa serpimli awısıwılardan o'zgesheligi qaytımsızlıqtın sebebi atomlardın h'a'rqıylı struktura defektleri menen o'z-ara ta'sirlesiwinen boladı, al struktura defektleri qattı denelerde ko'p mug'darda bar boladı.

Atomlıq masshabtag'ı defektler h'a'zirgi waqıtta tolıq izretlengen h'a'm olarg'a klassifikatsiya islengen. A'dette bul defektler u'sh tipke bo'linedi –

tochkalıq, sıızılı h'a'm ko'lemlik. Tochkalıq yamasa nol o'lsheмли defektler bular vakansiyalar h'a'm endirilgen atomlar. Sıızılı defektler – dislokatsiyalar. A'dette metallda kristalldın' 1 sm^2 maydanında 10^8 - 10^{11} dislokatsiya bar boladı. Plastikalıq deformatsiya dislokatsiyalar sanın arttıradı, metalldı otjig isleseک olardıń saknı azayadı. Dislokatsiya sıızıg'ı do'gereginde kristall reshetkası ku'shli burmalanadı.

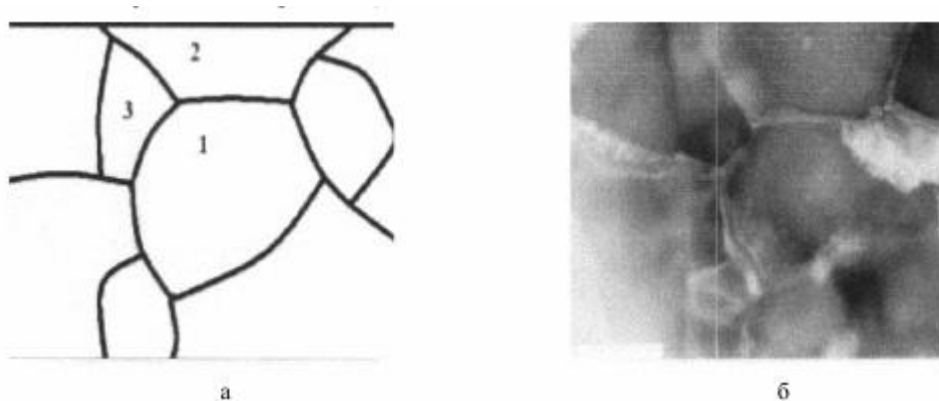
Dislokatsiyalar ko'p bolmag'an kernew ta'siri menen kristallda jıljıw tegisligi boylap orın awısadı. Jıljıw tegisligi barlıq waqıtta ekstrategislikke perpendikulyar boladı. Bul protsess energetikalıq jaqtan maql boladı, o'ytkeni, mısalı, shetki dislokatsiyada atomlar arasındag'ı baylanıs u'lginin' barlıq kesimi boyınsha birden u'zilmeydi, al ekstrategislik qaptalı oblastında g'ana o'tedi, yag'nıy usı jerdegi atomlar arasındag'ı baylanıs g'ana u'ziledi. Ne ushın teoriyalıq bekkemlikke erisip bolmaytug'ının h'a'm ne ushın ayırım materiallarda joqarı plastiklik bar ekenligin mine usı menen tu'sindiriwge boladı. Aqırında dislokatsiya kristalldın' betine shıg'ıp ol jerde tekshe payda etedi.

Dislokatsiya qozg'alıwının' basqa mexanizmi bul ekileniw (dvoynikovanie). Onın' mag'anası – awısıw h'a'm burılıw.

Keyingi topar defektler eki o'lsheмли dep ataladı. Bul toparg'a da'neshelerdin' shegerası, bloklardın' shegerası h'a'm basqa defektler kiredi. A'dette metall h'a'm keramika bir birine salıstırg'anda qa'legeninshe bag'darldanıp jaylasqan ko'plegen kristallshalardan turadı. Bul kristallshalar a'dette da'nesheler dep atalınadı, al da'neshelerden turatug'ın strukturalar polikristall dep ataladı. Biri birine tiyisip turg'an da'neshelerdin' shegerag'a jaqın oblastları ku'shli burmalang'an boladı – bul ayrıqsha eki o'lsheмли defektler – da'nesheler shegeraları dep ataladı. Da'nesheler shegerası oblastının' razmeri 2-3 atomaralıq qashıqlıqqa ten' ekenligi burınag ko'rsetilgen edi. Eger eki da'neshenin' shegerası tegis bolsa onda ol 5 ten kem bolmag'an erkinlik da'rejesine iye boladı, sonnan 3 da'rejesi bir reshetkanın' basqasına salıstırg'anda burılıwı esabınan h'a'm 2 da'rejesi bir tegislik normalının' basqasına salıstırg'an bag'darlanıwı esabınan. Shegeranın' bunday quramalı geometriyasın endi tek g'ana vintlik yamasa shetki dislokatsiyalar menen ta'riplew mu'mkin emes.

Shegeralardı ta'riplew ushın defektlerdin' a'dewir quramalı tu'ri engiziledi, mısalı, da'nesheler shegeralıq dislokatsiyalar.

Nanokristall materiallarda da'nesheler shekli kishi razmerge iye boladı. Olar ushın material ko'leminde shegeralardın' u'lken salıstırmalı u'lesi (50% ke shekem) h'a'm da'neshelerdin' u'shlik stıklarının' birlik ko'lemdegi ko'p mug'darı xarakterli boladı. U'shlik stıklardın' joqarı kontsentratsiyası – nanokristallitlerdin' en' xarakterli belgisi (3-su'wret). Plastikalıq deformatsiyalardın' ko'pshilik o'zgeshelikleri u'shlik stıqlardın' bar bolıwı menen baylanıstırıladı.



3-su'wret. Submikrokristall materialdag'ı mıs u'shlik stık. a) – stık sxeması, b) – material betindegi stık oblastının' mikrofotografiyası.

Nanomateriallarda da'nesheler shegerasının' ta'siri mikrostrukturalı materialarg'a qarag'anda a'dewir ku'shlirek boladı. Nanokristallar ten'salmaqlı emes materialarg'a kiredi. Rekristallizatsiya, yag'nıy o'z ara jutıw jolı menen da'neshelerdin' o'zliginen o'siwi sıyaqlı protsessler h'a'tte o'jire temperaturasındada o'tedi. U'shlik stıqlardın' bar bolıwı da'neshelerdin' o'siwin a'stelestiredi h'a'm da'neshelerdin' ayırım razmerlerinde plastikalıq deformatsiyanı qıyınlastırıwı mu'mkin.

A'sirese da'nesheler shegerası kristallitlerinin' xarakterli razmerleri 1 den 10 nm ge shekem bolg'an nanomateriallarda u'lken rol tutadı, bul materiallarda olardın' u'lesi 50% ke shekem baradı.

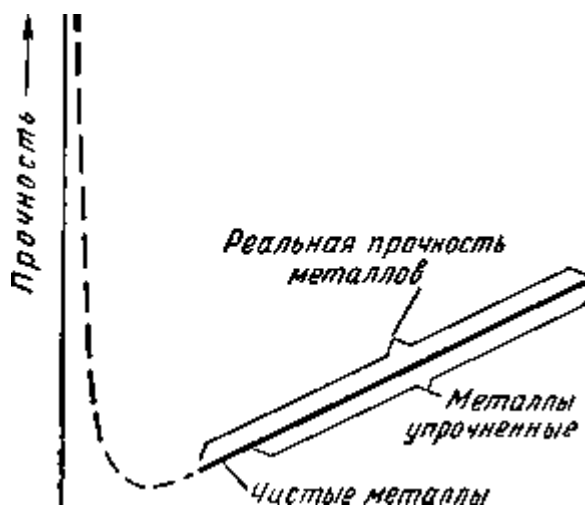
Plastikalıq deformatsiya ja'rdeminde metallardı bekkemlewge bolatug'ınlıg'ı burınnan belgili. 4-su'wrette bekkemliktin' dislokatsiya sanına

g'a'ezliligi ko'rsetilgen. Dislokatsiya tıg'ızlıg'ının' artıwı menen real bekkemliktin' artıwı h'a'rquylı tegisliklerde h'a'm bag'ıtlarda dislokatsiyalar payda bolıwı menen tu'sindiriledi. Bir jıljıw tegisliginde payda bolg'an dislokatsiyalar basqa jıljıw tegisliklerinde defektlerdin' orın awısıwna tosqınlıq jasaydı. Sonlıqtan tosqınlıqtı atlap o'tiwge talap etiletug'ın ku'sh artadı h'a'm materialdın' real bekkemligi artadı.

Dislokatsiyalar reshetkada mexanikalıq kernew ta'siri menen qozg'alıwı mu'mkin. Bir biri menen h'a'm basqa defektler menen o'z ara ta'sirlesiwı mu'mkin. Mexanikalıq kernew jan'a dislokatsiyalardın' payda bolıwın (generatsiyalaw) yamasa olardın' joq bolıwın (annigilyatsiya) payda etiwı mu'mkin.

Teoriyalık bekkemlik

Ustın' bekkemligi



Dislokatsiya h'a'm basqa defektlerdin' tıg'ızlıg'ı

4-su'wret. Bekkemliktin' kristall defektlerinin' tıg'ızlıg'ına g'a'ezliligi.

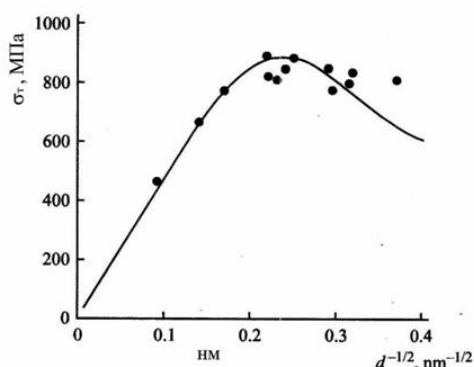
Xoll-Petch nızamının' orınlanbawı – nanomateriallardın' o'zgesheligi sıpatında.

Bo'lek da'neshe qansha kishi bolsa, yag'ni materialdag'ı da'nesheler arasındag'ı shegeralar tu'rindagi defektler qansha ko'p bolsa bekkemlik sonsha ko'p bolatug'ınlıg'ı eksperimentlerde burınnan tastıyıqlang'an. Alıng'an na'tiyjelerdin' ko'rsetiwinshe a'dettegi metall polikristalldın' aqqıshlıq shegerası h'a'm qattılıg'ı to'men h'a'm orta temperaturalarda da'neshe razmerinin' d_g kemeyiwi menen Xoll–Petch nızamı boyınsha artatug'ınlıg'ın ko'rsetedi:

$$\sigma = \sigma_T + K_\sigma d^{-1/2}, \quad (13)$$

$$H = H_0 + K_H d^{-1/2}, \quad (14)$$

bul jerde σ_T h'a'm N_0 – monokristalldın' aqqıshlıq kernewi h'a'm qattılıg'ı, al K_σ h'a'm K_N – Xoll–Petch koefitsientleri. OTsK metall h'a'mmm olardın' quymalarındada aqqıshlıq sheginin' dislokatsiyalıq struktura yacheykalarının' xarakterli razmerine g'a'rezliligide usınday nızamg'a boysınadı. Da'neshelerinin' razmerleri 1 mm den 1 mkm ge shekem bolg'an polikristallar ushın alıng'an eksperimentlik mag'lıwmatlar Xoll–petch (3.3 h'a'm 3.4) g'a'rezliligi menen jaqsı ta'riplenedi. Struktranı nanorazmerge shekem maydalaw texnologiyasının' rawajlanıwı menen da'neshe razmeri kemeyiwi menen Xoll–Petch nızamınan awıtqıw bayqalatug'ınlıg'ı anıqlandı. Nanomateriallar ushın bunday o'zgeris da'neshelerdin' razmerleri 10-15 nm bolg'anda payda boladı (5–su'wret). Elede may-



5-su'wret. Nanokristall mıstın' aqqıshlıq shegi ushın Xoll–Petch qatnası. 1– Xoll–Petchtin' tu'wrı qatnası, 2– Xoll–Petchtin' keri qatnası.

dalasaq ayırım jag'daylarda «Xoll-Petchtin' keri g'a'rezliligi depp atalatug'ın qubılıs payda boladı, bunda da'reje ko'rsitkish da'neshenin' qandayda bir

razmerinde on' shamag'a aylanadı. Tek g'ana da'reje ko'rsetkish emes, al Xoll-Petch koeffitsientinin' belgiside o'zgeriwi mu'mkin.

Uliwma alg'anda Xoll-Petch g'a'rezliligi materialdın' da'neshelerinin' razmerine g'a'rezli onın' bekkemleniwi qalay bolıp atırg'anlıg'ın ko'rsetedi.

Qattı denedegi da'neshe lerdin' shegeralarının' o'zide quramalı defekt h'a'm o'zinin' spetsifikalıq qa'siyetlerine iye. Nanomateriallar jag'dayında shegera nanobo'lekshenin' ko'leminin' a'dewir bo'legin quraydı (da'neshenin' razmeri birneshe nm bolg'anda shegeranın' qalın'lıg'ı 1-2 nm boladı). Nanobo'lekshenin' beti h'a'm ishi birdey atomlardan bolıwına qaramastan olardın' kristallografiyası, simmetriyası h'a'm fizikalıq qa'siyetleri a'dewir o'zgeshe bolatug'ınılıg'ı h'aqqında ko'plegen mag'lıwmatlar bar. Demek nanomaterialda u'lesleri derlik birdey bolg'an eki faza bar dep aytıwg'a tolıq tiykar bar, onda nanomaterialdın' o'zin kompozitsiyalıq material dep qarawg'a boladı.

4. Kompozitlerdi alıw printsipi. Nanorazmerli toltırg'ıshlar

A'dettegi gomogen materiallar endi texnikanın' o'sip baratırg'an talaplarına juwap bere almay atır. Ku'sh h'a'm termikalıq nagruzkalardın' o'siwi, ekspluatatsiya ortalıg'ının' h'a'rqıylı h'a'm agressivligi, bah'asının' joqarılıg'ı h'a'm t.b. o'siwi, sonın' menen birge mashina h'a'm mexanizmlerdin' xızmet etiw waqtın arttırıw mu'tajlıg'ı XX a'sirdin' aqırında jan'a geterogen materiallardı intensiv islep shıg'ıwg'a alıp keldi. Bul materiallar kompozitsiyalıq printsip boyınsha islengen, yag'nıy qa'siyetleri h'a'rqıylı bolg'an materiallardan quraladı, olardın' barlıg'ı ku'tilip atırg'an effektlerdi beredi. Bunday materiallar kompozitsiyalıq materiallar dep ataldı, qısqa tu'rde kompozitler.

Kompozitsiyalıq materiallardı du'ziwge da'slepki tu'rтки texnikanın' joqarı bekkemlikke iye bolg'an talabı boldı.

Ko'pshilik jag'dayda nanokompozitler mikrorazmerdegi (mikronnın' kishi u'leslerinen birneshe onlag'an mikrometrlerge shekem) da'neshelerden turatug'ın matritsadan h'a'm nanorazmerdegi bekkemlegishten turadı. Barlıq qurawshıları

nanorazmerde bolg'an nanokompozitler siyrek ushirasadi. Bular nanoda'neshelerden turatug'in taza metallar, matenrialdin' barliq ko'lemi da'neshe materialı h'a'm da'neshelerdi ayırıp turg'an ten'salmaqlı emes, defektli, amorflı shegeradan turadı, yamasa bular arnawlı tu'rde h'a'rqıylı materiallardan h'a'rqıylı metodlar menen kompaktlengen materiallar. Ulıwma alg'anda kompozitler adam qolı menen jaratılğ'an jasalma obektler.

Kompozitlerdin' du'zilisi

Kompozitsiyalıq material a'dette birneshe ximiyalıq h'a'rtu'rli materiallardan (kem degende eki material) du'ziledi h'a'm olar arasında a'lbette fazalar aralıq shegera bar boladı. Na'tiyjede kompozittin' qa'siyeti onı quraytug'in komponentalardin' birde birewi ayırım alıng'anda iye bolmag'an qa'siyetlerge iye bolıwı kerek.

Kompozitlerdin' ko'pshilik qa'siyetleri matritsa h'a'm bekkemlewshi elementten turatug'in eki fazalı sistemalarda u'yrenilgen.

Matritsa degenimiz bekkemlegish qandayda bir qa'de boyınsha bo'listirilgen ortalıq. A'dette matritsa serpimli, al bekkemlegish a'dewir qattı h'a'm bekkem. Matritsa sıpatında qa'legen material alınıwı mu'mkin: polimer, metall, keramika h'a'm h'a'tte monokristall. Bekkemlegish sıpatında a'dette uzın yamasa qısqa joqarı bekkemlikke iye kelip shıg'ıwı h'a'rqıylı bolg'an talshıqlar, olar tiykarındag'ı tkanlar yamasa untaq h'a'm bo'leksheler alınıwı mu'mkin.

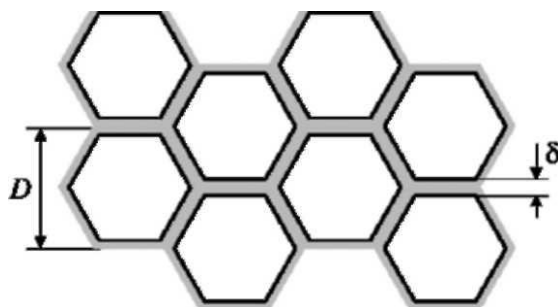
Nanokompozitlerdin' bekkemlik h'a'm buzılıw problemaları

Nanomateriallardın' basqa materiallardan en' baslı o'zgesheligi – bul betlik h'a'm ko'lemlik atomlar mug'darlarının' qatnası. Bettegi h'a'm ko'lemdegi atomlardın' jaylasıwıda h'a'rqıylı ekenligi tu'sinikli, demek zattın' bul elementelerinin' qa'siyetleri olar birdey atomlardan turatug'in bolsada h'a'rqıylı bolatug'inlig'ı tu'sinikli.

Ha'zirgi waqıtta mexanikalıq qa'siyetlerdi u'yreniw problemasının' ulıwma qoyılıwı ele juwmaqlawdan alısta. Ko'pshiligi tu'siniksiz, sonlıqtan usı waqıtqa shekem alıng'an mag'lıwmatlar qarama qarsılıqlarg'a iye. Ha'zirshe biz u'yreniwdin' baslapqı etapındamız, sonlıqtan klassikalıq materialtanıwdın'

na'tiyjeleri h'a'm jetiskenliklerinen paydalana beriwden basqa h'esh na'rse qalmaydı. Eksperimentlik mag'lıwmatlardın' toplanıwı menen jan'a sapalıq qa'ddidegi basqa juwmaqlarg'a o'tiwge boladı.

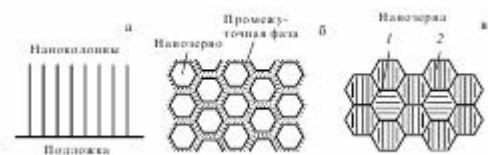
Problemag'a o'teyik. Bir da'neshe shen'berindegi nanomaterial bul kompozit dep esaplanadı. Onın' eki komponentası – da'neshenin' o'zi h'a'm da'nesheler arasındag'ı shegera o'zinin' fizikalıq qa'siyetleri boyınsha o'zgeshelenip turadı. A'dette a'debiyatlarda jiwi jag'dayda bul komponentalar kompozittin' fazaları dep ju'ritiledi. Este saqlaw kerek, bunday etip jaqınlasıw og'ada qopal baslapqı juwıqlasıw. Kompozittin' tiykarg'ı belgilerinin' biri tap sonda, olda bolsa h'a'rqıylı zatlar arasında fazalar aralıq shegera bolıwı sha'rt. 6–su'wrette nanomaterialdın' jiwi qollanılatus'ın modeli ko'rsetilgen.



6–su'wret. Nanomaterialdın' da'neshelik strukturasınıń modeli.

Joqarı qattılıqqa iye nanokompozitlerdi to'mendegidey u'sh toparg'a bo'liwge boladı:

1. Kollumar strukturag'a birikken da'neshelerden turatus'ın nanokompozitler, tiykarg'ı materialdın' ekinshi fazasınıń mug'darı barlıq nanoda'neshelerdi tolıq qaplawı ushın jetkiliksiz (7a-su'wret).
2. Tiykarg'ı materialdın' fazası menen tolıq qorshalg'an tıg'ız globulyar strukturag'a iye nanoda'neshelerden turatus'ın nanokompozitler (7b-su'wret).
3. Ha'rqıylı materiallardan yamasa bir materialdın' h'a'rqıylı bag'ıtlang'an nanoda'neshelerinen turatus'ın tıg'ız globulyar strukturag'a iye nanokompozitler (7v-su'wret).



7-su'wret. Joqarı qattılıqqa iye nanokompozitlerdin' strukturası. a – kolummar kompozit, b – tiykarg'ı materialg'a ekvivalent faza menen qorshalg'an nanoda'nesheler, v – nanoda'nesheler aralaspası. faza menen qorshalg'an nanoda'nesheler, v – nanoda'nesheler aralaspası [7].

Ha'rbir fazanın' u'lesin bah'alaw to'mendegi ten'lemeler menen beriledi: «betlik faza» - da'nesheler shegerası $V_{gb} = \frac{\delta}{D}$, «ko'lemlik faza» - $V_v = 1 - V_{gb}$. Belgilewler –su'wrette ko'rsetilgen.

Bekkemlikti izertlewde oraylıq orındı materialdın' buzılıwın u'yreniw iyeleydi. Nanomaterialdın' buzılıwın analizlewın ko'rsetiwinshe buzılıw tiykarınan da'nesheler shegerası boyınsha boladı. Kristallitler aralıq buzılıwda buzılıw energiyası treshinanın' da'wirli funktsiyası boladı. Bul jag'dayda barlıg'ı treshina qalay taralıwına g'a'rezli boladı. Onın' jolı iri kristall materialg'a qarag'anda a'dewir to'men birtekli boladı.

Ulıwma alg'anda treshinalar Griffiths boyınsha rawajlanadı, biraq, bul belgili formulalarg'a qoyılıwı kerek bolg'an parmetrlerdi alıw an'sat emes.

II BAP. EKSPERİMENTLER METODİKASI

1. Vakuum-dugalı qaplama alıw texnologiyası

Material Vikipediya —erkin entsiklopediyadan alındı

Tariyx

Ha'zirgi zaman vakuum–dugalı texnologiyası o'zinin' baslamasın SSSRdan aladı. Birinshi ma'rte industrial o'ndiris sharayatlarına adaptatsiyalaw maqsetinde vakuum–dugalı metodtı sistemalı izertlew h'a'm islep shıg'ıw Xarkov fizika–texnika institutının' kollektivlerinin' biri ta'repinen XX a'sirdin' 60-shı jılları baslanadı (h'a'zirge shekem dawam etpekte).

1976-1980 jılları h'a'rqıylı bekkemlewshi h'a'm qorg'awshı qaplamalardı vakuum-dugalı metod penen alıw texnikası h'a'm texnologiyası islep shıg'ıw baslandı. Bunday qaplamalardı alıw ushın XFTİ de islep shıg'ılǵ'an h'a'm sanaatta ken' qollanıwına baslama bergen ustanovka «Bulat» dep ataldı. Ustanovka bes shet el AQSh, Ullı Britaniya, Frantsiya, FRG, Yaponiya, İtaliyada patentleri menen qorg'aladı, bul sol da'wirdegi litsenziyanı satıw maqsetinde ju'rgizilip atırǵ'an so'ylesiwler menen baylanıslı edi.

XX a'sirdin' 70-shı jılları Sovet h'u'kimeti bul texnologiyanı Batıs ushın ashıwdı maqul ko'redi. 1979 jılı «*Noblemet International*» Amerika firmasının' baslıǵ'ı Djozef Filner (*H. Joseph Filner*) SSSR da xızmet saparında bolǵ'an da'wirinde bul texnologiya h'aqqında tosınnan bilip qaladı, metall kesiwshi instrumentlerdi bekkemlew ushın onın' sanaatta effektiv h'a'm tabıslı qollanılp atırǵ'anlıǵ'ın ko'redi. Na'tiyjede bul firma menen SSSR h'u'kimeti arasında litsenziyalıq sha'rtnamag'a qol qoyıladı, h'a'm basqa investorları menen birlikte onı Batista sannatqa endiriw ushın arnawlı tu'rde «*Multi-Arc Vacuum Systems*» (ili «*MAVS*») firması sho'lkemlestiriledi, onın' jıllıq da'ramatı eki jılda nolden 5 million AQSh dollarına shekem o'sedi. Tez kesiwshi polattan islengen instrumentlerge *TiN* qaplamasın sho'ktiriw texnologiyası h'a'm u'skeneni tarqatıw h'uqıqı «*Multi-Arc*» firmasına tolıǵ'ı menen satıladı. Kelisimnin' ta'sir etiw titoriyası Arqa Amerika, Evropa h'a'm Aziyanın' 40 tan aslam ellerin o'z ishine aladı.

1981 jılı kesiwshi instrumentti KIB metodı menen bekkemlew texnologiyasın satıw boyınsha VTP «Politexna» ([ChSSR](#)) menen litsenziyalıq kelisimge qol qoyıladı.

1980-1985 jılları litsenziya boyınsha berilgen «Bulat» ustanovkasın jetilistiriw boyınsha patentlew isleri a'melge asırıldı. 36 patentke 15 ma'mleketten oxrannaya gramota alındı.

Katod–dugalı plazma dereklerinin' birneshe konstruktsiyaları ishinen – SSSRda sol waqıtları bar bolg'an vakuum dugada katod matnerialının' puwlanıwı h'a'm ionlanıwın a'melge asıratug'ın tiykarg'ı du'zilisleri ishinen SSSR tısqarısında paydalanıw ushın L.P.Sablevtın' (soavtorları menen birlikte) konstruktsiyasına ruxsat berildi.

1979 jılı Ukraina İlimler akademiyasının' Xarkov fiziko–texnikalıq institutı ju'da' jan'a joqarıtexnologiyalıq islenbeni jarattı. Situatsiyanın' paradokslıg'ı o'mir boyı prozanı aytıp kiyatırg'anlıg'ın bilmegen molderdin' qah'armanının' jag'dayına uqsas boldı. Ma'sele sonda, islep shıg'ıwshılar h'a'm buyırtpashılar titan mononitridinin' vakuum–dugalı qaplaması du'nyada birinshi joqarı qattı nanomaterial ekenligin, al onı sintezlew texnologiyası – du'nyada birinshi nanotexnologiya ekenligin uzaq waqıt dawamında bilmedi. Bul jaqında anıqlandı.

İlim h'a'm texnikanın' tariyxında derlik detektiv syujetler az emes, kimdur qay waqıtları bunnan 100 yamasa 150 jıl burın waqtınan burın jan'alıq tabadı yamasa bir na'rseni oylap tabadı, keyin ol adam o'zinin' tapqanı menen birlikte ko'p jıllarg'a umıtıladı.

Sınap nasosı menen alınatug'ın vakuumdı jaqsılaw ushın umtılıwlar menen baylanıslı Yell universitetinin' professorı Artur Rayt birinshi ma'rte suwıq katodlı vakuumlı dugalı razryadtı 1876 jılı izertleydi. Aradan 10 jıl o'tkennen keyin bul razryad penen Edison qızıg'adı. Ol on jıl dawamında razryadtı birinshi tapqan adam retinde o'zinin' h'uqıqın talap etedi, og'an patentte aladı, biraq qısqartılğ'an tu'rinde. Sonın' menen Rayt h'a'm Edisonnnın' oylap tapqanı waqtınan burın payda bolg'an bolıp uzaq jıllarg'a umıtıladı.

O'tken a'sirdin' 60-shi jillari Xarkov fizika-texnika institutinin' plazma fizikasi bo'liminde bul qubilistin' bir qatar qollanilwlarin tabadi. Bul jerde elektr dugali razryadti joqari vakuum aliw qurali sipatinda izertley baslaydi. 1964 jili L.P.Sablev xizmetkerleri menen birge vakuumda turaqli dugali razryadti aladi. 1966 jili olar turaqli toqtin' statsionar rejiminde islewshi titandi vakuum–dugali puwlandirg'ishti aladi.

1967 jili A.A.Romanov h'a'm A.A.Andreevler qiyn eriytug'in metallar h'a'm olardin' birikpelerinen qaplama sho'ktiriw ushin vakuumli–dugani qollanw boyinsha izertlew jumislarin baslaydi. Olar o'tiwshi metallar qaplamasi tu'rinde qiyn eriytug'in birikpelerdi sintezlew vakuum–dugali sho'ktiriw jan'a texnologiya ekenligin ko'rsetedi.

Solay etip 1977 jili «Bulat-3» vakuum–dugali ustanovkası islenip shıg'ıladı h'a'm taraw (Orta mashina qurılısı ministrligi) zavodlarına seriyalıq o'ndiris ushin beriledi. Bul ustanovkanın' rabochiy konstruksiyalıq h'u'jjetleri Elektrotexnikalıq u'skeneler pu'tkil soyuzlıq ilim–izertlew institutına (VNIİETO, Moskva qalası) beriledi h'a'm Elektrotexnika sanaatı ministrligi zavodlarında seriyalıq shıg'arıw ushin İET–8 belgisi menen qayta islenedi. Keyin 1985 jili XFTİ de jan'a «Bulat-6» ustanovkası islenedi, onın' h'u'jjetleri tag'ı VNIİETO g'a beriledi h'a'm onın' bazasında NNV–6.6-İ1 h'a'm NNV–6.5-İ4 ustanovkalari islep shıg'ıladı. Bul ustanovkalar Kiev stanok–avtomatlar zavodında h'a'm «Dvigatel» zavodında (Tallin qalası) («Bulat-3», «Bulat-6»), Saratov Novosibirsktin' elektro–texnikalıq u'skeneler zavodlarında (İET–8, NNV–6.6-İ1, NNV–6.5-İ4) seriya tu'rinde shıg'arıla baslaydi. Olar tiykarinan Mendellev ximiyalıq elementler tablitsasının' IV-VI gruppalarının' qiyn eriwshi metallari tiykarında jeliniwge shıdamli h'a'm dekorativ–qorg'awshi nitrid h'a'm karbid qaplamalardi sho'ktiriw ushin arnaldi. Bul ustanovkalar ko'p seriyada shıg'arıldi h'a'm ko'plegen arnawlı instrumental zavodlarda, mashina qurılısı ka'rxanalarinin' arnawlı uchastkalarıda bul ustanovkalar menen ta'miyinlendi. U'lken tabis instrumengtal sanaat u'lesine tiyisti. Haqıyqatında sanaat sulıw altın ren'li bekkemlewshi nanostruktralı titan nitridi qaplamasına iye boldı, al vakuum–dugalı protsesstin' o'zi du'nyada birinshi

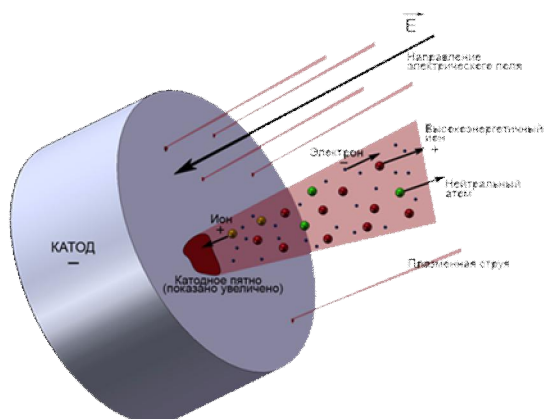
industrial nanotexnologiya boldi. Instrumental sanaatta onı qollanıwdan payda bolg'an ekonomikalıq effekt sol jıllardın' o'zinde og'ada joqarı boldı. Titan nitridi tiykarındag'ı qaplamalar kesiwshi instrumentlerdin' bekkemligin 2 – 5 ese arttırdı. Biraq qaplamanı sintezlew din' salıstırmalı joqarı temperaturasına (shama menen 500 °S) baylanıslı ol tek g'ana qattı quymalarg'a polatlarg'a qaplama sho'ktiriw ushın mu'mkin boldı.

1979 jılı litsenziyanı satıp alg'an Amerika kompaniyası jan'a u'skeneni h'a'm texnologiyanı jer ju'zi boyınsha, SSSR h'a'm sotsialistik lager ma'mleketlerinen basqa, tarqatıwg'a bolg'an barlıq h'uqıqtı o'zine aladı. Jan'a texnologiya menen tanısıp ilimpazlar onın' ilimiy h'a'm texnologiyalıq potentsialı u'lken ekenligin atap ko'rsetedi, sebebi onın' industrializatsiyalanıwı ilimiy izertlewlerdin' da'slepki etaplarınan aq bolg'an edi. Ko'p sandag'ı vakuum–dugalı ustanovkalardı islep shıg'ıw keyingi masshtablı ilimiy –texnologiyalıq izertlewler ushın quwatlı impuls berdi. Ol barlıq jer ju'zinde, sonın' ishinde sovet ma'mleketinde de dawam etti. Sovet eli tarqag'annan keyin vakuum–dugalı sho'ktiriw texnologiyasın rawajlandırıw boyınsha g'a'rezsiz ma'mleketler awqamındag'ı jumıslar stagnatsiyag'a tu'sti, elimizdin' ilimiy basılımlarında shıg'ıp atırg'an izertlew na'tiyjeleri boyınsha maqalalarda bar u'skenelerdi jetilistiriw boyınsha aytarlıqtay printsipial jan'a na'rseler joq edi. Al qalg'an ellerde bunday emes edi, ilimiy jurnallarda h'a'r jılı ju'zlep shıg'ıp atırg'an maqalalardın' sanı waqıt o'tiwi menen elede artıp atır.

Protsess

Puwlanıwdın' vakuum-dugalı protsessi vakuum duganı (ol u'lken tok h'a'm kishi kernew menen xarakterlenedi) jag'ıwdan baslanadı, ol katod (mishen) betinde bir yamasa birneshe tochkalıq (razmeri bir mikronnan onlag'an mikrong'a shekemgi) emissiya zonaların («katodlıq tamg'a» dep atalatug'ın) payda etedi, sol jerde razryadtın' barlıq quwatlıg'ı ja'mlenedi. Katod tamg'anın' lokal temperaturası og'ada joqarı (shama menen 15000 °C), bul katod materialının' intensiv tu'rde pu'wlanıwın h'a'm ionlanıwın payda etedi h'a'm katod tamg'adan

qorshag'an ken'islikke tarqalatug'ın joqarı tezlikli (10 km/s shekem) plazma ag'ımın payda etedi (8-su'wret). Bo'lek katod tamg'a og'ada qısqa waqıt



8-su'wret. Puwlanıwdın' vakuum–dugalı protsessi.

(mikrosekundlar) aralıg'ında g'ana bar boladı, katod betinde xarakterli mikrokrater payda etedi keyin onın' o'zliginen so'niwi h'a'm katod betinin' basqa jerinde, aldın'g'ı kraterge jaqın jerde jan'a katod tamg'asının' o'zliginen payda etiwine alıp keledi. Vizual tu'rde bul duganın' katod betinde orın awısıwı sıyaqlı bolıp ko'rinedi.

Duganın' o'zi toq bar o'tkizgish bolg'anlıqtan og'an elektromagnit maydan arqalı ta'sir jasawg'a boladı, bul praktikada duganın' katod betinde orın awısıwın basqarıw, onın' birtekli eroziyasın ta'miyinlew ushın qollanıladı.

Katod tamg'adag'ı vakuum dugada quwatlıqtın' og'ada joqarı tıg'ızlıg'ı ja'mlenedi, onın' na'tiyjesinde ko'p ma'rte zaryadlang'an ionlardan, neytral bo'lekhelerden, klasterlerden (makrobo'lekheler, tamshılar) turatug'ın payda bolg'an plazma ag'ımının' ionlanıwının' joqarı qa'ddi (30—100%) ta'miyinlenedi. Eger pu'wlanıw protsessinde vakuum kamerag'a ximiyalıq aktiv gaz kiritilse, onın' plazma ag'ımı menen o'z ara ta'sirlesiwı na'tiyjesinde ol dissotsiatsiyalandı, ionlanadı h'a'm qozadı, keyin jan'a ximiyalıq birikpeler payda boladı h'a'm ol (qaplama) plenka tu'rinde sho'gedi.

Vakuum-dugalı protsesste anıq qıyınshılıq sonnan ibarat, eger katod tamg'a pu'wlanıw tochkasında ko'p waqıt turıp qalsa ol ko'p mug'dardag'ı makrobo'lekhelerdi yamasa tamshı fazanı emissiyalaydı. Bul

makrovklyucheniyalar qaplamanın' xarakteristikaların to'menletedi, sebebi olar podlojka menen jaqsı uslaspaydı h'a'm razmeri boyınsha qaplama qalın'lıg'ınan ko'p bolıwı mu'mkin (qaplama ishien o'tip ketiwi mu'mkin). En' jamanı, eger katod–mishen materialı to'men eriw temperaturasına iye bolsa (mısalı, alyuminiy): bul jag'dayda katod tamg'a astındag'ı mishen ol tolıg'ı menen erip ketedi, na'tiyjede katodtı uslap turg'ishta puwlana baslaydı yamasa katodtı suwıtıp atırg'an suw vakuum kamerag'a o'tip ketedi h'a'm avariya situatsiyaı payda etedi.

Bul problemanı sheshiw ushın anaw yaki mınaw usıl menen katod tamg'a u'zliksiz tu'rde jetkilikli u'lken sızıqlı razmerge iye bolg'an u'lken h'a'm massiv katod boyınsha orın awıstırılıp turıladı. Tiykarınan, joqarıda ayılğ'anınday, katod tamg'anı katod betinde orın awıstırıwdı basqarıw ushın magnit maydanı paydalanıladı. Usı maqsette, tsilindr katodlardı qollang'anda, jumıs waqtında (puwlanıw) olardı aylandırıp turıw mu'mkin. Katod tamg'anı bir orında ko'p turıp qalıwına mu'mkinshilik bermeymiz, usı arqalı kerek emes tamshı fazalardın' mug'darın azaytıwg'a boladı.

Ayırım kompaniyalar filtrlengen ([angl. filtered arcs](#)) dep atalatug'ın duganı qollanadı, olarda makrovklyucheniyalar plazma ag'ısınan magnit maydanı ja'rdeminde bo'lip alınadı.

U'skene

Katod tamg'anı basqarıw ushın magniti bar Sablev konstruksiyasındag'ı katod-duga deregi.

Sablev konstruksiyasındag'ı katod-duga deregi (Batista ken' taralg'an) elektr o'tkizgish materialdan tayarlang'an, bir ushı (rabochiy) ashıq tsilindr formadag'ı qısqa massiv katod–mishennnen turadı. Bul katod shen'ber (ekran) menen qorshalg'an, ol rabochiy emes betlerdi duga ta'sirinen qorg'aw ushın arnalg'an. Bunday sistemanın' anodı retinde yamasa vakuum kameranın' diywalı yamasa bo'lek anod xızmet etedi. Katod h'a'm anod arasındag'ı shınjırdı mexanikalıq trigger (jag'ıwshı du'zilis) ja'rdeminde qısqa waqıtlı tuyıqlaw menen katodtın' ashıq ushında katod tamg'ası payda etiledi. Duga jang'annan keyin

katodtın' ashıq ushında katod tamg'alar o'zliginen xaotikalıq tu'rde qozg'aladı yamasa olardı sırtqı magnit maydanı ta'siri menen qozg'aydı.

Katod–duga dereklerinin' ko'p katodlı konstruktsiyalarıda bar, olar bir texnologiyalıq tsiklde kombinatsiyalang'an ko'p qatlamlı qaplamalardı yamasa quramalı sostavtag'ı ximiyalıq birikpelerden qaplamalardı sho'ktiriwge mu'mkinshilik beredi, bul jerde h'a'rbir katod o'zinin' materialın sho'ktiriwge juwap beredi.

Katod–mishen onın' betinen julıp alıng'an ionlar ta'repinen aktiv bombardirvkalawg'a ushırag'anlıqtan ulıwma jag'dayda katod–dugalı derektegi plazma ag'ısı tek g'ana ayırım atomlar yamasa molekulalar emes al olardıń jetkilikli iri klasterlerinen (makrobo'leksheler) turadı, olar qaplamanı effektiv qollanıwg'a kesent beredi. Filtrlerdin' ko'plegen h'a'rtu'rli konstruktsiyaları bar.

2. Eksperimental ustanovkalar h'a'm o'lsheuler metodikası

Diametri 20 mm h'a'm qalın'lıg'ı 3 mm bolg'an polat u'lgige Ti-Hf-Si-N plenkası vakuum kamerada VCh jiyilikli vakuum–dugalı derek ja'rdeminde sho'ktirildi, bul jerde quramı Ti-Hf-Si turatug'ın katod paydalanıldı. Nitrid alıw ushın tezletkish kamerasına atomar azot h'a'rqıylı basımlarda h'a'm podlojkag'a beriletug'ın h'a'rqıylı potentsiallarda jiberildi. Sho'ktiriw parametrleri 1 kestede keltirilgen.

Keste 1

VCh generatorlı vakuum-duga deregi “Bulat – 3T” qollanıldı [5]. Podlojkag'a awısıw potentsialı VCh generatordan berildi, bul generator jiyiligi ≤ 1 MGts bolg'an so'niwshi terbelisler impulsin generatsiyaladı, h'a'rbir impulstin' dawam etiw waqtı 60 mks, ta'kirarlanıw jiyiligi ≈ 10 KGts. Podlojkadag'ı teris awısıw potentsialı VCh diodlıq effekti arqasında $2\div 3$ kV boldı.

Alıng'an (sho'ktirilgen) qaplamalardıń tiykarg'ı o'zgesheligi titan h'a'm gafniy atomlarının' qatnasında Ti/Hf boldı. Birinshi seriya u'lgilerinde bul qatnas $\text{Ti}_{54}\text{Hf}_{46}$, boldı, al ekinshi seriyada – ayırmashılıq u'lken boldı – $\text{Ti}_{64}\text{Hf}_{36}$, biraq bul jag'dayda kontsentratsiyası ko'p o'zgermedi: 7.5 den 9.5 at.% ke shekemgi

intervalda, sonday aq N kontsentratsiyasida 40 tan 47% ke shekem o'zgerdi. Sonliqtan, aytıwǵa boladı, qaplamanın' strukturasındag'ı bul o'zgerisler podlojkag'a berilip atırg'an awısıw potentsialının' 0 den -200 V qa shekem artıwınan h'a'm tezletkish kamerasındag'ı basımnın' o'zgerisinen ($0 \div 0.7$) Pa bolg'an.

Elementlik sostavtı izertlew ushın ekinshi mass-spektrometriya metodları qollanıldı, mısalı QMA-410 Balzers kvadрупol massa analizatorlı SAJW-0.5 SIMS mass-spektrometri h'a'm emeski razryadlı h'a'm SRS-300 (Poland, Warszawa) kvadрупol analizatorlı SAWJ-01 GP-MS. Qaplamanın' elementlik sostavı h'aqqında tolıq informatsiya alıw ushın energiyası 1.3 MeV bolg'an He^+ ionları h'a'm energetikalıq razresheniyası 16 keV bolg'an detektorı menen Rezerford kerı shashırawı (ROR-Rezerfordovskaya Obratnoe Resseyanie) sxeması qollanıldı. Geliy ionlarının' dozası 5 mikrokulon boldı. ROR spektrlerin qayta islew ushın standart (xalıq aralıq) programma [7] elementlerdin' teren'lik boyınsha profilin anıqlaw ushın paydalanıldı.

EDS mikroanalizatorlı skanerlewshi elektron mikroskop JEOL-7000F (Yaponiya) h'a'm i prosvechivayushiy elektronniy mikroskop JEOL 2010 F lar qaplamanın' strukturasın izertlew ushın qollanıldı.

Qaplamalardın' mexanikalıq xarakteristikaların izertlew ushın nanoindentirlew metodı Nanoindenter G200 (MES Systems, USA) priborında Berkovichtin' u'sh qırlı piramidkasın paydalanıp o'tkerildi, piramidkanın' ushının' iymeklik radiusı shama menen 20 nm. Otpechatkanın' teren'ligin o'lshew da'lligi ± 0.4 nm. Podlojkanın' o'lsheyip atırg'an qattılıq shamasına ta'sirin kemeytiw ushın u'lgilerdin' nanoqattılıg'ın o'lshew 200 nm teren'likke shekem alındı. Otpechatkalar bir birinen 15 mkm qashıqlıqta alındı. Ha'rbir u'lgide 5 ten kem bolmag'an o'lshew o'tkerildi h'a'm qattılıqtı u'zliksiz qadag'alaw moduli CMA (continuous stiffness measurement) paydalanıldı. Nanoindentordın' batıw teren'ligi qaplama qalın'lıg'ının' 1/10 u'lesinen kem boldı [1]. Ju'klew iymeklikliklerin analizlew Oliver h'a'm Farr metodiekası boyınsha islendi.

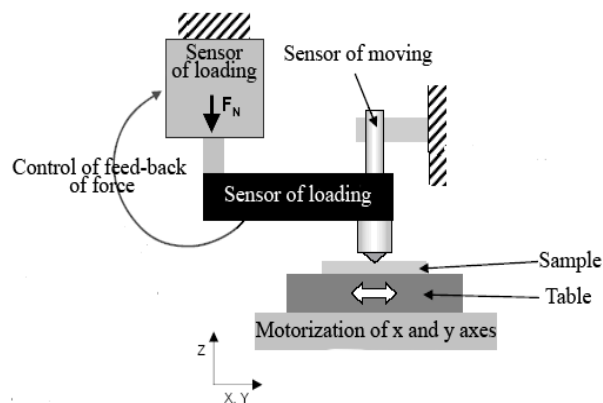
Nanostrukturalı plenkalardı difraktsiyalıq rentgen analizi eki DRON-4 (S-Peterburg) h'a'm X'Pert PANalitical (Holland) difraktometrlerinde o'tkerildi, qa'dem razmeri 0.05° , awısıw tezligi 0.05 grad/min , $U = 40 \text{ kV}$, $I=40 \text{ mA}$, anod - mıs.

İon da'steleri ja'rdeminde qaplama–podlojka sistemasının' kese kesimleri tayarlandı Bul kesimlerde morfologiya, struktura h'a'm elementlik analiz o'tkerildi.

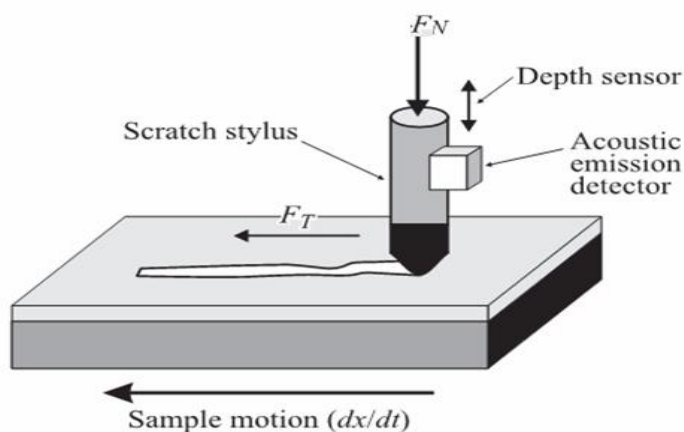
Friktsiyalıq sınaqlar “Barmaq–bet” metodikası boyınsha TAU-1M tribometrinde qurg'aq su'ykelis sharayatnıda o'tkerildi. Su'ykelis koeffitsienti h'a'm jeliniwge shıdamlılıq ilgerilemeli–qaytımlı sırg'anaw jag'dayında, komnata temperaturasında($22\pm1 \text{ }^\circ\text{S}$) h'a'm salıstırmalı ıg'allıq $80\pm5\%$. bolg'an sharayatta o'tkerildi. U'lgi jaylastırılğ'an stoliktin' qozg'alıw tezligi 4 mm/s , ushının' iymeklik radiusı 0.5 mm bolg'an indentor qattı quymadan VK8 (qattılığ'ı 87.5 HRC) islengen, sınaw waqtında indentorg'a tu'sirilgen ju'k 1 N .

Adgeziyalıq/kogeziyalıq bekkemlikti anıqlaw ushın, ja'ne tırnalıwg'a shıdamlılıqtı anıqlaw ushın, buzılıw mexanizmlerin u'yreniw ushın skretch-tester REVETEST (CSM Instruments) qollanıldı, onın' sxeması 9–su'wrette keltirilgen [10]. Qaplamanın' betine iymeklik radiusı 200 mkm bolg'an Rokvell S tipindegi almaz sferalıq indentorı menen u'zliksiz artıp barıwshı ku'sh ta'siri menen sızıqlar tırnalıp tu'sirildi, onın' sxeması 10-su'wrette keltirilgen. Akustikalıq emissiya, su'ykelis koeffitsienti, indentordın' batıw teren'ligi h'a'm normal ku'sh shaması (F_N) bir waqıtta o'lishendi. İsenimli na'tiyjelerdi alıw ushın h'a'rbir u'lgi betine u'sh sızıqtan tu'sirildi.

Sınaqlar to'mendegidey sharatyalarda o'tkerildi: indentorg'a nagruzka 0.9 dan 70 N g'a shekem arttı, indentordın' qozg'alıs tezligi – 1 mm/min , tırnalğ'an izdin' uzınlıg'ı 10 mm , ju'k tu'siriw tezligi – 6.91 N/min , signaldın' diskretlik jiyiligi – 60Hz , akustikalıq emissiya – 9 Db .



9-su'wret. Adgeziyalıq/kogeziyalıq bekkemlekti anıqlaw ushın eksperimental ustanovkanın' sxeması. F_N - normal nagruzka shaması



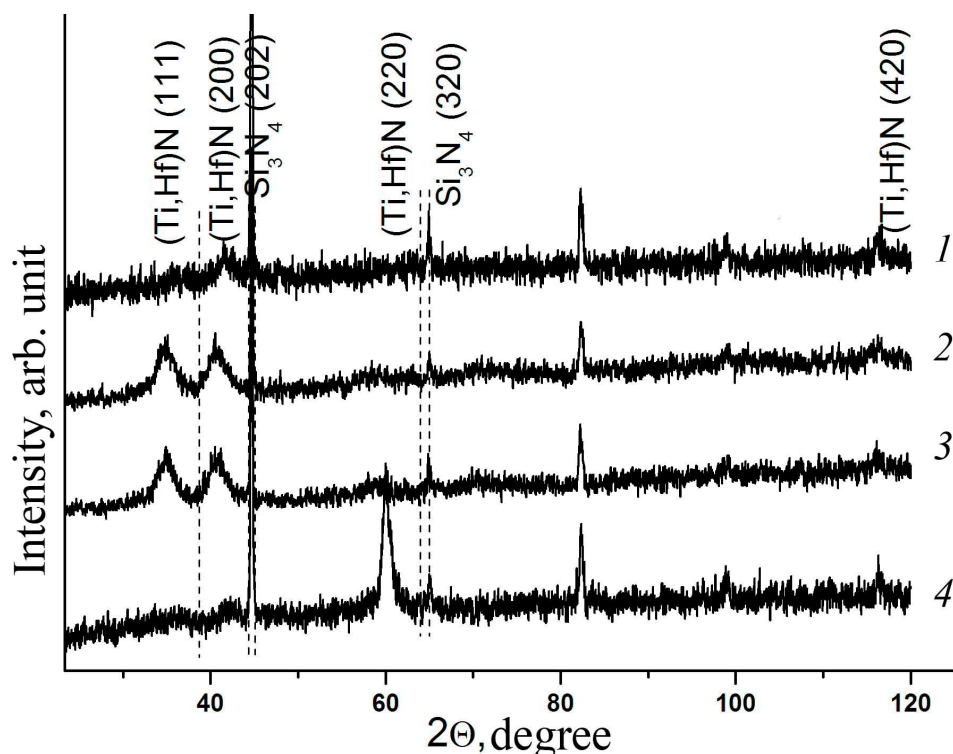
10-su'wret. Adgeziyalıq sınaqlardı o'tkiziw sxeması

Sınaqlar na'tiyjesinde indentordın' qaplamag'a kirip baslaytug'ın minimal (kriticheskaliq) nagruzka L_{C1} anıqlandı; L_{C2} – birinshi treshinanın' baslanıwı. Sınaq protsessinde registratsiyalanatug'ın h'a'rqıylı fizikalıq parametrler toparı metodikanın' isenimliligin h'a'm kritikalıq kernewdin' da'lligin arttıradı. Qaplamanı almaz indentor menen deformatsiyalaw qosımsha optikalıq mikroskop h'a'm mikroanaliz ushın Pegasus 2000 sisteması menen u'skenelengen elektron-ionlıq skanerlewshi mikroskop Quanta 200 3D ja'rdeminde o'tkerildi.

III BAP. EKSPERIMENTLER NA'TIYJELERI HA'M OLARDI TALQILAW

Alıng'an rentgen strukturalıq izertlewler na'tiyjelerin analizlewge o'tpesten burın to'mendegini atap o'tiwimiz kerek, sho'giw waqtında bette o'tetug'ın protsessler izbe izligin tu'siniw ushın mu'mkin bolg'an nitridlerdin' payda bolıw jıllılıg'ın salıstırıw kerek boladı. [10] g'a muwapıq $\Delta H_{298}(\text{HfN}) = -369.3 \text{ kDj/mol}$, $\Delta H_{298}(\text{TiN}) = -336.6 \text{ kDj/mol}$, $\Delta H_{298}(\text{Si}_3\text{N}_4) = -738.1 \text{ kDj/mol}$. Yag'nıy barlıq sistemalardın' payda bolıw jıllılıg'ı u'lken h'a'm teris, bul bunday sistemalardın' materialdın' mishennen podlojkag'a qarap o'tiwinin' barlıq etaplarında payda bolıw itimallıg'ı jetkilikli joqarı ekenliginen derek beredi. Tag'ı, *TiN* h'a'm *HfN* lardın' payda bolıw jıllılıqları bir birine jaqın bolıwı jetkilikli birtekli qattı rastvor (*Ti, Hf*)N dın' qa'liplesiw sharayatın anıqlaydı

Rentgenostrukturalıq izertlewlerdin' anıqlag'anınsha eki fazalı sistema qa'liplesken: qattı rastvor orınbasar (Ti, Hf)N (o'ytkeni bul fazalardın' difraktsiyalıq pikleri TiN (JCPDS 38-1420) h'a'm HfN (JCPDS 33-0592) mononitridlerinin' aralıg'ında jaylasqan, bul faza (Ti, Hf)N qattı rastvor zameshaniya sıpatında inditsirlengen, al $2\theta = 40-60$ mu'yeshler intervalında ko'rinetug'ın h'a'lsiz jayılın'qı pikler $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ekinshi fazanın' pikler spektrine tiyisli (11-su'wret).



11-su'wret. Polat podlojkag'a h'a'rqiyli rejimlerde sho'ktirilgen qaplamalardın' difraktsiyalıq spektrleri.

Rejimler: 1-100V, separatsiyalang'an, 2-200V, tuwrı, 3-100V, tuwrı, 4-200V, separatsiyalang'an

Rentgenodifraktsiyalıq izertlewler na'tiyjelerin analizlewдин' ko'rsetiwinshe, xarakterli strukturalıq o'zgeshelikleri boyınsha bir quramdag'ı mishennen aling'an qaplamalar separatsiyalang'anlıg'ına yamasa separatsiyalanbag'anlıg'ına ku'shli g'a'rezli. Bul analizdin' na'tiyjeleri 1-kestede keltirilgen.

Keste 1

Ti-Hf-Si-N plenkasın sho'ktiriw parametrleri, h'a'rqiyli seriya u'lgileri ushın reshetka da'wiri, kristallitlerinin' razmeri h'a'm qattılıg'ı

№	Reshetka da'wiri, nm	Kristallitlerdin' ortasha razmeri, nm	(HfTi) qattı rastvordag'ı Hf mug'darı ***,	Qattılıq, GPa	R, kameradag'ı azot basımı, Pa	Podlojka dag'ı potentsial, V
---	----------------------	---------------------------------------	--	---------------	--------------------------------	------------------------------

			at. %			
23 (separir ovanniý)	0.4294*	6.7**	19	42.7	0,7	-200
28 (pryamoy)	0.4430	4.0	65	37,4	0,6-0,7	-200
35 (pryamoy)	0.4437	4.3	69	38,3	0,6÷0,7	-100
37 (separir ovanniý)	0.4337	5.0	33	48.6	0,6	-100
31 (separir ovanniý)	0.4370	3.9	45	39,7	0,3	-200

*- tekstura ko'sheri (220) bolg'an teksturlang'an u'lgilerde (seriya №23) da'wir 0.43602 nm den u'lken, ol olarda *Hf* tın' mug'darı (shama menen 40 at.%) ko'p bolıwı menen baylanıslı bolıwı mu'mkin.

** - Tekstura ko'sheri bag'ıtında teksturlang'an kristallitlerdin' ortasha razmeri u'lken h'a'm 10.6 nm.

*** - Esaplawlar Vegard qa'desi boyınsha qattı rastvor da'wiri shamasınan islendi (makrokernewlerdin' difraktsiyalıq sızıqlardın' awısıwına ta'siri esapqa alınbadı

11-su'wretten (2-3 iymeklikleri), plazma ag'ımın separatsiyasız pryamotochniy rejimde qollang'anda piklerinin' intensivligi salıstırmalı u'lken teksturalanbag'an polikristall qaplamalar alınadı (bul demek, qaplama qalın'lıg'ı salıstırarlı bolg'anda, qattı rastvorda u'lken shag'ılıstırıw uqıplılıg'ına iye Hf nin' mug'darı Ti g'a qarag'anda ko'p ekenligin bildiredi).

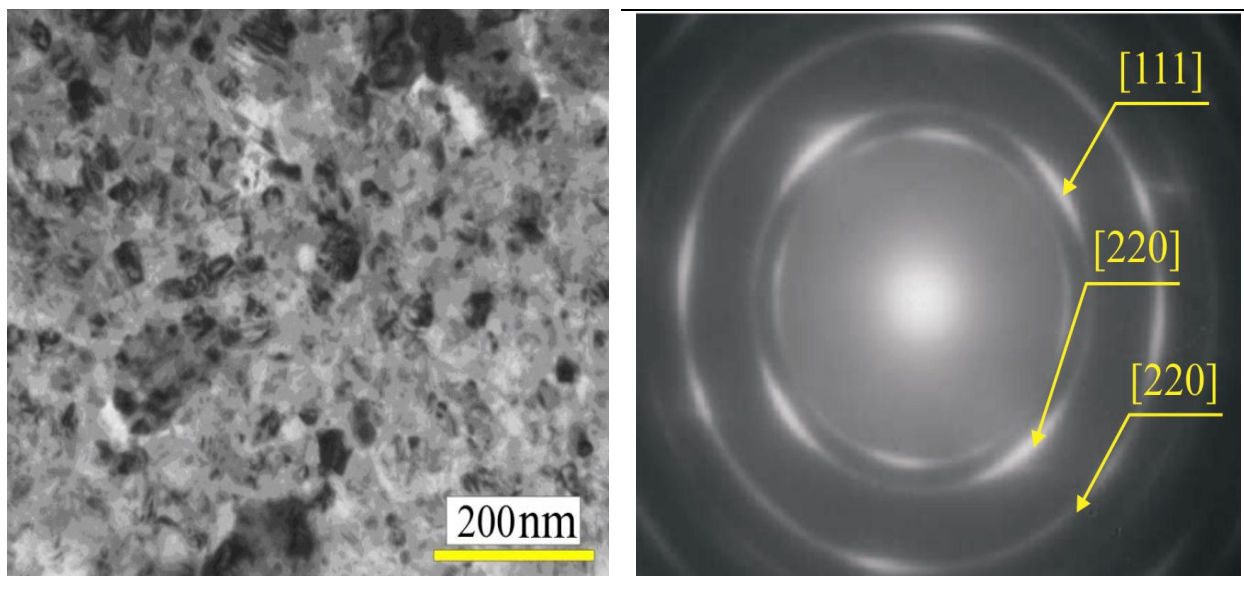
Da'steni separatsiyalag'anda sho'kken qaplamalar h'a'rqıylı da'rejede teksturalang'an. Podlojkag'a u'lken emes potenntsial bergende (-100 V) – bul [110] ko'sherli tekstura. 12a,b su'wretten ko'rinip tur, separatsiyasız pryamotochniy h'awa–reaktiv plazma ag'ımı rejiminde piklerinin' instensivlikleri salıstırmalı joqarı bolg'an teksturalanbag'an polikristall qaplamalar payda boladı (demek, qaplama qalın'lıg'ı salıstırarlı bolg'anda g'a qarag'anda shag'ılıstırıw koeffitsienti Ti nan joqarı bolg'an Hf din' mug'darı ko'p ekenligin ko'rsetedi).

Bul jag'dayda qaplamanın' strukturası teksturalang'an h'a'm teksturalanbag'an kristallitlerden turadı. Teksturalang'an kristallitlerdin' ko'lemlik mug'darı shama menen ulıwma sanının' 40% quraydı, al olardın' reshetka da'wiri teksturalanbag'an kristallitlerge salıstırg'anda u'lken. Bunday u'lken bolıwının' en' itimal sebebi bul gafniy atomının' qaplamada birtekli emes bo'listiriliwi, tiykarınan teksturalang'an kristallitler reshetkasında jaylasqan. Teksturanın' payda bolıwı plenka payda etiwshi bo'lekshelerdin' tu'siw bag'ıtında (o'sip atırg'an betke perpendikulyar bag'ıtta) kristallitlerdin' ortasha razmeri artıwına alıp keledi. Mısalı, teksturalanbag'an fraktsiyada kristallitlerdin' ortasha razmeri

6.7 nm, al teksturalang'an jag'dayda, ol sezilerli joqarı h'a'm 10.6 nm. Bunday tiptegi qaplama ushın nanoqattılıqtın' en' joqarı ma'nisi xarakterli (1–kesteni qara).

Kernew-200 V shekem arttırılğ'anda separatsiya ushın qollanılğ'an sxemada kristallitlerinin' ortasha razmeri 5.0 nm shekem kishireygen qaplamalar qa'liplesedi h'a'm teksturlang'an kristallitler fpaktsiyası a'dewir kemeyedi (20 ko'lem. kishi). Bul jag'dayda tekstura ko'sheri - [001]. Ja'ne atap o'tiwimiz kerek, tezletiwshi kernewdi -100 den -200 V ke shekem arttırğ'anda (yag'nıy plazma ag'ımının' energiyasın arttırğ'anda) teksturalang'anda teksturalanbag'anda

fraktsiyalardın' da'wiri ten'dey boladı. Biraq onın' shaması reshetka da'wiri podlojkag'a to'men potentsial bergen jag'daydag'ı teksturalanbag'an fraktsiyanın' reshetka da'wirinen ko'p h'a'm 0.4337 nm . Reshetka da'wirinin' bul ma'nisi, eger qattı rastvorlar ushın



12a,b-su'wret. *Ti-Hf-Si-N* qaplamannın' o'tiwshi elektron mikroskop JEOL 2010F ja'rdeminde alıng'an strukturasının' su'wreti (a) h'a'm nanoda'neshe strukturasının' elektronogramması

Vegard qa'desinen kelip shıqsaq, ol (Hf,Ti) nitrid fazadag'ı metall qattı rastvorda gafniydin' 33 at.% Hf mug'darına sa'ykes keledi (esaplawlarda da'wirlerdin' tablitsa boyınsha ma'nisleri paydalanıldı a $\text{TiN}=0.424173$ nm (JCPDS 38-1420) h'a'm a $\text{HfN}=0.452534$ nm (JCPDS 33-0592).

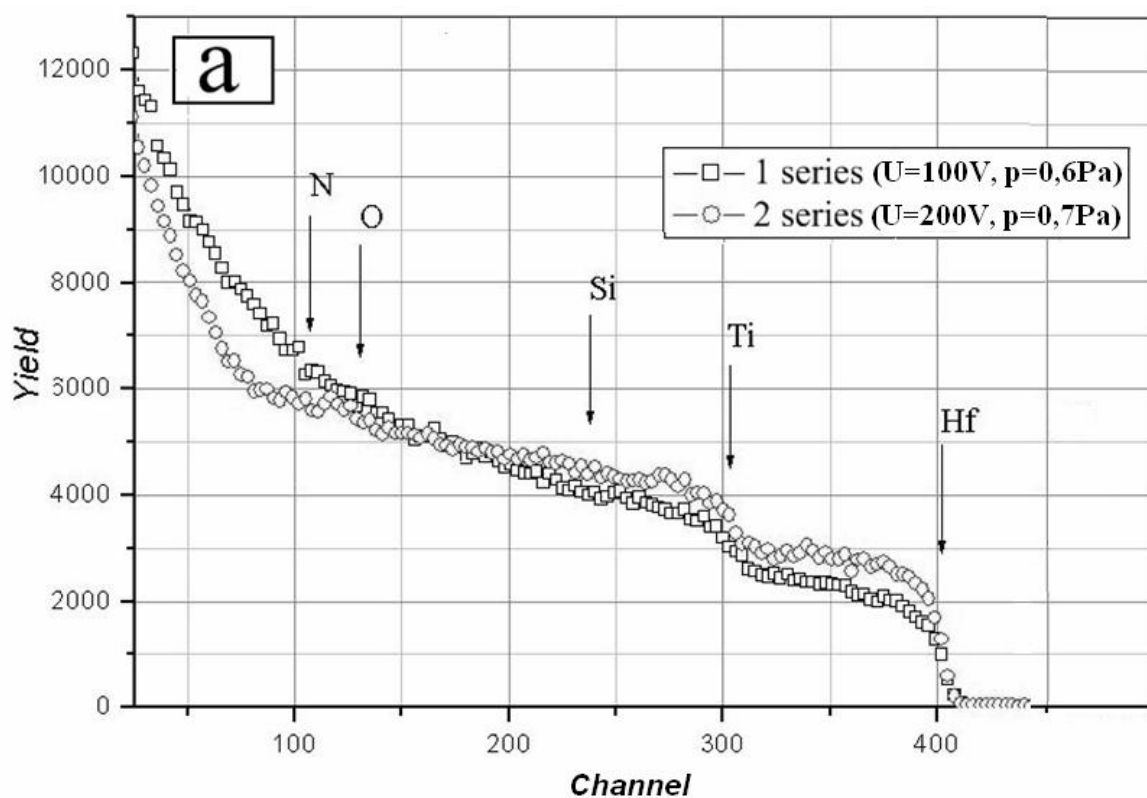
Qaplamadag'ı qısıwshı kernewdin' ta'siri menen $\theta-2\theta$ sxeması boyınsha difraktsiyanı alg'anda difraktsiyalıq piklerdin' kishireyiwine alıp keletug'ınlıg'ı belgili, al

Sa'ykes esaplawlar da'wirdin' u'lken ma'nislerine alıp keledi, yag'nıy qattı rastvordag'ı *Hf* kontsentratsiyasının' u'lken ma'nisine alıp keledi (qa'telik 5–10 at.% ke shekem jetiwi mu'mkin). Sonlıqtan islengen esaplawlar gafniydin' qattı rastvordag'ı kontsentratsiyasının' joqarg'ı shegi h'aqqında aytıwg'a mu'mkinshilik beredi.

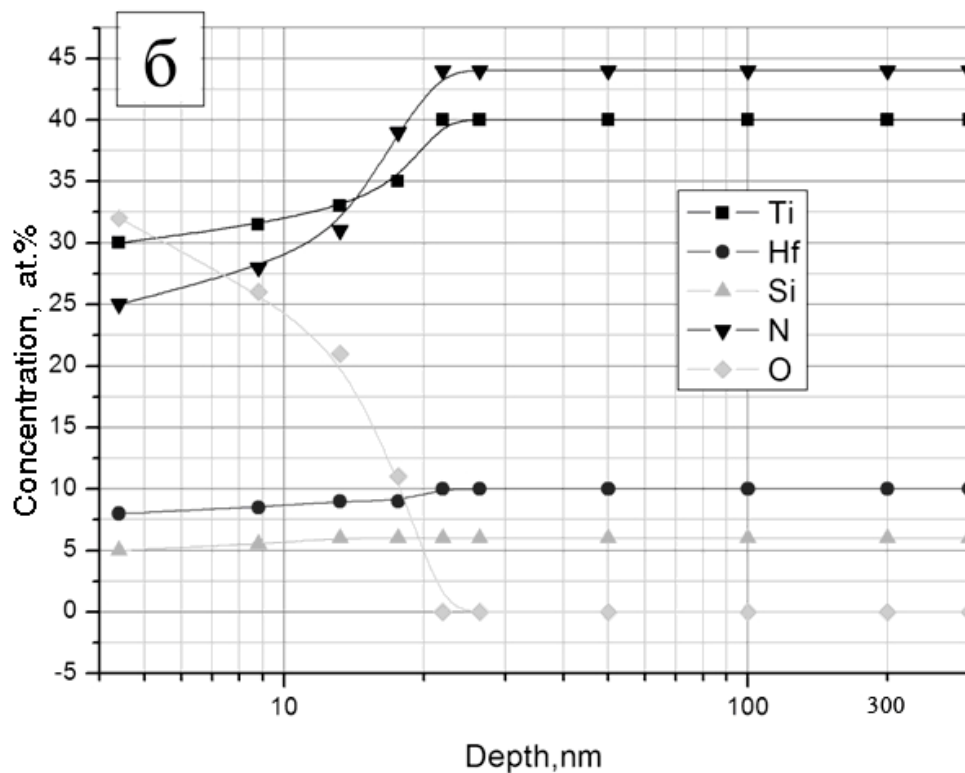
Joqarıda keltirilgen bprlıq na'tiyjeler rabochiy kameradag'ı basım xarakterli bolg'an sharayatta (0.6-0.7) Pa alıng'an u'lgilerge tiyisli. Al basım 0.3 Pa shekem to'menlegende, bul kernewdegi separatsiya rejiminde qollanıldı (3 seriya 6lgiler), qaplamadag'ı gafniy atomlarının' salıstırmalı mug'darı artadı (1-keste). Bunnan basqa basım kemeygende o'siwshi kristallitlerdin' ortasha razmeri kemeyedi. Bul jaydayda baqalanıp atırg'an effektlerdi basım kemeygende radiatsialıq faktordın' artıwı menen baylanıstırıwǵ'a boladı. Haqıyqatında, rabochiy basımın' kemeyiwı menen «mishen-podlojka» aralıǵında soqlıǵ'ısqanda atomlardın' energıyanı jog'altıw itimallıǵ'ı kemeyiwı boladı. Solay etip, podlojkag'a sho'gip atırg'an plenka payda etiwshi atomlar o'zindegi joqarı energıyanı saqlay otırıp ekinshi shan'lanıw h'a'm radiatsialıq defektler payda bolıw protsesslerin stimullastıradı, birinshi jag'dayda bul qaplamada awır gafniy atomlarının' salıstırmalı mug'darın' payda bolıwına alıp keledi, al ekinshisinde – zarodışlar sanın' artıwına h'a'm sa'ykes tu'rde qaplmadag'ı kristallitlerdin' kishi ortasha razmerine alıp keledi.

Xarakterli basımda(0.6-0.7) Pa alıng'an qaplamalarda da'steler separatsıyası joq waqıtta (pryamotochnıy rejimde), reshetka da'wirinin' u'lken ma'nisleri payda boladı, ol awır Hf gafniy atomlarının' mug'darın' artıwı menen anıqlanadı (1 kesteni qara). Mu'mkin, a'dewir intensiv sho'giwdin' pryamotochnıy rejimi kristallitlerdin' ortasha razmerinin' kishireyiwine alıp keledi, onın' sebebi waqıt birligi ishinde zarodışlardın' payda bolıw tıǵ'ızlıǵ'ının' artıwı. Bunnan basqa, kristallit razmerlerinin' kishireyiwinin' a'dewir ku'shli effekti u'lken potentsialdı (-200 V) paydalanıwdan boladı, bul durısıraq, o'ytkeni radiatsialıq faktordın' artıwı strukturanın' dispergleniwine alıp keledi [11].

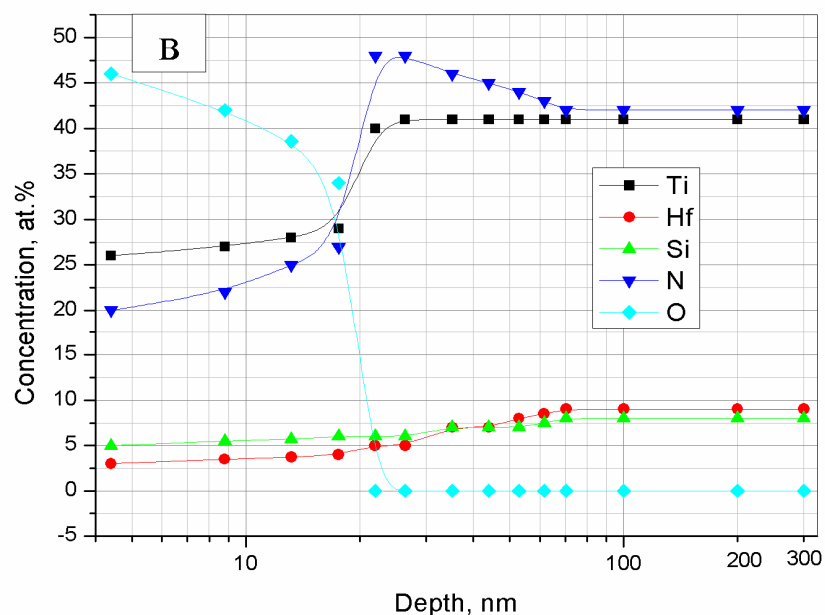
13a,b–su'wrette ROR analiz metodı menen alıng'an asa qattı nanostrukturalı *Ti-Hf-Si-N* plenkalardın' elementlik sostavın u'yreniw na'tiyjeleri keltirilgen. Bul na'tiyjelerge muwapıq, birinshi seriya u'lgiler ushın (13a–su'wret, 1 iymeklik), *Ti-Hf-Si-N* plenkasının' kompozitsıyası $(\text{Ti}_{27}\text{-Hf}_{23}\text{-Si}_8)\text{N}_{46}$ turadı. Ъ



13a–su’wret. Ti-Hf-Si-N sho’ktirilgen polat u’lgiden aling’an energiyasi 1.3 MeV bolg’an Ne⁺ ionlarinin’ keri shashiraw energetikalıq spektri: 1-potentsial 100 V, r=0,6 Pa,
2-potentsial 200 V, r=0,7 Pa



13b-su'wret. Qaplama quramına kiretug'ın elementler (sonın' ishinde qadag'alanbaytug'ın) kontsentratsiyasının' ROR metodu ja'rdeminde aling'an profilleri

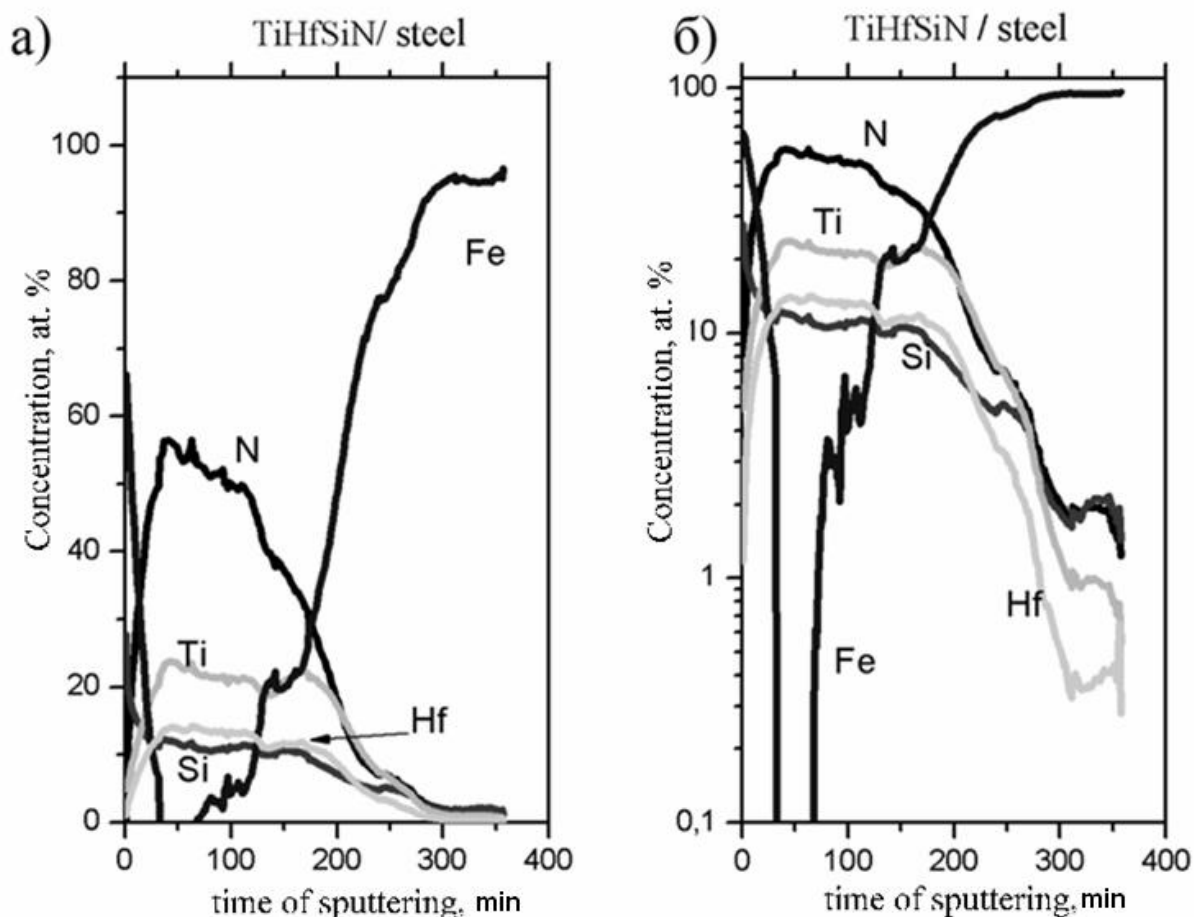


13v-su'wret. *Ti-Hf-Si-N* qaplamasının' teren'ligi boyınsha ROR spektri boyınsha aling'an elementler profili, qatlamnıń atomlıq tıg'ızlıg'ı titan nitridinin' atomlıq tıg'ızlıg'ına jaqın ekenligin esapqa alıw menen

ROR metodu atomlıq nomeri joqarı bolg'an elementlerdin' kontsentratsiyasını anıqlaw, plenkanın' qalın'lıg'ın anıqlaw ushın etalon (analizdin' basqa metodları ushın) metod ekenligi jaqsı belgili, bunnan basqa bul metod buzawshı metod mine usında onın' artıqmashlıg'ı. Sonın' menen VIMS analizdin' a'dewir sezgir metodu (seziwdin' to'mengi shegi $\approx 10^{-6}$ at.%). Sonlıqtan ROR, VIMS h'a'm emeski razryadlı GP-MS metodları ja'rdeminde alıng'an na'tiyjelerdi salıstırıw elementlik sostavtın' teren'lik boyınsha bo'listiriliwinin' a'dewir real kartinasın alıwg'a mu'mkinshilik beredi. Bul plenkanın' betinde, plenka–podlojka shegerasında sostavtı teren'lik boyınsha elementlik , sonın' ishinde qadag'alanbaytug'ın O h'a'm S qospa atomlarında analizlewge mu'mkinshilik berdi. Kislorod h'a'm uglerod plenka alınıp atırğ'an kameradag'ı qaldıq atmosferadan qaplamag'a o'tip qaladı. 13b, 13v–su'wretlerde ROR metodu ja'rdeminde alıng'an qaplama sostavına kiretug'ın elementlerdin', sonın' ishinde qadag'alanbaytug'ın qospa atomlardın' profili keltirilgeler VIMS analiz na'tiyjelerin esapqa almay du'zilgen.

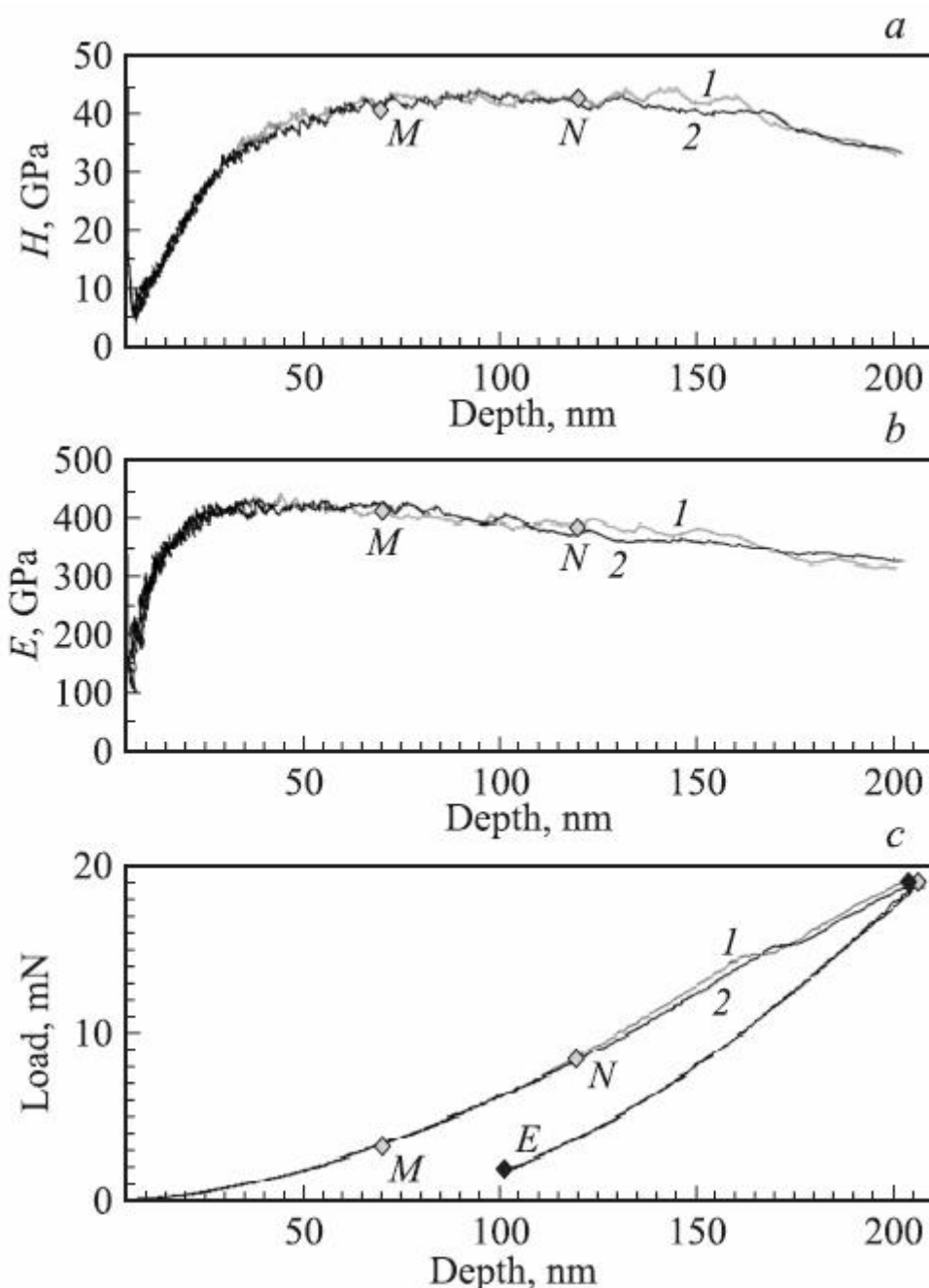
Solay etip, u'lgilerdin' birinshi seriyası ushın qaplama qalın'lıg'ı $1\text{mkm} \pm 0.012\text{ mkm}$ bolg'anda plenkanın' stexiometriyası $(\text{Ti}_{40}\text{-Hf}_{10}\text{-Si}_6)\text{N}_{44}$ bolg'an. Awısıw potentsialın -200 V shekem arttırıp h'a'm kameradag'ı basımdı 0.7 Pa shekem o'zgertip ekinshi seriya plenkası Ti-Hf-Si-N alındı.

Plenkanın' sostavın ROR metodu ja'rdeminde izertlep (2 iymeklik), ekinshi seriya, 13a–su'wret h'a'm onı energodispersli rentgen spektroskopıya, VIMS analiz (14a,b–su'wret) na'tiyjeleri salıstırıp plenkanın' quramı to'mendegidey ekenligin taptıq – $(\text{Ti}_{24}\text{-Hf}_{14}\text{-Si}_{12})\text{N}_{50}$.



14-su'wret. *Ti-Hf-Si-N* plenkasında VİMS analiz ja'rdeminde aling'an elementler profili, kontsentratsiyalar $Ti = 24\%$, $Hf = 14\%$, $Si = 12\%$, $N = 50$ (birinshi seriya) atomliq protsentlerde

Berkovichtin' u'sh qırlı piramidkası [1] ja'rdeminde o'lshengen nanoqattılıqlar shaması u'lgilerdin' birinshi seriyasında (7a-su'wret) $N=42.7$ GPa; $E=390\pm 17$ GPa, al ekinshi seriya u'lgiler ushın *Ti-Hf-Si-N* plenkasının' qattılıg'ı $N=48.4\pm 1.4$ GPa, serpimlilik moduli $E=520\pm 12$ GPa (tag'ı 1 kesteni qara). N h'a'm E nin' batıw teren'ligine g'a'rezliligi nde tochkalar menen usı shamalar anıqlang'an orınlar ko'rsetilgen. 14a,b,s-su'wretlerde nanoindentordın' batıw teren'liginin' ju'kke g'a'rezliligi keltirilgen.



14a,b,s-su'wret. Qattılıq N (GPa) (a), serpimlilik moduli E (GPa), (b), indentordın' batıw teren'liginin' ju'kke g'a'rezlilikleri. 1 h'a'm 2 iymeklikleri bir h'a'm sol u'lgide h'g'rıyılı o'lshewlerge tiyisli. Ashıq tochkalar – 1 iymeklikti o'lshew ornı, qara tochkalar – 2 iymeklik ushın o'lshew orınları

Qattı rastvordın' reshetka parametri kameradag'ı basım artqanda artatug'ınlıg'ı, podlojkag'a berilip atırg'an potentsialg'a g'a'rezli emes ekenligi anıqlandı (1 keste). U'lgilerdin' 23 seriyalarında(Ti, Hf)N qattı rastvordın' reshetka parametri en' kishi bolg'an.

Debay–Sherrer boyınsha nanoda'neshelerdin' razmerin esaplawdın' ko'rsetiwinshе $(\text{Ti}_{28}\text{-Hf}_{18}\text{-Si}_9)\text{N}_{45}$ kompozitsiyadag'ı u'lgilerdin' ekinshi seriyasında birinshi seriyag'a salıstırg'anda shama menen 1.5 ese kishi bolg'an, atap aytqanda $(\text{Ti}, \text{Hf})\text{N} = 4 \text{ nm}$, al amorf (yamasa kvaziamorf) fazanın' razmeri birinshi seriya u'lgilerge salıstırg'anda kishi bolıp shıqqan (1 keste).

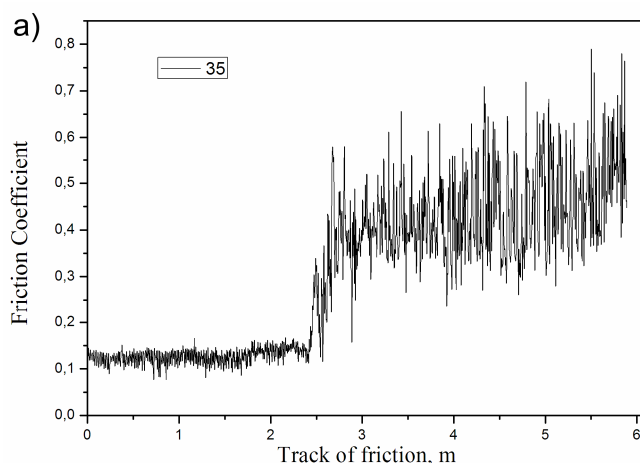
Joqarı razresheniyege iye o'tiwshi elektron mikroskop ja'rdeminde alıng'an na'tiyjeler yag'nıy nanostrukturalı asa qattı plenkalardag'ı difraktsiyalar boyınsha nano da'neshe razmeri shaması $(2\div 5) \text{ nm}$ difraktsiyalıq rentgen analiz na'tiyjeleri menen sa'ykes keledi, al (Ti, Hf) nanoda'nesheni orap turg'an $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ qatlamnıń razmeri $(0.8\div 1.8) \text{ nm}$ boldı.

Qattılıqtın' shaması 40 Gpa dan joqarı bolsa, onda ol asa qattı nanokompozit [1-3], al qattılıq 80 Gpa h'a'm ko'p bolsa onda ol ultra qattı boladı. Bul jumısta alıng'an qaplamalarda qattılıq shaması 42.7 GPa dan $48.4\div 1.6 \text{ Gpa}$ shekem boldı, onda ol asa qattı nanokompozit qaplama.

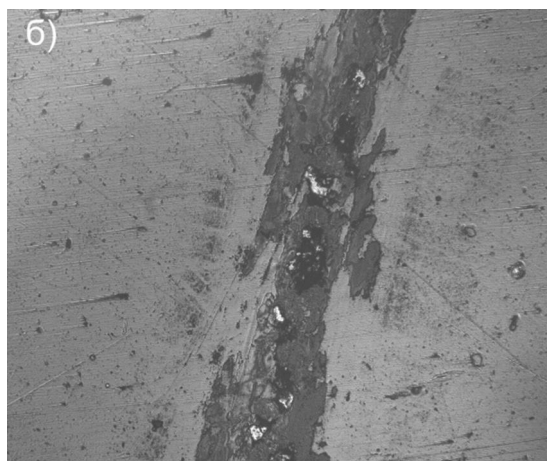
Birinshi seriya Ti-Hf-Si-N qaplamannıń qattılıq, serpimlilik moduli, sıyaqlı qa'siyetleri uzaq 6 dan 12 ayg'a shekem waqıt dawamında saqlawdan o'zgeriske ushıramaytug'ınlıg'ı anıqlandı. Termikalıq turaqlılıq h'a'm okisleniwge shıdamlılıg'ı anıqlanbadı. Biraq, plenkanın' sho'giw waqtında podlojkanın' temperaturası $(350\div 400^\circ\text{C})$ tan artpadı, al da'nesheler a'tırapında tolıq segratsiya bolıw ushın $(550\div 620^\circ\text{C})$ temperatura kerek [2,5,8], nano da'neshelerdin' shegerası boylap spinodal segregatsiya protsessi tolıq bolg'an dep tastıyıqlaw qıyın.

15a-su'wretten ko'rinip turg'anınday № 35 u'lginin' su'ykelis koeffitsienti baslapqı etapta 0.15ke ten'. Keyingi etapta 2.5 m su'ykelisten keyin qaplama buzıla basladı (oyıqlar, treshinalar payda boldı). Su'ykelis koeffitsienti 0.45 shekem arttı (qaplamannıń qatılıg'ı ju'da' joqarı emes). № 23 u'lgide basında qaplama gedir budırlıg'ınan su'ykelis koeffitsienti 0.25 shekem arttı, keyin ornag'an jeliniw etapında su'ykelis koeffitsienti 0.2 boldı (qaplama joqarı qattı). Su'ykelis koeffitsienti, akustikalıq emissiya h'a'm indentordın' batıw teren'ligi sıyaqlı parametrler barlıq u'lgiler ushın o'tkerildi.

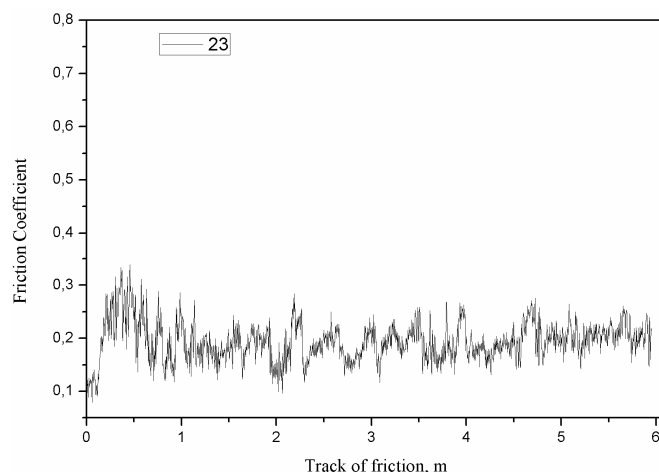
Atap o'tiwimiz kerek, 31 u'lgide su'ykelis koeffitsienti kishi 0.12 (su'ykelistin' basında), biraq qaplamanın' betinen shama menen 0.3 mkm teren'likte ol shama menen 0.34÷0.36 shekem keskin artadı, bul tek g'ana qattılıqa baylanıslı emes, al (Si_3N_4) baylanısının' qalın'lıg'ı h'a'm gafniy Hf atomlarının' (Ti,Hf)N qattı rastvorındag'ı az mug'darı menen baylanıslı bolıwı mu'mkin.



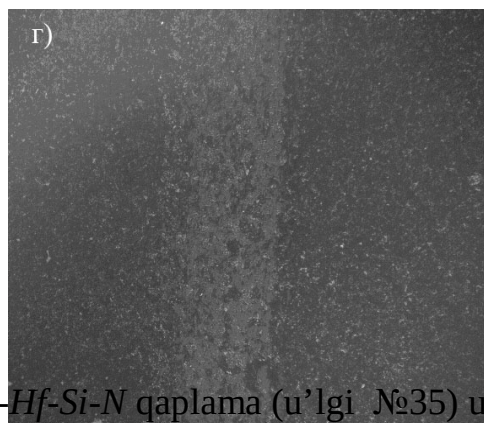
15a–su'wret. TAU–1M tribometrinde alıng'an su'ykelis koeffitsienti g'a'rezliligi, VK-8 qattı quymadan islengen sharik asa qattı nanostrukturalı qaplama u'stinde su'ykelgende alıng'an (nagruzka 1 N) (u'lgi №23 Ti-Hf-Si-N ($U=-200V$, $P=0.7$ Pa)



15b–su'wret. VK-8 sharikti $Ti-Hf-Si-N$ qaplama (u'lgi №23) u'stinde su'ykewden bolg'an trek su'wreti (rastrlı elektron mikroskopta alıng'an).



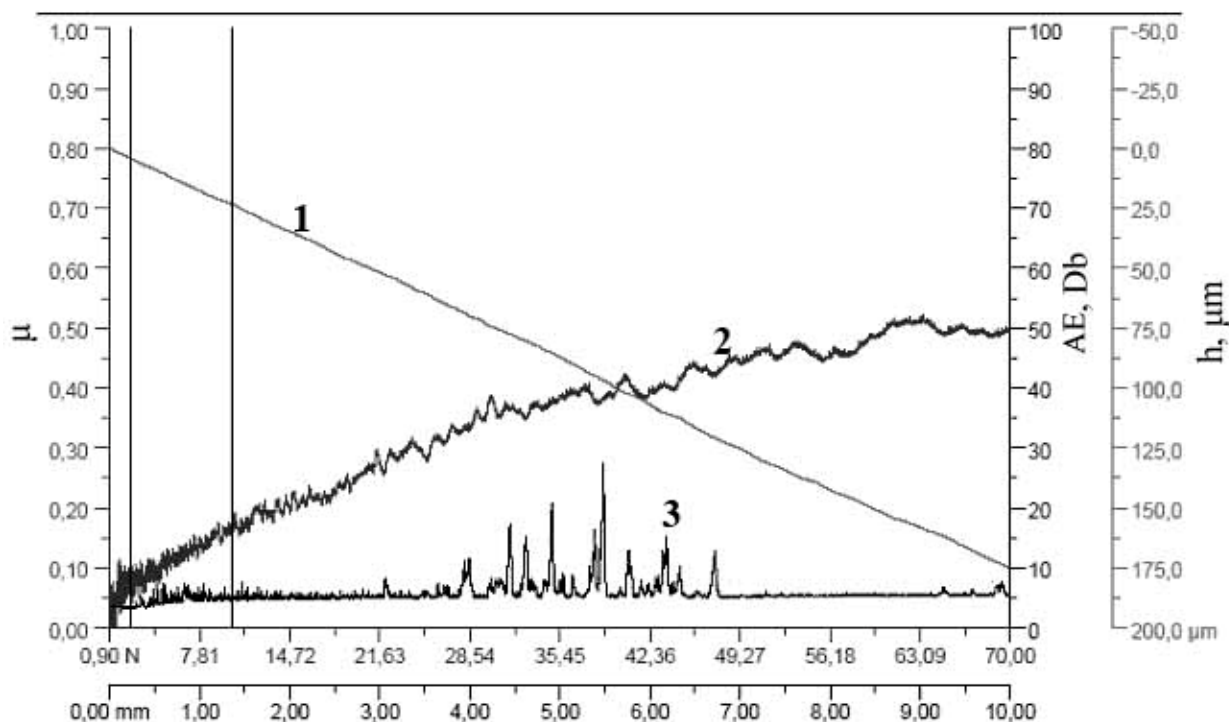
15v–su’wret. TAU–1M tribometrinda aling’an su’ykelis koeffitsienti g’a’rezliligi, VK-8 qattı quymadan islengen sharik asa qattı nanostrukturalı qaplama u’stinde su’ykelgende aling’an (nagruzka 1 N) (u’lgi №35 Ti-Hf-Si-N ($U=-100V$, $P=0.7$ Pa).



15g–su’wret. VK-8 sharikti *Ti-Hf-Si-N* qaplama (u’lgi №35) u’stinde su’ykewden bolg’an trek su’wreti (rastrlı elektron mikroskopta aling’an).

16-su’wrette 23 u’lgini REVETEST skretch-testersınaw na’tiyjeleri keltirilgen, minimal (kritikalıq) nagruzka $L_{C1}=2.46$ N h’a’m birinshi treshinanın’ payda bolıw nagruzkası $L_{C2}=10.25$ N.

Atap o’tiw kerek, nagruzkanın’ artıwı menen su’ykelis koeffitsientinin’ nagruzkag’a g’a’rezlilik iymekligi ostsillyatsiya xarakterine iye: su’ykelis koeffitsientinin’ artıwı

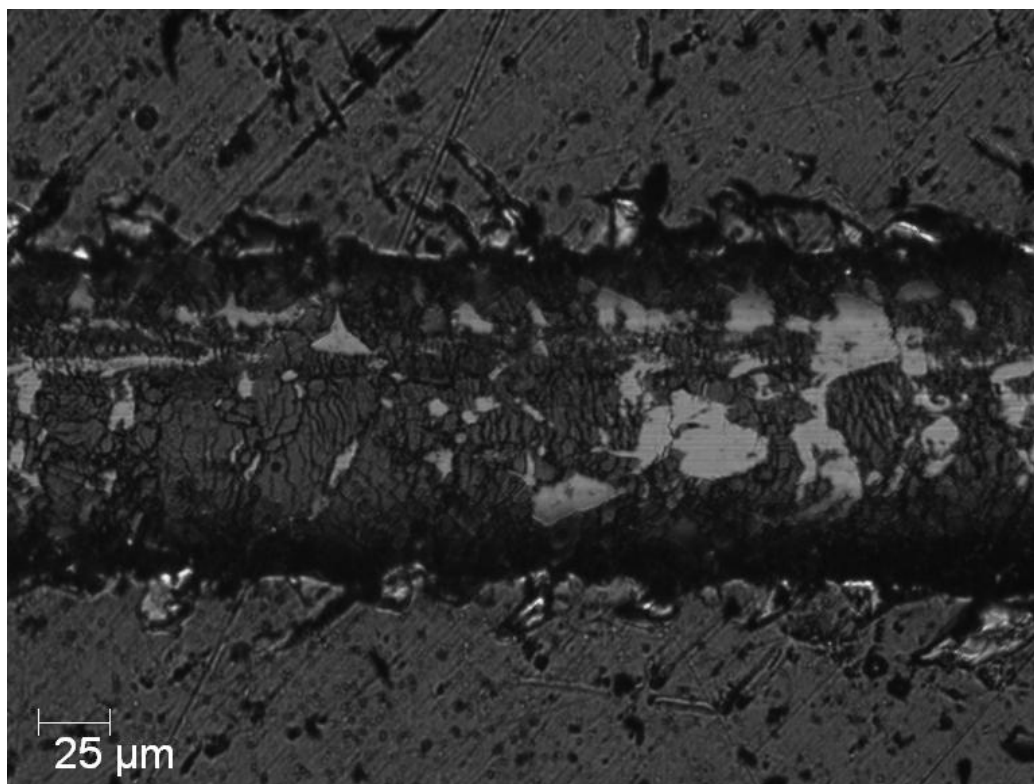


16a-su'wret. Qaplama *Ti-Hf-Si-N/podlojka* sistemasında adgeziyalıq sınaqlar na'tiyjeleri (№23 u'lgı): 1-indentordın' batıw teren'liginin' g'a'rezlılıgı, 2-su'ykelis koeffitsienti, 3-akustikalıq emissiya AE

akustikalıq emissiyanın' keskin artıwları h'a'm indentordın' material ishine kiriwi a'steleniwi menen birge boladı. Registratsiyalanıp atırg'an parametrlerdin' bunday o'zgerisi jumsag'ıraq podlojka betindegi qalın'lıg'ı 1 mkm den artıq bolg'an qattı qaplama almaz indentorg'a sezilerli qarsılıq ko'rsetedi joqarı nagruzkalarda ol derlik tolıq jelinip ketedi.

Qaplamalardı sınaqtan o'tkergende buzılıwdın' h'a'rqıylı tiplerine alıp keletug'ın kritikalıq nagruzkanın' h'a'rqıylı bosag'alıq shegin anıq ko'rsetiwge boladı, biraq, tek g'ana minimal (kritikalıq) nagruzka L_{C1} h'a'm birinshi treshinanın' payda bolıw nagruzkasın L_{C2} g'ana qaplamanın' adgeziyalıq buzılıwı menen baylanıstırıw mu'mkin.

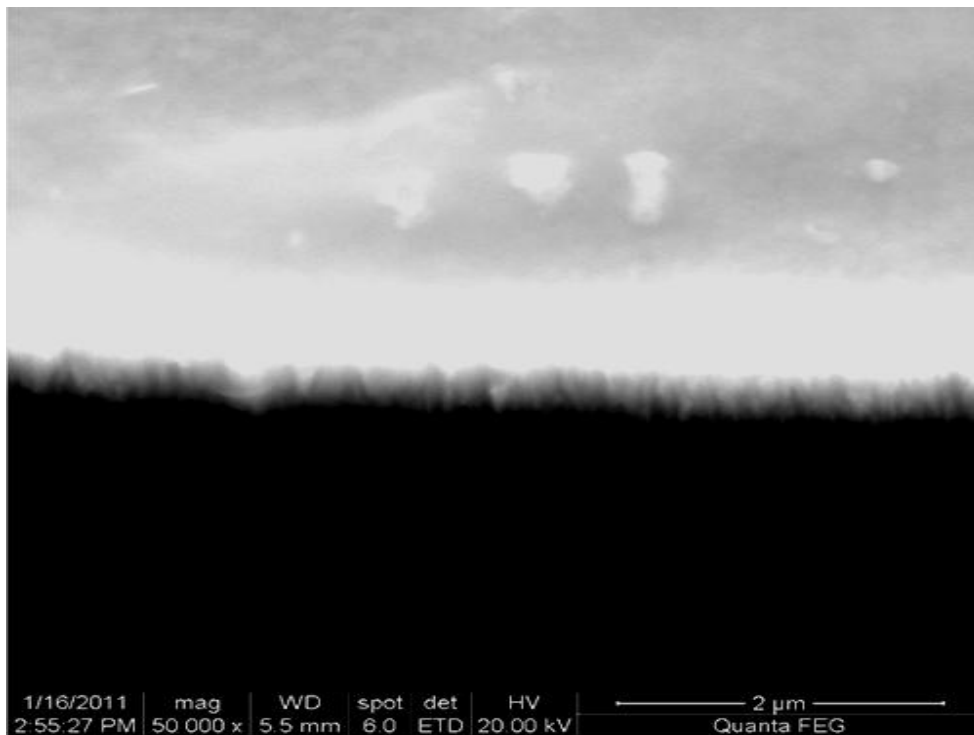
Qaplamanın' buzılıwı jeliniw oyısı ishindegi ayırım shevron treshinanın' payda bolıwı menen baslanadı, bul lokal kernewdin' h'a'm su'ykelis ku'shinin' artıwın keltirip shıg'aradı. Bul qaplamanın' keyingi tez jeliniwine alıp keledi (16b-su'wret).



16b-su'wret. *Ti-Hf-Si-N* qaplamasının' buzılıw zonasındag'ı ko'rinisi, nagruzka diapazonı 0,9-90 N.

Adgeziyalıq sınaq na'tiyjeleri boyınsha 23 u'lginin' kogeziyalıq buzılıwı minimal $L_{C1}=2.38 H$ (kritikalıq) nagruzkada baslanadı h'a'm adgeziyalıq buzılıwı qaplamanın' plastikalıq jeliniwi birinshi treshinanın' payda bolıw nagruzkası $L_{C2}=9.81 H$ da ju'zege keledi.

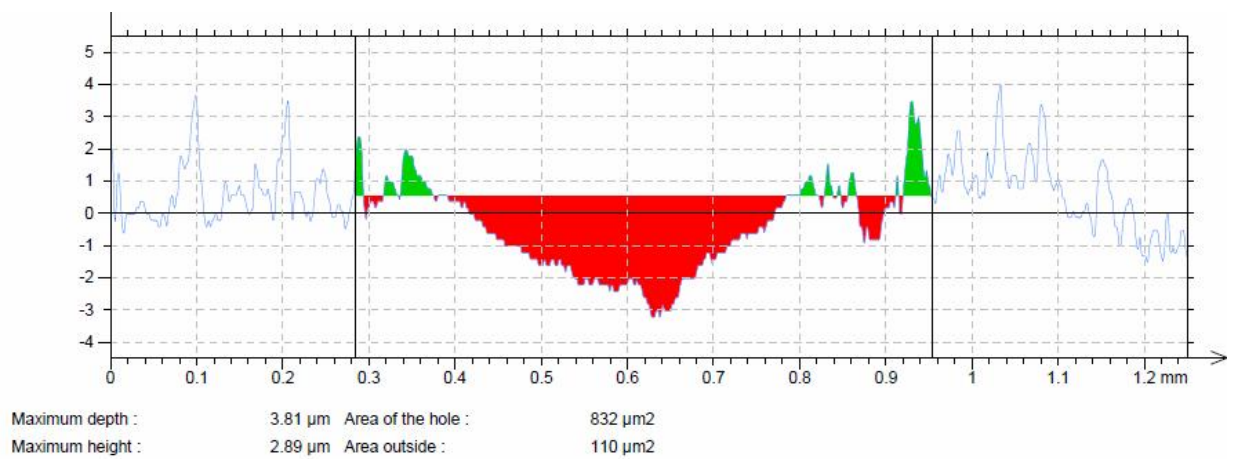
17-su'wrette ayırım da'nesheler shetinde betke shıg'atug'ın stolb strukturag'a iye atawshalar ko'rinedi. To'mendegidey nızamlılıq baqlanadı: gedir-budırlıq plenkanı alıw sharyatına g'a'rezli, atap aytqanda, podlojkag'a berilip atırg'an potentsialdın' o'zgeriw shamasına g'a'rezli. Bettegi tolqınlıq bette ayırım atawshalardıń payda bolıwı h'a'm o'siw mexanizmi menen baylanıslı (Folmer-Veber mexanizmi).



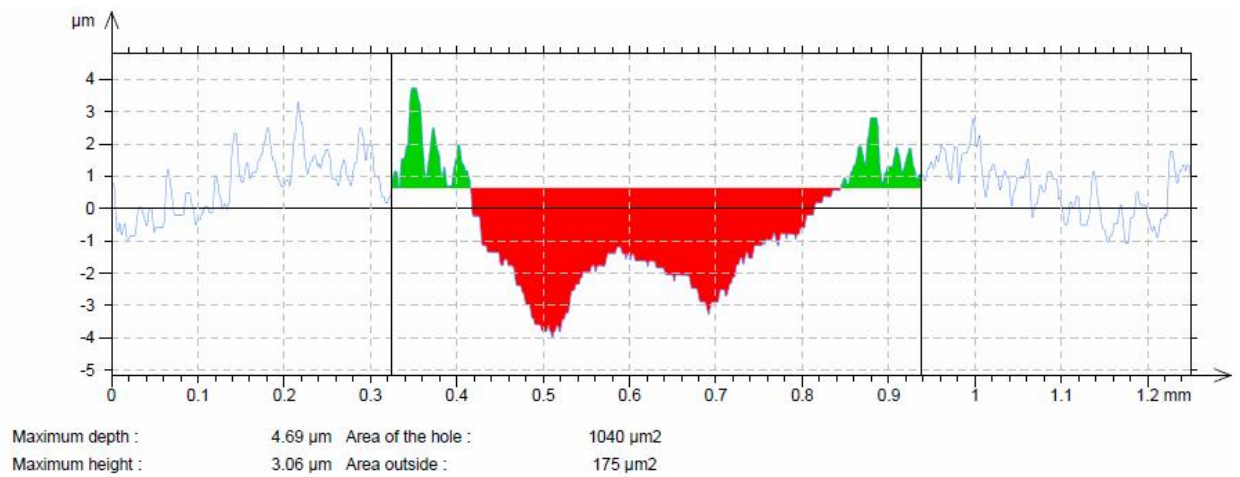
17-su'wret. Polat podlojkag'a otirg'izilg'an *Ti-Hf-Si-N* qaplamannin' ($U=-100V$, $P=0.3$ Pa rejimde aling'an) kese kesiminin' su'wreti

18a,b–su'wretlerde №23(a), №31 (b) h'a'm №35(v) u'lgilerdi REVETEST skretch–testerinde sinaw na'tiyjeleri keltirilgen. Aling'an na'tiyjeler boyinsha to'mendegini tastia'iqlaw mu'mkin, jeliniwge en' shıdamlısı 23 seriyadag'ı u'lgı (11a-su'wret), bunda qattı rastvorında gafniydin' en' kishi mug'darı. Sa'ykes gafniydin' qattı rastvorındag'ı mug'darı artıwı menen jeliniwge shıdamlılıq kemeyedi (11b,v-su'wret).

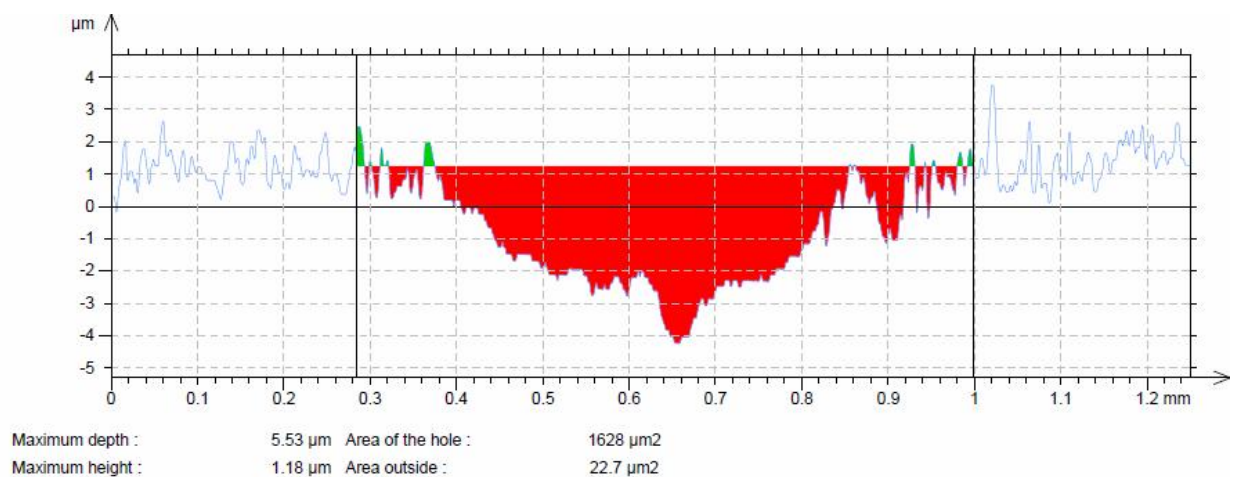
Birinshi seriya *Ti-Hf-Si-N* qaplamalarının' qattılıq, serpimlilik moduli sıyaqlı qa'siyetleri uzaq waqıt 6 – 12 ay dawamında saqlaw menen o'zgermeydi. Olardın' termikalıq turaqlılı g'ı h'a'm oksileniwge turaqlılılıg'ı tekserilmedi.



18a-su'wret. REVTEST skretch-testerinde jeliniwge shıdamlılıqtı sınaw na'tiyjeleri (№23 u'lgi)



18b-su'wret. REVTEST skretch-testerinde jeliniwge shıdamlılıqtı sınaw na'tiyjeleri (№31 u'lgi)



18v-su'wret. REVTEST skretch-testerinde jeliniwge shıdamlılıqtı sınaw na'tiyjeleri (№35 u'lgi)

JUWMAQLAW

Joqarı fizikalıq–mexanikalıq qa'siyetlerge iye bolg'an Ti-Hf-Si-N tiykarında jan'a asa qattı nanostrukturalang'an qaplamalar (plenkalar) alındı (Ti, Hf)N nanoda'neshelerdin' razmeri 6.7 den 5 nm ge shekem kemeygende h'a'm α -Si₃N₄ (nanoda'nesheler arasındag'ı qatlam sıpatındag'ı amorfnoy fazı) qa'liplesiwi menen nanoqattılıq 42.7 GPa den 48.4÷1.6 GPa shekem artad.

Podlojkag'a beriletug'ın potentsial -200 V shekem artqanda, sho'giw waqtında separatsiya bolg'anda, kristallitlerinin' ortasha razmeri 5.0 nm shekem kishireygen qaplama qa'liplesedi. Basım 0.3 Pa shekem kemeygende, qaplamadag'ı awır gafniy atomlarının' salıstırmalı mug'darı artadı, o'siwshi kristallitlerdin' ortasha razmeri kemeyedi.

Solay etip, adgeziyalıq h'a'm tribologiyalıq sınaqlardan polat podlojkag'a sho'ktirilgen Ti-Hf-Si-N qaplamanın' adgeziyalıq bekkemligi, friktsiyalıq h'a'm deformatsiyalıq xarakteristikaları anıqlandı.

Qaplama–podlojka sistemasındag'ı serpimli h'a'm plastikalıq deformatsiya protsessleri ta'riplendi, kristikalıq nagruzkanın' bosag'alıq ma'nisleri anıqlandı

Alıng'an qaplamalar joqarı qattılıqqa, jeliniwge shıdamlılıqqa iye, podlojka menen adgeziyası joqarı, serpimlilik moduli h'a'm su'ykelis koeffitsienti kishi, mine bular mashina qurılısında perspektivag'a iye juqa plenkalı material ekenligin ko'rsetedi.

Avtor eksperimentlerdi o'tkeriw h'a'm o'lshewlerde ja'rdem ko'rsetkenligi ushın professor A.D.Pogrebnyakka (Sumı ma'mleketlik universiteti, Ukraina) teren' minnetdarshılıq bildiredi.

PAYDALANILG'AN A'DEBIYATLAR

1. И.П.Суздаев. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров и наноматериалов. М.: КомКнига, 2005, 598 с.
2. С.Бреннер. Прочность нитевидных кристаллов // Волокнистые композиционные материалы. М.: Мир. 1967. С.24-53.
3. Г.В.Сергеев. Нанохимия. М.: Университет. Книжный дом, 2007. 336 с.
4. М.Ю.Гуткин, И.А.Овидько. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах. СПб.: Янус, 2001. 180 с.
5. А.И.Гусев. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
6. Р.А.Андриевский, А.В.Рагуля. Наноструктурные материалы. М.: Изд.центр Академия, 2005, 192 с.
7. Р.А.Андриевский, А.М.Глезер. Прочность наноструктур. УФН. 2009. Т.179, № 4, с.337-359.
8. Ю.И.Головин. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикроробъектах, тонких приповерхностных слоях и пленках. ФТТ. 2008. Т.50, вып.12, с.2113-2142.
9. В.М.Береснев, О.В.Соболь, А.Д.Погребняк, П.В.Турбин, С.В.Литовченко. Термическая стойкость фазового состава, структуры и напряженного состояния ионно-плазменных конденсатов системы Zr-Ti-Si-N//ЖТФ. 2010. Т.80, № 1, с.116-121.
10. А.Д.Погребняк, А.П.Шпак, В.М.Береснев и др. Стехиометрия, фазовый состав и свойства сверхтвердых наноструктурных пленок Ti-Hf-Si-N полученных с помощью вакуумно-дугового источника в высокочастотном разряде. ПЖТФ, 2011. Т.37, вып.13, с.90-96.
11. Д.В.Штанский, С.А.Кулинич, Е.А.Левашов, J.J.Moore. Особенности структуры и физико-механические свойства наноструктурных тонких пленок. //ФТТ. 2003. т.45, вып.6, с.1122-1129.

12. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // УФН 2009. Т. **179**. С. 35-64.
13. Zhang R.F., Argon A. S., Veprek S. Electronic structure, stability, and mechanism of the decohesion and shear of interfaces in superhard nanocomposites and heterostructures // Phys. Rev. 2009. V. **79**. P. 245426.
14. Musil J., Baroch P., Zeman P. Hard nanocomposite coatings. Present Status and Trends: n Book Plasma Surface Engineering and its Practical Applications. // Edit. R. ei, Research Singpost. Publ. 2007.
15. Sobol' O.V., Pogrebnjak A.D., Beresnev V.M. Effect of the preparation conditions on phase composition, structure, and mechanical characteristics' of vacuum-arc Zr-Ti-Si-N coatings// The physics of metals and metallography, 2011. V. **112**. P. 199-206.
16. Погребняк А.Д., Соболев О.В., Береснев В.М. Особенности структурного состояния и механических свойств покрытий ZrN и Zr (Ti) -Si-N, полученных ионно-плазменными методами // Письма в ЖТФ, 2009. Т. **35**. С. 103-110.
17. Pogrebnjak A.D., Danilionok M.M., Drobyshevskaya A.A. Nanocomposite protective coatings based on Ti-N-Cr/Ni-Cr-B-Si-Fe, their structure and properties // Vacuum, 2009. V. **83**. P. 235-239.
18. Погребняк А.Д., Даниленок М.М., Дробышевская А.А. Исследование структуры и физико-химических свойств нанокompозитных комбинированных покрытий на основе Ti-N-Cr/Ni-Cr-B-Si-Fe // Изв. Вузов. Физика, 2009. Т. **12**. С. 61-68.
19. Uglov V.V., Anischik V.M., Zlotskij S.V., Abadias G., Dub. S.N. Structural and mechanical stability upon annealing of arc-deposited Ti-Zr-N coatings // Surf. and Coat. Tech. 2008. V. **202**. P. 2394-2398.
20. Pogrebnjak A.D., Sobol O.V. I, Beresnev V.M. Nanostructured Materials and Nanotechnology // IV: Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2010. V. **31**. № 7. P. 127-138.

21. Смитлз К. Дж Металлы: справ. Издан. Пер. с англ. 1980. С. 447.
22. Коротаев А.Д., Борисов В.Д., Мошков В.Ю. Упруго-напряженное состояние многоэлементных сверхтвердых покрытий // Физическая мезомеханика, 2009. Т. **12**. № 4. С. 79-91.
22. <http://www.iso.org>.
23. Андриевский Р.А., Калинин Г.В., Hellgren N., Sandstrom P., Штанский Д.В. Наноиндентирование и деформационные характеристики наноструктурных боридонитридных пленок // ФТТ, 2000. Т. **42**. № 9. Р. 1624.
24. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур // УФН, 2009. Т. **179**. № 4. С.337–358.
25. Погребняк А.Д., Пономарев А.Г., Шпак А.П., Куницкий Ю.А. Применение микро- и нанозондов для анализа малоразмерных 3D материалов, наносистем и нанообъектов // УФН, 2012. Т. **182**. № 3. С. 287–321.