

# **AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI**

*Əlyazması hüququnda*

## **KARBONİTRİD ƏSASLI BİRLƏŞMƏLƏRİN SƏTH MORFOLOGİYASI VƏ QURULUŞ XÜSUSİYYƏTLƏRİNƏ PROTON ŞÜALANMANIN TƏSİRİNİN TƏDQIQI**

İxtisas: 2225.01 – “Radiasiya materialşünaslığı”

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Kənan Məmmədbağır oğlu Həsənov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

### **AVTOREFERATI**

**BAKİ–2026**

Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu PHŞ-nin "Şüa qəbulediciləri və enerji çevrilmələri" laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir

Elmi rəhbər:

Fizika elmləri doktoru, dosent  
**Mətləb Nəbi oğlu Mirzəyev**

Rəsmi opponentlər

Fizika elmləri doktoru, professor  
**Adil Polad oğlu Abdullayev**

Fizika elmləri doktoru, professor  
**Əli Həsən oğlu Hüseynov**

Fizika elmləri doktoru, dosent  
**Fəmin Tahir oğlu Salmanov**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu PHŞ-nin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 1.14 Dissertasiya Şurası

Dissertasiya şurasının sədri:



Fizika elmləri doktoru, professor  
**Elçin Məmmədli oğlu Hüseynov**

Dissertasiya şurasının  
elmi katibi:



Elmi seminarın sədri:

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent  
**Günəl Tələt qızı İmanova**

Fizika –riyaziyyat elmləri doktoru,  
professor  
**Rəhim Səlim oğlu Mədətov**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi:** Son onillikdə texnoloji innovasiyaların sürətli yüksəlişi sənayedə yeni tip materialların hazırlanması və öyrənilməsinə geniş yol açmışdır. İstifadə olunan materiallar sinifindən metal karbid və nitrid, nano karbon birləşmələr və karbonitrid əsaslı kompozit nümunələr böyük maraq yaratmışdır. Kosmik və nüvə texnologiyalarında istifadə olunan materialların istismar müddətinin müxtəlif təsir faktorlarından asılı olaraq artırılması son illərin ən aktual problemlərindən biri hesab olunmaqdadır. TiN, ZrN, TiSiN, ZrSiN, ZrTiN, ZrNbN və ZrTiSiN materialların da daxil olduğu bir sıra nitrid əsaslı örtük materialları yüksək mexaniki və elastik xassələri, radiasiya və korroziyaya davamlılığı tədqiqatçıların marağına səbəb olmuşdur. Yüksək temperaturlarda termik dayanıqlığı və səth morfologiyasında minimum oksid təbəqəsinin formalaşmasına görə nitridlər geniş miqyasda sənayenin bütün sahələrdə uğurlu tədqiqat obyektinə çevrilmişdir.

Karbonitridlər əsasında hazırlanmış örtük materiallarının yüksək oksidləşmə müqavimətinə malik olması və temperatur faktorunun təsirindən asılı olaraq həmin birləşmələrin elektrik xüsusiyyətlərində unikal proseslər aşkar olunmuşdur. Materialların təbəqəli struktur şəklində alınması onların xassələrinin məqsədli idarə olunmasına böyük imkanlar yaratmışdır. Nüvə texnologiyalarında istifadə olunan qurğularda və müasir kosmik sənayenin inkişafında örtük materiallarına böyük tələb yaranmışdır. Örtük materiallar üzərində aparılan ion implantasiya təcrübələri göstərir ki, karbonitridlər yüksək radiasiya müqavimətinə görə bu sinifin ən perspektivli nümunəsidir. Materialı təşkil edən elementlərin elektron konsentrasiya xüsusiyyətlərinin nəzərə alınması və C:N nisbətinin tənzimlənməsi materialları müxtəlif tətbiqlər üçün qruplaşdırmaq mümkündür.

Müxtəlif enerjili proton ( $H^+$ ) və alfa ( $He^+$ ) şüalanmalar, ionlaşdırıcı xüsusiyyətlərə malik qamma mənbələr ilə karbonitridlərin radiasiyaya davamlılığının öyrənilməsi geniş tədqiq olunmamışdır. Fərqli şüalanma mənbələri karbonitrid örtük materiallarının səth morfologiyası və quruluş xüsusiyyətlərində baş verəcək dəyişiklikləri,

materialın şüalanma şərtlərində davranışı və istismar müddəti haqqında geniş məlumat verir. Karbonitrid materiallarının yüksək mexaniki və elastik xassələrini nəzərə alaraq yüksək enerjili proton şüalanmanın materialların mikrostruktur və quruluş xüsusiyyətlərində yarada biləcək dəyişikliklər dissertasiyanın elmi məqsədi və mövzusunun aktuallığı kimi qəbul edilmişdir.

Həmçinin təcrübi nəticələrin etibarlılığının qorunması məqsədi ilə NaCl mühitində materialların korroziya davamlılığı və elektrokimyəvi davranış xüsusiyyətləri öyrənilmişdir. Korroziya mühitində  $\text{Cl}^-$  anionları səth təbəqəsindən materialın həcminə diffuziyası və örtüyün qoruyucu xüsusiyyətlərinin ciddi şəkildə azalda bilir. Bütün bunları nəzərə alaraq karbonitrid örtüklərində elektrolitin daxil olması ilə örtük-elektrolit interfeyslərində  $\text{Cl}^-$  anionlarını bloklamaq mexanizminin öyrənilməsi mümkündür. Karbonitrid örtüklərində korroziya müqavimətinin artırılması məqsədi ilə sınaq məhlul, hədəf-altlıq arasındakı məsafə, tətbiq olunan hədəf güc və altlığın əyilmə gərginliyi və seçilmiş tərkib vacib parametrlər kimi qəbul olunur.

Dissertasiyanın aktuallığı üzrə qarşı qoyulmuş problemlərin həlli, çap olunmuş elmi əsərlər və beynəlxalq konfranslarda məruzə edilmiş materiallar göstərir ki, mövzu üzrə elmi tədqiqatın işlənmə dərəcəsi tam şəkildədir.

**Tədqiqatın obyektı və predmeti:** Tədqiqat obyektı kimi yüksək təmizlik dərəcəsinə malik TiNbCN (Ti-58.92 %, Nb-28.18 %, C-4.62 % və N-8.28 %), TiSiCN (Ti-63.02 %, Si-22.76 %, C-3.99 % və N-10.23 %), TiZrCN (Ti-61.37 %, Zr-26.35 %, C-3.85 % və N-9.49%), TiZrSiCN (Ti-38.92 %, Zr-27.11 %, Si-22.07 %, C-3.62 % və N-8.28 %) və TiZrNbCN (Ti-35.58 %, Zr-26.24 %, Nb-23.00 %, C-3.78 % və N-10.04 %) birləşmələri götürülmüşdür. Tədqiqatın predmeti kimi karbonitrid birləşmələrin səth morfologiyası və quruluş xüsusiyyətlərində proton şüalanma və kimyəvi korroziya nəticəsində baş verən dəyişikliklərin öyrənilməsidir.

**Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri:** Tədqiqat işinin məqsədi müxtəlif tərkibli karbonitrid materialların səth morfologiyası və quruluş xüsusiyyətlərinə fərqli enerjili proton şüalanmanın təsir qanunauyğunluqlarının müəyyən etmək və elektrokimyəvi korroziya

davranışlarının öyrənilməsindən ibarətdir. Tədqiqat işində qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıda qeyd olunmuş vəzifələrin həlli nəzərdə tutulmuşdur:

1.  $Ti_6Al_4V$  alıtlığı üzərində  $TiNbCN$ ,  $TiSiCN$ ,  $TiZrCN$ ,  $TiZrNbCN$  və  $TiZrSiCN$  örtük materiallarının alınması;
2. 1 MeV enerjili sürətli neytronlarla neytron aktivləşmənin tədqiqi;
3. Müxtəlif enerjili protonlarla şüalanmış örtük materiallarının struktur və səth morfologiyasında baş verən proseslərin öyrənilməsi;
4. Korroziya mühitində  $TiNbCN$ ,  $TiSiCN$ ,  $TiZrCN$ ,  $TiZrNbCN$  və  $TiZrSiCN$  örtük materiallarının struktur və səth morfologiyasının baş verən proseslərin öyrənilməsi;

**Tədqiqat metodları:** Müxtəlif tərkibli karbonitrid örtük materiallarının yüksək təmizlik dərəcəsi ilə maqnetron püskürməsi metodu ilə alınmış və Rigaku Smartlab difraksiya spektrometrində ( $Cu$ ,  $K_\alpha$  şüalanma ilə, 40 kV, 40 mA, dalğa uzunluğu 1.5405 Å, bucaq intervalı  $30^\circ < 2\theta < 80^\circ$  və  $3^\circ$  düşmə bucağında) kristallik strukturu, qəfəs parametrləri, simmetriyası tipi, səthdə formalaşan sərbəst fazalar və atomlar arasındakı məsafə otaq temperaturunda müəyyən edilmişdir.

Neytron aktivləşmə analizi ilə materiallar sürətli neytronlarla şüalanması yerinə yetirilmiş, neytronların materialı təşkil edən atomların nüvələri ilə qarşılıqlı təsir zamanı qamma şüalar buraxan qısa və uzun ömürlü radioaktiv izotopların yaranması tədqiq olunmuşdur. Enerji dispersiv X-ray spektroskopiyasında (EDS) nümunələrin element tərkibi müəyyən olunmuşdur. Skanedici elektron mikroskop ilə (SEM) materialın səth morfologiyası yüksək böyütmələrlə tədqiq edilmiş, səth topoqrafiyasının müəyyən edilmiş, səthdə mövcud hissəciklərin ölçü, paylanması və nümunələrinin kimyəvi tərkibi öyrənilmişdir.

15 və 200 keV, 1.2 və 2.0 MeV enerjili hidrogenin müsbət yüklü ( $H^+$ ) ionları ilə materialların şüalanması Beynəlxalq Hökumətlər Arası Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun Neytron fizikası laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir. ( $H^+$ ) ionları ilə şüalanma materialşünaslıq, nüvə fizikası, yarımkeçiricilər, kosmik

texnologiya, hidrogen energetikası, bioloji tədqiqatlarda və müxtəlif sahələrdə geniş istifadə olunmaqdadır. Materialların səth xüsusiyyətlərini dəyişdirən, səth defektlərinin və qaz qabarmalarının yaranması kimi mürəkkəb radiasiya prosesləri bu tip şüalanmanın təsirlərindən hesab olunur. Molekulyar Dinamika (MD) simulyasiya proqram paketi ilə müxtəlif şərtlərdə, fərqli proseslər zamanı atomların və molekulaların fiziki hərəkətlərini və qarşılıqlı təsirlərini öyrənmək üçün istifadə olunan hesablama üsuludur. Atomlar üçün kvant mexanikası səviyyəsində hərəkət tənlikləri həll olunmaqla MD simulyasiyası atom və molekulyar miqyasda sistemin dinamik davranışı haqqında məlumat verir. Molekulyar Dinamika simulyasiya texnikası radiasiya materialşünaslığı, biofizika, kimya və nanotexnologiya sahələrində yerinə yetirilən təcrübələrdə öyrənilməsi çətin və qeyri-mümkün olan hadisələrin araşdırmaq üçün geniş istifadə olunur. Materialların korroziya xüsusiyyətləri açıq dövrə potensial və potensiodinamik qütbləşmə metodu ilə genişləndirilmiş potensial diapazonunda materialın səthində aktiv və passiv davranışlar, səthin defredasiya potensialı və lokallaşmış korroziya, materialın səthinin nahamarlılığı öyrənilmişdir.

### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:**

1. C:N nisbətinin qiymətindən asılı olaraq TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrinin alınması, quruluş xüsusiyyətləri və səth morfologiyasının tədqiqi;
2. 1.0 MeV enerjili,  $1.65 \times 10^7$  n/(s·sm<sup>2</sup>) sel sıxlığına malik sürətli neytronlarla şüalanmış birləşmələrdə uzun ömürlü radioaktiv izotopların təyin edilməsi üçün neytron aktivləşmə analizinin (NAA) yerinə yetirilməsi;
3. Müxtəlif enerjili və sel sıxlığına malik proton (H<sup>+</sup>) şüalanmadan sonra materialların quruluş və səth morfologiyasında baş verən proseslərin öyrənilməsi;
4. Proton şüalanmanın təsiri altında birləşmələrin səthində qabarma, amorflaşma, iynə dəliklər və qabarmaların absorbsiya mexanizminin öyrənilməsi;
5. Molekulyar dinamika metodu ilə iynə dəliklər və qabarmaların formalaşma müddətinin təyini və temperaturun radial paylanma radiusunun təyini;

6. Korroziya mühitində birləşmələrin quruluş xüsusiyyətlərində baş verən proseslər, səth morfologiyasında yeni fazaların formalaşması və kristallik hissəciklərin paylanma prosesinin öyrənilməsi;

#### **Tədqiqatın elmi yeniliyi:**

1. Müəyyən olunmuşdur ki, 1.0 MeV enerjili sürətli neytronlarla şüalanmadan sonra tədqiqat nümunələrində qamma şüalanmaya malik uzun ömürlü radizotopların yaranması baş vermir;
2. Müxtəlif enerjili protonlarla şüalanmadan sonra karbonitrid birləşmələrin səth morfologiyasında qabarmaların formalaşması və absorbsiyası, kristallik quruluşda yüksək amorflaşma müəyyən edilməmişdir;
3. Molekulyar dinamika simulyasiyası ilə birləşmələrin səthində proton şüalanmadan sonra yaranan iynə dəliklər və materialın səthində temperaturun radial paylanma qiyməti və müddəti müəyyən olunmuşdur;
4. Elektrokimyəvi korroziya mühitinə davamlı və birləşmənin tərkibində C:N nisbətindən asılı olaraq ən dayanıqlı nümunə müəyyən olunmuşdur;
5. Korroziya mühitində birləşmənin kristal quruluşda formalaşan yeni fazaların da korroziyaya davamlı xüsusiyyətlər müəyyən olunmuşdur;

#### **Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:**

Dissertasiya işində alınmış nəticələrə əsasən C:N nisbətinin qiymətindən asılı olaraq sintez olunmuş karbonitrid örtük materialları yüksək enerjili proton ionlarının ilə şüalanmaya davamlıdır. Proton şüalanma materialın səthin müxtəlif istiqamətlərində xarakterik xəritələnmə formalaşdırır. Tətbiqi nöqtəyi nəzərdən materialların səthində formalaşan yeni struktur yüksək radiasiyaya davamlıdır, iynə dəliklər və qabarmaların ölçüsü minimumdur ki, (digər örtük materiallarda bu 120 nm başlayır) şüalanma mühütü olan yerlərdə materialın uzun müddət istifadəsinə imkanlar yaradır. Həmçinin qabarmaların absorbsiyası prosesi baş vermir yəni kiçik qabarmaların birləşərək böyük qabarmaya keçməsi müşahidə olunmur ki, buda materialda unikal proseslərdən hesab olunur. Əsas tətbiq sahəsi kimi

kosmik və peyk texnologiyasında, nüvə qurğularında və sənayenin müxtəlif sahələrində örtük materil kimi istifadəsi nəzərdə tutulur.

### **Aprobasiyası və tətbiqi:**

Dissertasiya işində əldə edilən elmi nəticələr tədqiqatın müxtəlif istiqamətlərinə uyğun şəkildə bir neçə beynəlxalq və yerli elmi tədbirlərdə təqdim olunmuş, elmi müzakirələrə çıxarılmışdır. Aparılan araşdırmaların nəticələri fərqli konfranslarda məruzə olunaraq, mütəxəssislər tərəfindən dəyərləndirilmişdir.

1. Hasanov K., Samadov O., Garibov R., Allahverdiyev Q., Mehdiyeva R., Mirzayev M. Investigating surface morphology and crystal structure of carbon nitride coatings // “Radiasiya təhlükəsizliyi problemləri: regional aspektlər” Akademik Mahmud Kərimovun anadan olmasının 75 illiyinə həsr olunmuş elmi-texniki konfrans. Naxçıvan, Azərbaycan: – 18–19 oktyabr, – 2023, – s. 70–71.
2. Hasanov K.M. Thermal oxidation resistance of carbon nitride coatings // X Всероссийский молодежный научный форум с международным участием «Open Science 2023». Петербургский институт ядерной физики им. Б.Р. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Гатчина, Россия: – 15–17 ноября, – 2023, – с. 58.
3. Hasanov K.M., Mirzayev M.N. Molecular dynamics simulation of the distribution mechanism of proton in the carbonitride structure // Молодежная школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2025). Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Роцино, Ленинградская область, Россия: – 24–28 марта, – 2025, – с. 133.

**Nəşrlər:** Dissertasiya işinin əsas məzmunu və elmi nəticələri xarici jurnallarda dərc olunmuş 5 məqalə və beynəlxalq elmi konfrans materiallarında çap edilmiş 2 tezisdə, eləcə də ölkə daxilində nəşr olunmuş 1 məqalə və 1 tezisdə öz əksini tapmışdır. Ümumilikdə, dissertasiya işinin əsas nəticələri 6 məqalə və 3 tezis olmaqla 9 elmi əsərdə dərc olunmuşdur.

**Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı:** Dissertasiya işində aparılan təcrübələr AR ETN Fizika İnstitutu PHŞ-də yerinə yetirilmişdir.

**Aparılan tədqiqatda iddiaçının şəxsi töhfəsi.** Dissertasiya işində iddiaçı ədəbiyyat mənbələrinin öyrənilməsi əsasında tədqiqat işlərinin aktuallığını əsaslandırılmış, tədqiqat metodlarının seçilməsi və onların elmi problemlərin həllində tətbiqini, tədqiqatın bütün mərhələlərində planlaşdırılmış təcrübələrin icrasını, əldə olunan nəticələrin sistemləşdirilməsini həyata keçirmişdir. Bununla yanaşı, təcrübi nəticələrinin təhlili, elmi konfranslarda işin müzakirəsi və əldə edilmiş nəticələr əsasında elmi məqalələrin hazırlanmasında iddiaçı fəal iştirak etmişdir.

**Dissertasiyanın quruluşu və həcmi.** **Dissertasiya işinin quruluşu və həcmi.** Dissertasiya işi giriş, dörd fəsil, nəticə, istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı və ixtisarlara daxil olmaqla 165 səhifəni əhatə edir. Əsas mətnin həcmi (şəkillər, cədvəllər və istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı çıxılmaqla) ümumilikdə 180385 işarə təşkil edir. Bu hissələrin işarə sayı aşağıdakı kimidir: Giriş – 21461, I fəsil – 50399, II fəsil – 25294, III fəsil – 48983, IV fəsil – 32005, nəticə – 2243. Tədqiqat işində 50 şəkil və 9 cədvəl təqdim edilmiş, həmçinin istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısında 185 adda mənbə yer almışdır.

## **İŞİN QISA MƏZMUNU**

**Girişdə** təqdim olunan dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi, həll olunması üçün qarşıya qoyulan əsas məsələlər, elmi yeniliklər, praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, tədqiqat obyektləri və metodları verilmişdir. Həmçinin girişdə dissertasiya işinin fəsilələri üzrə əsas məzmunu qısa şərh olunmuşdur.

**Birinci fəsildə** karbonitrid əsaslı materialların alınma üsulları, kristal quruluşu, korroziya xüsusiyyətləri və radiasiya təsiri altında baş verən struktur-morfoloji dəyişikliklər elmi ədəbiyyat əsasında ümumiləşdirilmişdir. Məhlul əsaslı sintez, karbotermal reduksiya, mexanokimyəvi emal, fiziki və kimyəvi buxar çökməsi, həmçinin katod qövs buxarlanması üsulları nəzərdən keçirilmişdir. Karbonitrid örtüklərin aqressiv mühitlərdə korroziya davranışı, passivləşdirici

təbəqələrin yaranması və səth dəyişiklikləri təhlil edilmişdir. Neytron, proton, ağır ion, helium və elektron şüalanmasının yaratdığı vakansiyalar, dislokasiya halqaları, qəfəs təhrifləri və lokal amorf sahələr araşdırılmışdır. Radiasiya dozası, ion enerjisi, temperatur və hissəcik ölçüsünün şüalanmaya davamlılığa təsiri müqayisəli şəkildə qiymətləndirilmişdir.

Beləliklə, birinci fəsildə karbonitridlərin alınması, quruluşu, korroziya davranışı və radiasiya təsirlərinə qarşı dayanıqlığı arasındakı əlaqələr ümumiləşdirilmişdir.

**İkinci fəsildə** karbonitrid əsaslı örtüklərin hazırlanma şəraiti, struktur və səth xüsusiyyətlərinin öyrənilməsində istifadə olunan eksperimental metodlar, korroziya sınaqlarının aparılma prinsipləri və proton şüalanmasının texniki xüsusiyyətləri ətraflı şəkildə təqdim edilmişdir. İlk növbədə  $Ti_6Al_4V$  ərintisi üzərində  $TiSiCN$ ,  $TiNbCN$ ,  $TiZrCN$ ,  $TiZrSiCN$  və  $TiZrNbCN$  örtüklərinin katod qövs çökdürmə üsulu ilə alınma metodikası təsvir edilmişdir.

Sintez olunmuş nümunələrin kristal quruluşunun, faza tərkibinin və qəfəs xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi üçün rentgen difraksiya üsulundan istifadə edilmişdir. Ölçmələr Rigaku SmartLab rentgen difraktometrində aparılmış, alınmış difraksiya məlumatları əsasında kristal fazalar, qəfəs parametrləri və struktur xüsusiyyətləri FullProf Suite proqram təminatı ilə qiymətləndirilmişdir.

Örtüklərin səth morfologiyası Hitachi 3030PLUS skanedicisi elektron mikroskopunda tədqiq edilmiş, SEM vasitəsilə səthin relyefi, hissəciklərin ölçü paylanması, morfoloji bircinslik və element tərkibi qiymətləndirilmişdir. Proton şüalanmasından sonra incə mikrostruktur xüsusiyyətləri Talos F200i keçirici elektron mikroskopunda HRTEM və STEM rejimlərində öyrənilmiş, EDS vasitəsilə kimyəvi tərkib müəyyən edilmişdir.

Fəsildə neytron selinin və onun energetik paylanması qiymətləndirilməsində istifadə olunan neytron aktivləşmə analizi metodunun əsasları da təqdim edilmişdir. Bu məqsədlə Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun Frank adına Neytron Fizikası

Laboratoriyasında fəaliyyət göstərən İBR-2 impuls reaktorunun iş prinsipi və şüalandırma kanallarının xüsusiyyətləri təsvir edilmişdir.<sup>1,2</sup>

Karbonitrid örtüklərin Korroziya davranışı açıq dövrə potensialı, xətti və potensiodinamik polyarizasiya, tsiklik polyarizasiya və Tafel üsulları ilə öyrənilmişdir. Səth nahamarlığı Dektak 150 ilə Ra, Rq və Sk parametrləri üzrə qiymətləndirilmişdir.

Proton şüalanması Frank adına Neytron Fizikası Laboratoriyasında yerləşən EG-5 elektrostatik sürətləndiricisində həyata keçirilmişdir. Qurğu yüksək enerji sabitliyi və idarə olunan ion seli ilə materialların radiasiya şəraitində davranışının öyrənilməsinə imkan verir.

**Üçüncü fəsildə** karbonitrid əsaslı örtüklərin kristal quruluşu, faza tərkibi, qəfəs parametrləri, tekstura xüsusiyyətləri və səth morfologiyasının korroziya təsiri altında dəyişmə qanunauyğunluqları müqayisəli şəkildə tədqiq edilmişdir. İlkin mərhələdə Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığının rentgen difraksiya spektri ayrıca analiz edilmiş və Rietveld analizi FullProf proqramı ilə aparılmışdır.

Altıq əsasən (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) və (201) istiqamətlərində indeksləşdirilmiş, titan fazasının (200) əks olunması zəif intensivliklə müşahidə edilmişdir. Əsas faza P<sub>63</sub>/mmc fəza qrupunda kristallaşan heksaqonal α-Ti fazası kimi müəyyən edilmiş, onun qəfəs parametrləri  $a = b = 2.93706 \text{ \AA}$  və  $c = 4.69061 \text{ \AA}$  olaraq hesablanmışdır.<sup>3</sup> Bununla yanaşı, nümunədə Im-3m fəza qrupuna aid β-Ti və cüzi miqdarda Fm-3m fəza qrupuna aid Fe fazalarının da mövcudluğu müəyyən edilmişdir. Güclü tekstura müşahidə edilmiş və üstün orientasiyanın {10-10} istiqamətində olduğu müəyyən edilmişdir. Tekstura  $P_h = G_2 + (1 - G_2) \exp(G_2 \alpha_2)$

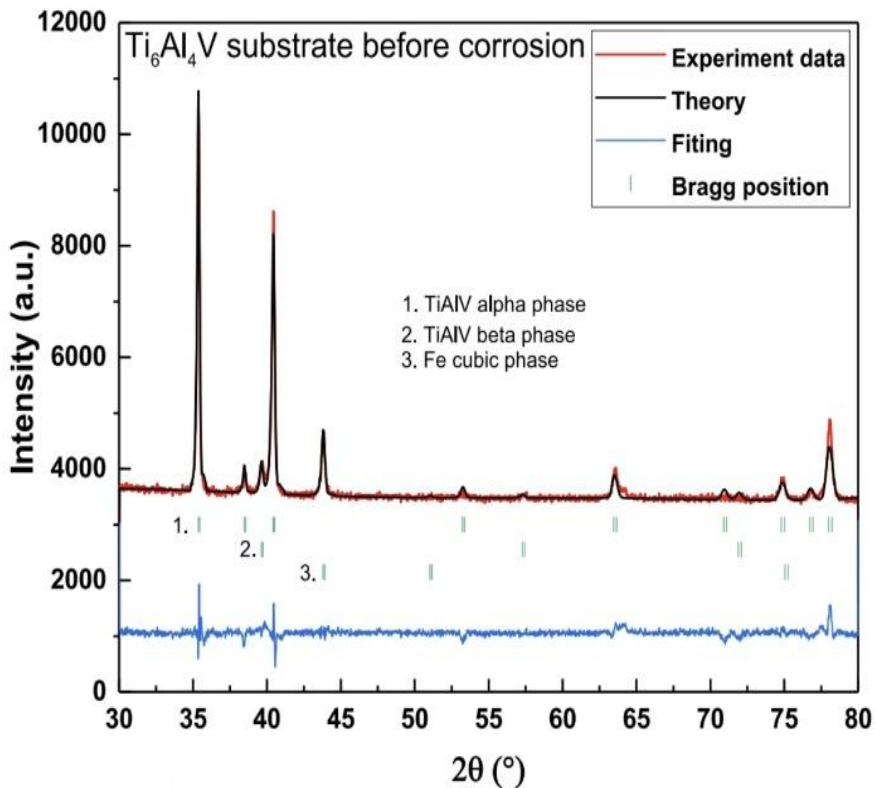
---

<sup>1</sup> Ananiev, V.D. Power startup of the İBR-2 reactor and the first physical studies of its beams / V.D. Ananiev, V.A. Arkhipov, A.I. Babaev // At. Énerg., – 1984. – 57. – p. 227–234.

<sup>2</sup> Aksenov, V.L. Pulsed fast reactors / V.L. Aksenov, A.E. Verkhoglyadov, M.M. Podlesnyy, E.P. Shabalin // *Natural Science Review*, – 2026. – 3(7). – p. 200709–200709.

<sup>3</sup> Maimaitiyili, T. Residual lattice strain and phase distribution in Ti-6Al-4V produced by electron beam melting / T. Maimaitiyili, R. Woracek, M. Neikter [et al.] // *Materials*, – 2019. – 12(4). – p. 667.

funksiyası ilə modelləşdirilmiş,  $G_2$  parametrinin 7-dən böyük olması yüksək tekstura dərəcəsini təsdiqləmişdir.



**Şəkil 1. Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığının otaq temperaturunda rentgen difraksiyası spektri və Rietveld analizi**

TiSiCN örtüyünün XRD nəticələri strukturda bir neçə fazanın difraksiya xətlərinin üst-üstə düşdüyünü göstərmişdir. 42.00°, 60.4° və 72° bucaqlarında Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığına aid intensiv piklər, 36° ətrafında isə genişlənmiş əks olunma qeydə alınmışdır. Örtükdə TiN tipli kubik quruluş formalaşmış və qəfəs parametri 4.31263 Å olmuşdur. Bu qiymətin 4.28 Å-dən yüksək olması qəfəs deformasiyası və C:N nisbətinin lokal dəyişməsi ilə əlaqələndirilmişdir. TiC və TiN eyni tip kristal simmetriyasına malik olduğundan TiC fazasının iştirakı da

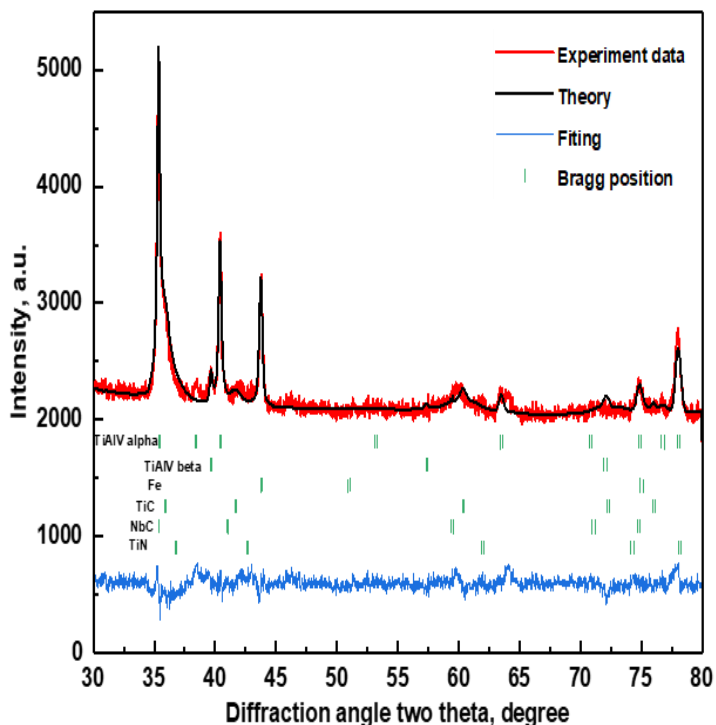
nəzərə alınmışdır.<sup>4</sup> (111) əks olunmasının genişliyinə Scherrer tənliyi tətbiq edilməklə {111} istiqamətində koherent difraksiya domenlərinin orta ölçüsü təxminən 10 nm olaraq qiymətləndirilmişdir.<sup>5</sup> Eyni zamanda, difraksiya intensivliklərinin paylanması bu nanokristallik domenlərin {111} istiqaməti üzrə güclü üstün orientasiyaya malik olduğunu göstərmişdir. FullProf proqramı ilə hesablanan eksponensial tekstura parametri 9.0 olmuşdur. C:N nisbəti 1.6 olan TiSiCN nümunəsində TiC fazasının üstünlüyü artmış və difraksiya pikləri kiçik bucaqlara doğru sürüşmüşdür. Korroziyadan sonra difraksiya intensivliklərində ümumi zəifləmə, xüsusilə 39.6° bucağında nəzərəcarpacaq azalma müşahidə edilmişdir. Bu əks olunma  $\beta$ -Ti (110) ilə üst-üstə düşsə də, TiO<sub>2</sub>-rutil fazasının (200) əks olunması ilə də əlaqələndirilmişdir.

TiNbCN örtüklərinin struktur analizi yüksək faza sabitliyi göstərmişdir. C:N nisbəti 0.6 olan TiNbCN nümunəsində TiC, NbC və TiN fazaları müəyyən edilmiş, NbC əsas faza kimi çıxış etmişdir. NbC üçün qəfəs parametri 4.33289 Å, qəfəs həcmi 81.3455 Å<sup>3</sup> olmuşdur. Korroziyadan sonra qəfəs parametrində 0.04%, qəfəs həcmində 0.12% artım müşahidə edilmiş, lakin faza keçidi qeydə alınmamışdır. C:N nisbəti 1.6 olan TiNbCN nümunəsində də NbC dominant faza olaraq qalmış, (111) müstəvisi üzrə indeksləşmiş və qəfəs parametri 4.40012 Å, qəfəs həcmi 85.19109 Å<sup>3</sup> təşkil etmişdir. Rietveld analizi NbC nanokristallarının qəfəs parametrlərinin və faza payının korroziyadan sonra dəyişmədiyini göstərmişdir.

---

<sup>4</sup> Xu, H. Tribological behavior of a TiSiCN coating tested in air and coolant / H. Xu, X. Nie, R. Wei // Surface and Coatings Technology, – 2006. – 201(7). – p. 4236–4241.

<sup>5</sup> Scherrer, P. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse / P. Scherrer // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, – 1918. – 2. – p. 98–100.

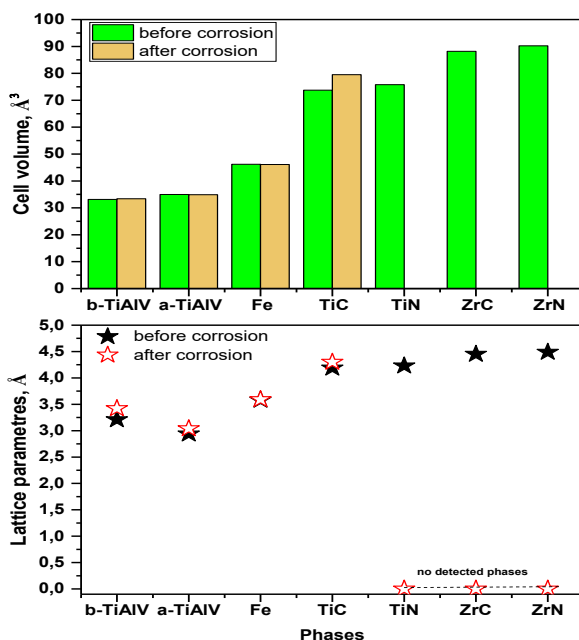


**Şəkil 2. TiNbCN birləşməsinin otaq temperaturunda rentgen difraksiyası spektri və Rietveld analizi**

C:N nisbəti 0.6 olan TiZrCN nümunəsində TiC, TiN, ZrC və ZrN olmaqla dörd əsas kubik faza müəyyən edilmişdir. Onların qəfəs sabitləri müvafiq olaraq 4.318 Å, 4.244 Å, 4.6828 Å və 4.5627 Å olmuşdur.<sup>6</sup> ZrC və ZrN üçün (111) istiqamətinə aid piklər  $2\theta=34.54^\circ/34.63^\circ$  və  $34.81^\circ/34.9^\circ$  bucaqlarında qeydə alınmış,  $36^\circ-37^\circ$  intervalındakı genişlənmə TiC və TiN fazalarının (111) əks olunmalarının üst-üstə düşməsi ilə əlaqələndirilmişdir.  $43^\circ$ ,  $62^\circ$  və  $74^\circ$  bucaqlarında TiC və TiN üçün (200), (220) və (311) xətləri müşahidə edilmişdir. Rietveld analizi ZrN-in 47%, TiN-in 28%, TiC-in 2.29%(0.17), ZrC-nin isə 3.51%(0.16) təşkil etdiyini göstərmişdir.

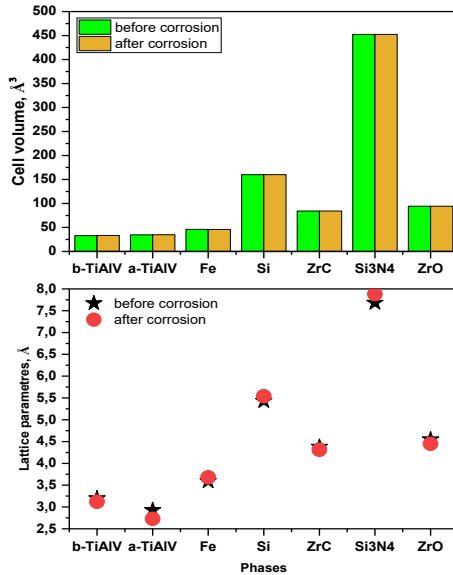
<sup>6</sup> Yang, M. Direct solid-state synthesis at high pressures of new mixed-metal oxynitrides:  $RZrO_2N$  ( $R = \text{Pr, Nd, and Sm}$ ) / M. Yang, J.A. Rodgers, L.C. Middledler [et al.] // Inorganic Chemistry, – 2009. – 48(24). – p. 11498–11500.

Korroziyadan sonra əsas fazaların payı azalmış, ZrN təqribən 11%, ZrC isə təqribən 4% səviyyəsində qalmışdır. ZrC fazasında təqribən 0.5%-lik sıxlıq artımı qeydə alınsa da, cihazın 3–5% standart xətası nəzərə alınaraq bu dəyişiklik ehtiyatla qiymətləndirilmişdir. C:N nisbəti 1.6 olan TiZrCN örtüyündə Rietveld analizi  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  alfa,  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  beta, sərbəst Fe, TiN, ZrN, ZrC və az miqdarda TiC olmaqla yeddi faza aşkar etmişdir. TiN, ZrN, ZrC və TiC üçün qəfəs parametrləri müvafiq olaraq 4.45108 Å, 4.48536 Å, 4.23194 Å və 4.19357 Å müəyyən edilmişdir. ZrC və ZrN üçün  $34.54^\circ/34.63^\circ$  və  $34.81^\circ/34.9^\circ$  bucaqlarında, TiC və TiN üçün isə  $36^\circ\text{--}37^\circ$  intervalında üst-üstə düşən əks olunmalar müşahidə edilmişdir. Korroziyadan sonra TiN, ZrC və ZrN fazaları artıq müşahidə edilməmiş, TiC isə müəyyən struktur sabitliyi göstərmişdir. TiC fazasının qəfəs həcminin 7.7% artması səthi gərginlik və örtük–altlıq qarşılıqlı təsiri ilə əlaqələndirilmişdir.



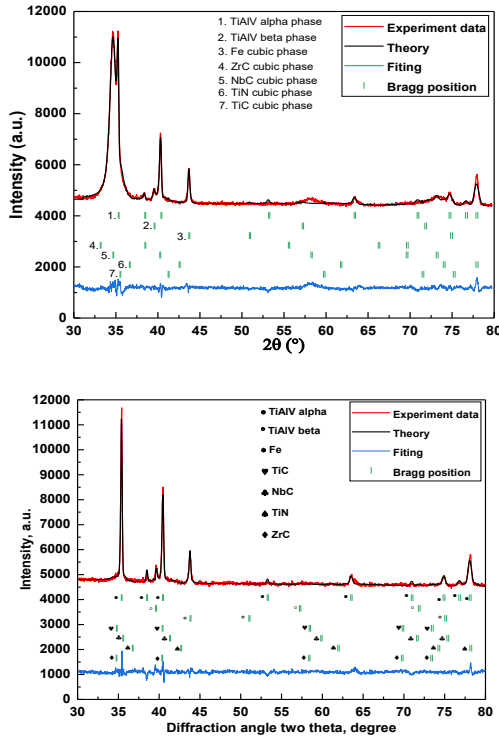
**Şəkil 3. C:N nisbəti 1.6 olan TiZrCN örtüyünün korroziyadan əvvəl və sonra struktur parametrlərinin müqayisəsi**

C:N nisbəti 0.6 olan TiZrSiCN sistemində Si əlavəsi nəticəsində struktur yenidənqurulmuş və ZrO, Si və Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kimi yeni fazalar formalaşmışdır. ZrO və Si-nin payı müvafiq olaraq təqribən 12.5% və 15% olmuş, digər fazalar üçün ZrC≈19%, TiC≈2% və Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>≈2.5% müəyyən edilmişdir. Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığının α-fazası təqribən 38%, β-fazası 9%, sərbəst Fe isə təqribən 2% təşkil etmişdir. Təqribən 58° bucağındakı geniş pik Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V β (200), ZrC (220), ZrO (220), Si (311), Si (222) və Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (422) əks olunmalarının üst-üstə düşməsi ilə izah edilmişdir. Korroziyadan sonra Si təqribən 10%, ZrO təqribən 1%, ZrC təqribən 3% və Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> təqribən 3% təşkil etmişdir. C:N nisbəti 1.6 olan TiZrSiCN nümunəsində faza payları 15.42% Si, 4.5% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 13.57% ZrO və 17.20% ZrC kimi müəyyən edilmiş, Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığının alfa fazası 38.21%, beta fazası 10.25%, sərbəst Fe isə 2.15% olmuşdur. Korroziyadan sonra Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alfa fazasının intensivliyində artım, Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V beta (200), ZrC (220), ZrO (220), Si (311), Si (222) və Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (422) istiqamətlərində isə azalma müşahidə edilmişdir. Bu nəticələr Si əlavəsinin TiZrCN sistemində faza tərkibini əhəmiyyətli şəkildə dəyişdirdiyini göstərmişdir.



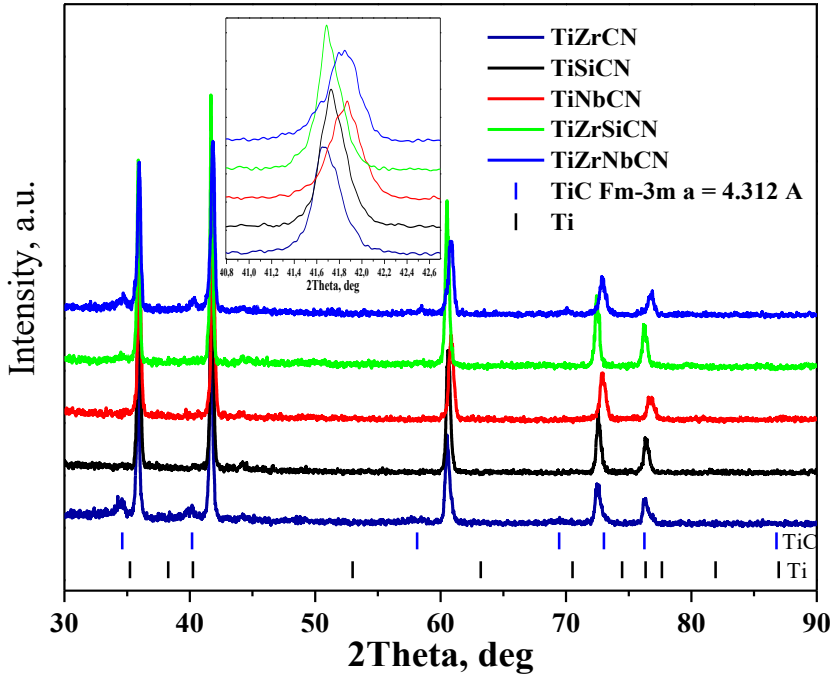
**Şəkil 4. C:N nisbəti 1.6 olan TiZrSiCN örtüyünün korroziyadan əvvəl və sonra struktur parametrlərinin müqayisəsi**

TiZrNbCN sistemində NbC fazasının üstünlüyü müəyyən edilmişdir. Rietveld analizinə əsasən NbC ümumi difraksiya spektrinin təqribən 97.5%-ni təşkil etmiş, qalan təqribən 2.5%-lik hissə Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığı, TiC, TiN və ZrC fazalarına aid olmuşdur. NbC qəfəs sabitində minimal azalma tekstura relaksasiyası ilə əlaqələndirilmişdir. Təqribən 58° bucağında əvvəlki çoxfazlı nümunələrlə müqayisədə daha zəif intensivlik qeydə alınmış və əsas töhfənin NbC (220) ilə Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V β-fazasından gəldiyi müəyyən edilmişdir. Korroziyadan sonra NbC fazasının miqdarı yalnız təqribən 0.5% azalmış və əsas struktur xüsusiyyətləri qorunmuşdur. NaCl-ə aid piklərin müşahidəsi isə elektrolit ionlarının səth qüsurlarına daxil ola bildiyini göstərmişdir.



**Şəkil 5. C:N nisbəti 1.6 olan TiZrNbCN örtüyünün korroziyadan əvvəl və sonra rentgen difraksiyası spektri**

1270 K temperaturda istilik işlənməsindən sonra karbonitrid örtüklərinin rentgen difraksiya spektrlərində piklərin əhəmiyyətli dərəcədə daraldığı müşahidə edilmişdir. Bu dəyişiklik kristal nizamlılığın dəyişməsi və qalıq gərginliklərin relaksasiyası ilə əlaqələndirilmişdir. SEM görüntülərində istilik işlənməsindən sonra örtüklərin səthində çatlar formalaşmışdır. Karbid-nitrid örtüklərlə  $Ti_6Al_4V$  altlığı arasındakı istilik genişlənmə fərqi soyuma zamanı qalıq gərginliklərin yaranmasına səbəb olmuşdur. Orta kristallit ölçüsü Scherrer tənliyi ilə (220) əks olunmasına əsasən  $\approx 5$  nm müəyyən edilmiş, xətt genişlənməsində yalnız Koşi komponenti nəzərə alındıqda və II tip qalıq gərginliklərin Qaus paylanmasına malik olduğu qəbul edildikdə isə kristallit ölçüsü  $\approx 8.3$  nm olmuşdur



**Şəkil 6.** İstilik işlənməsindən sonra TiZrCN, TiSiCN, TiNbCN, TiZrSiCN və TiZrNbCN örtüklərinin rentgen difraksiyası spektrləri

SEM tədqiqatları TiSiCN örtüklərində korroziyadan əvvəl müxtəlif diametrli mikrodamcıların mövcudluğunu göstərmişdir. TiSiCN örtüklərinin  $TiC_xN_y$  nanokristallarının  $SiC_xN_y/a-C$  amorf matrisi daxilində yerləşdiyi heterogen quruluşa malik olduğu müəyyən edilmişdir.<sup>7,8,9</sup> C:N nisbəti 1.6 olan TiSiCN nümunəsində azotun miqdarının aşağı olması amorf matrisin formalaşmasını zəiflətməmiş və daha həcmli mikrodamcıların yaranmasına şərait yaratmışdır. Azot çatışmazlığı sərbəst Ti sahələrinin və nəticədə  $TiO_2$  təbəqəsinin formalaşmasını da asanlaşdırmışdır. C:N nisbəti 0.6 olan TiSiCN nümunəsində daha yüksək azot tərkibi daha hamar səth morfologiyası ilə müşayiət olunmuşdur. Korroziyadan sonra əsas dəyişiklik mikro və makrohissəciklərin sayının azalması ilə məhdudlaşmışdır.

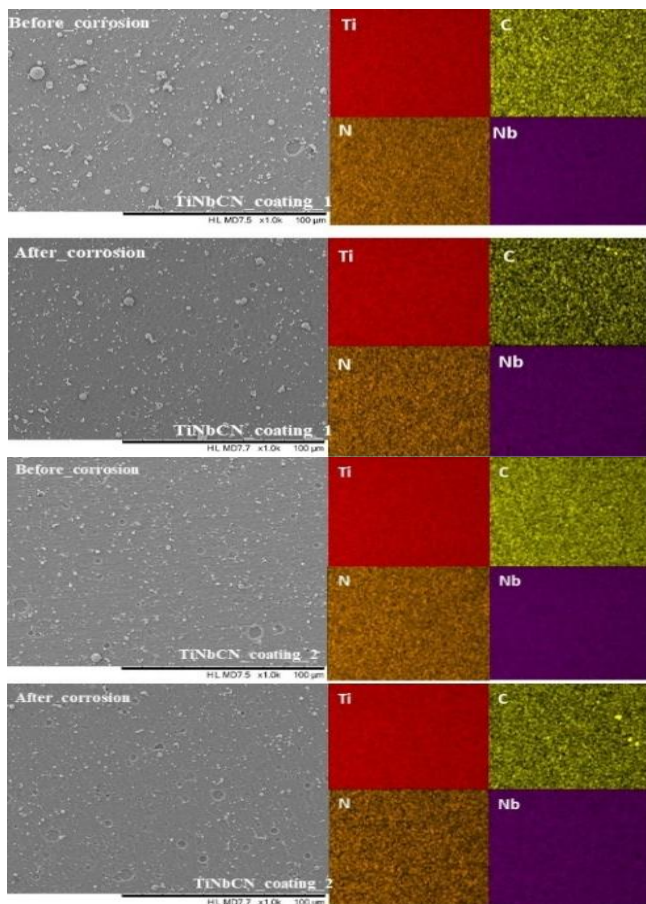
C:N nisbəti 0.6 olan TiNbCN örtüyünün səthində müxtəlif ölçülü kristallitlərin nizamsız paylanması müşahidə edilmiş, element xəritələnməsi Ti, Nb, C və N elementlərinin yüksək homogenliyini göstərmişdir. C:N nisbəti 1.6 olan TiNbCN nümunəsində oxşar morfologiya saxlanılsa da, nanoölçülü kristalların sayı C:N nisbəti 0.6 olan nümunə ilə müqayisədə daha az olmuşdur. Bununla belə, Ti, C, N və Nb elementlərinin səth üzrə homogen paylanması qorunmuşdur. Korroziyadan sonra TiNbCN sistemində həm səth morfologiyası, həm də element xəritələnməsi baxımından ciddi dəyişiklik qeydə alınmamışdır.

---

<sup>7</sup> Qiu, L. Microstructure, mechanical properties and cutting performances of TiSiCN super-hard nanocomposite coatings deposited using CVD method under the guidance of thermodynamic calculations / L. Qiu, Y. Du, L. Wu [et al.] // Surface and Coatings Technology, – 2019. – 378. – p. 124956.

<sup>8</sup> Qin, C.P. Cavitation erosion behavior of nanocomposite Ti–Si–C–N and Ti/Ti–Si–C–N coatings deposited on 2Cr13 stainless steel using a Plasma Enhanced Magnetron Sputtering process / C.P. Qin, Y.G. Zheng, R. Wei // Surface and Coatings Technology, – 2010. – 204(21–22). – p. 3530–3538.

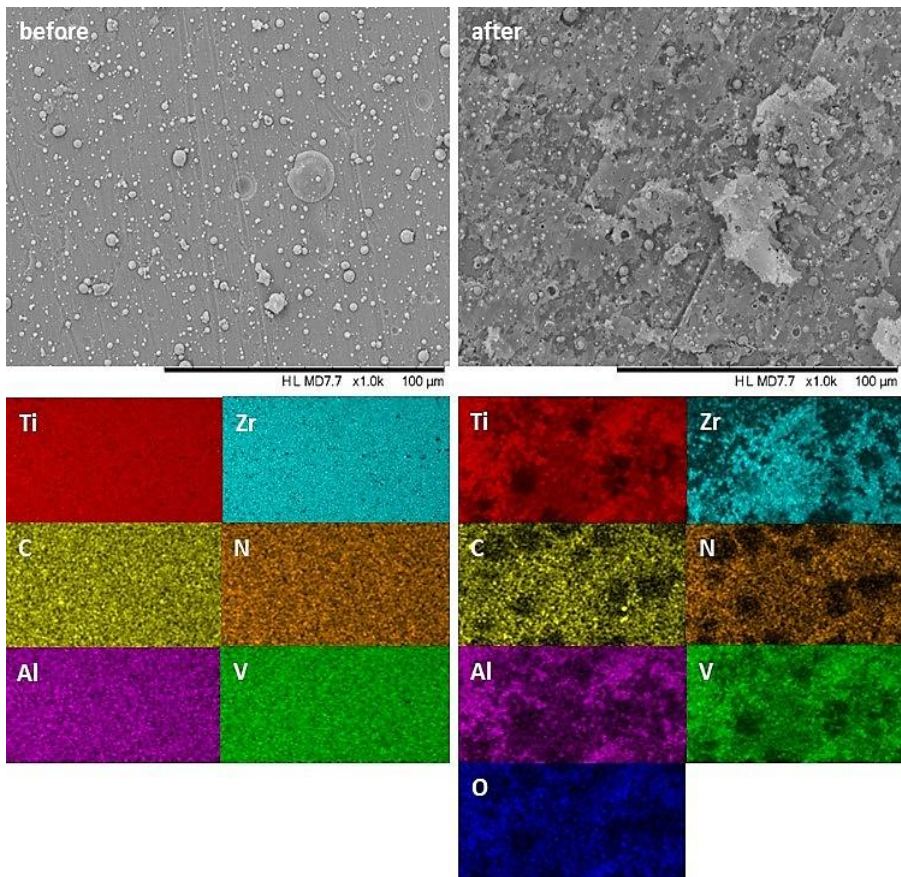
<sup>9</sup> Wang, H. Tribocorrosion behaviors of TiSiCN nanocomposite coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering / H. Wang, Y. Ou, X. Zhang [et al.] // Materials Research Express, – 2020. – 7(7). – p. 076407.



**Şəkil 7. TiNbCN-1 və TiNbCN-2 örtüklərinin korroziyadan əvvəl və sonra SEM təsvirləri və element xəritələmə profiləri.**

TiZrCN və TiZrSiCN örtüklərində korroziyadan sonra səth morfologiyasının daha nəzərəçarpacaq dəyişdiyi və elementlərin homogen paylanması zəiflədiyi müəyyən edilmişdir. C:N nisbəti 1.6 olan TiZrCN nümunəsinin korroziyadan əvvəlki səthi müxtəlif ölçülü kristallitlərin homogen paylanması ilə xarakterizə olunmuş, struktur analizində isə kubik TiN, ZrN, ZrC və TiC fazaları müəyyən edilmişdir. Korroziyadan sonra iri kristalların paylanması amorf xarakter almış, kiçik kristallar qismən saxlanılmışdır. Müqayisəli struktur analizi səthdə əsasən kubik ZrC və TiC fazalarının qaldığını

göstərmişdir. Element xəritələnməsində Ti, C, N, Al və V elementlərinin homogen paylanması müşahidə olunsada, Zr xəritəsində qeyri-homogen tünd sahələr yaranmışdır.



**Şəkil 8. TiZrCN-2 örtüyünün korroziyadan əvvəl və sonra SEM təsvirləri və element xəritələmə profilləri**

TiZrNbCN örtükləri həm struktur, həm də morfoloji baxımdan daha stabil davranmışdır. Korroziyadan sonra səthdə yalnız lokal dəyişikliklər müşahidə edilmiş, əsas fazaların payı və kristal quruluşu böyük ölçüdə qorunmuşdur. Eksperimental müqayisələr NaCl təsirində CNTi-(Zr) və CNTi-(ZrSi) örtüklərdə çat korroziyasının, CNTi-(ZrNb) səthində isə lokal korroziyanın baş verdiyini

göstərmişdir. Yalnız CNTi-(ZrSi) örtüyü NaCl mühitində oksid fazasının formalaşması ilə xarakterizə olunmuş, CNTi-(Zr) örtüklərdə qabarma və deqradasiyaya uğramış sahələr müşahidə edilmişdir.<sup>10,11</sup> CNTi-(ZrNb) örtüyü isə zəif oksidləşmə reaksiyası və aşağı korroziya sürəti nümayiş etdirmişdir.

Fəslin sonunda əldə edilmiş struktur, morfoloji və element tərkibi üzrə nəticələr ümumiləşdirilərək birgə təhlil edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, karbonitrid örtüklərin korroziya mühitində stabilliyi onların faza tərkibi, C:N nisbəti, kristal quruluşu və səth morfolojiyası ilə sıx əlaqəlidir. Xüsusilə TiNbCN örtüklərində korroziyadan sonra kristal quruluşun və səth xüsusiyyətlərinin əsasən qorunduğu müəyyən edilmişdir. Əldə olunan nəticələr karbonitrid əsaslı örtüklərin aqressiv mühitlərdə struktur dayanıqlığının qiymətləndirilməsi və perspektiv qoruyucu material kimi tətbiqi baxımından elmi əhəmiyyət daşıyır.

**Dördüncü fəsil**də müxtəlif enerjili protonlarla şüalandırılmış TiSiCN, TiNbCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrinin səth morfolojiyasında baş verən amorflaşma xüsusiyyətləri, qabarma və çuxurların formalaşma mexanizmləri, sürətli neytron mənbəyindən istifadə olunaraq strukturda yarana biləcək uzun və qısaömürlü radioizotopların analizi, səthdə mikro və nanoölçülü dəyişikliklər, dislokasiyaların yaranması və kristal qəfəsdə lokal amorflaşma halları öyrənilmişdir. Materialın şüalanmaya davamlılığının öyrənilməsi və ionlaşdırıcı şüalanmanın təsir mexanizminin müəyyən edilməsi üçün kristal quruluşda yaranan defektlərin konsentrasiyası mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Neytron şüalanma prosesi zamanı qamma şüaları yüksək təmizliyə malik germanium detektorunda təyin olunmuşdur. Neytron spektrləri neytron aktivasiya üçün istifadə olunan standart nümunələrdən əldə edilmiş, bu məqsədlə nikel (Ni) izotoplarından

---

<sup>10</sup> Shu, Y. Synergistic effect of NaCl and water vapor on the corrosion of 1Cr-11Ni-2W-2Mo-V steel at 500–700 °C / Y. Shu, F. Wang, W. Wu // *Oxidation of Metals*, – 1999. – 51(1). – p. 97–110.

<sup>11</sup> Sankara Narayanan, T.S.N. Strategies to improve the corrosion resistance of microarc oxidation (MAO) coated magnesium alloys for degradable implants: Prospects and challenges / T.S.N. Sankara Narayanan, I.S. Park, M.H. Lee // *Progress in Materials Science*, – 2014. – 60(1). – p. 1–71.

istifadə olunmuşdur. Prosesin sonunda qamma-aktivləşmiş  $^{58}\text{Co}$  radioizotopunu sürətli neytron selinin sıxlığının hesablanmasına tətbiq edilmişdir. Nikel izotopunun seçilməsində əsas məqsəd onun 1 MeV enerjiden başlayaraq neytronlara qarşı başlanğıc tutma en kəsiyinə malik olmasıdır. Neytron axın sıxlığının qiymətləndirilməsi üçün  $\sigma_{\text{eff}}=92$  mb effektiv en kəsiyindən istifadə edilmiş, həmçinin ölçmə naqilindəki  $^{60}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$  nisbəti və baş verən reaksiyaların en kəsiyi inteqralı nəzərə alınmışdır. Nümunələrin şüalanmasından sonra alınan neytron aktivləşmə piklərinin qamma spektrində 810.7 keV enerjide müşahidə olunan udulma pikinin  $^{58}\text{Co}$  radioizotopuna uyğun gəldiyi müəyyən edilmişdir.<sup>12</sup> Qamma spektrometrində təyin olunmuş aktivliyə əsasən hər bir nümunə üçün sürətli neytron selinin sıxlığı hesablanmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, sürətli neytron selinin sıxlığı  $1.65 \times 10^7$  n/(sm<sup>2</sup>×san), ümumi neytron selinin sıxlığı isə  $1.71 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup> təşkil edir

#### Cədvəl 1.

**Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V altlığı üzərində hazırlanmış karbonitrid nümunələrinin neytron aktivləşmə azalizi üçün neytron selinin sıxlığı.**

| Nümunələr                                               | İntensivlik, n/(sm <sup>2</sup> × san) | Sel sıxlığı, n/sm <sup>2</sup> |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|
| TiSiCN, Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V altlığı ilə   | $1.65 \times 10^7$                     | $1.71 \times 10^{13}$          |
| TiZrSiCN, Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V altlığı ilə | $1.65 \times 10^7$                     | $1.71 \times 10^{13}$          |
| TiZrCN, Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V altlığı ilə   | $1.65 \times 10^7$                     | $1.71 \times 10^{13}$          |
| TiZrNbCN, Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V altlığı ilə | $1.65 \times 10^7$                     | $1.71 \times 10^{13}$          |
| TiNbCN, Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V altlığı ilə   | $1.65 \times 10^7$                     | $1.71 \times 10^{13}$          |

Bu qiymətlər TiSiCN, TiZrSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiNbCN nümunələri üçün eyni olmuşdur. Sürətli neytron şüalanmasından sonra nümunələr nəzərəcarpacaq aktivlik göstərməmişdir. Si, Zr və Nb əlavəli nümunələr üzərində aparılan

<sup>12</sup> Barry, J.F. The cross section of the  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  reaction for neutrons in the energy range 1.6 to 14.7 MeV / J.F. Barry // Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology, – 1962. – 16(10). – p. 467–472.

neytron aktivasiya analizi göstərmişdir ki, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN örtükləri  $E > 1$  MeV enerjili neytronlarla şüalanmaya məruz qaldıqdan sonra qısaömürlü radioaktiv izotopların yaranmasına səbəb olmamışdır.

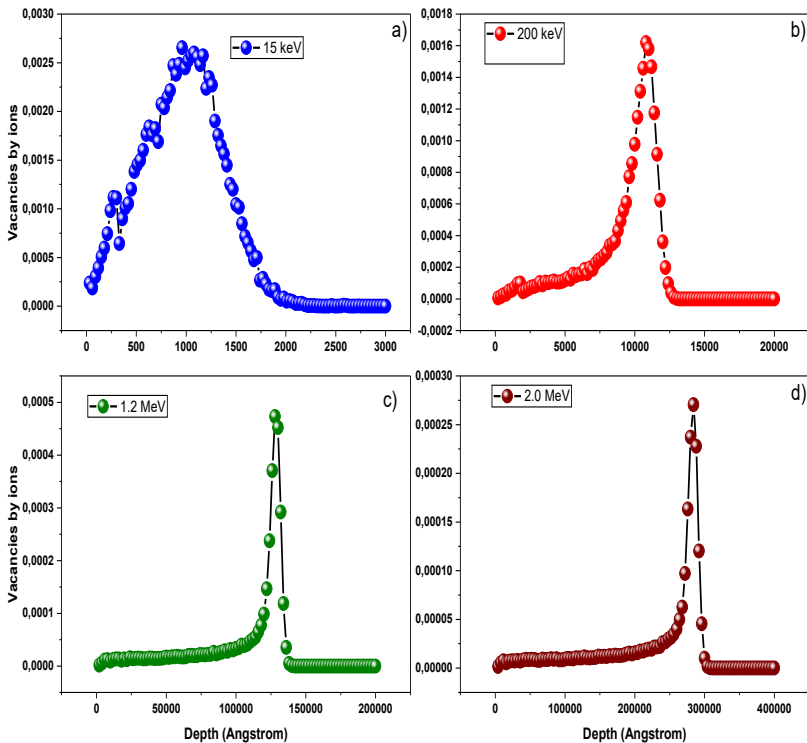
15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerjili protonlarla otaq temperaturunda şüalandırılmış TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrində  $H^+$  ionlarının paylanmasını və enerji itkisini xarakterizə edən DPA və SRIM riyazi model hesablamaları aparılmışdır.<sup>13</sup> Proton şüalanma sınaqları elektrostatik sürətləndirici EG-5 qurğusunda yüksək vakuum şəraitində həyata keçirilmişdir. Struktur tədqiqatlarında nümunələr 15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerjili protonlarla  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalandırılmışdır. Morfoloji tədqiqatlarda isə 2.0 MeV enerjili protonlar üçün  $1.0 \times 10^{15}$ ,  $1.0 \times 10^{16}$  və  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlıqlarının təsiri müqayisəli şəkildə öyrənilmişdir.

Şəkil 9-da TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələri üçün vakansiya və SRIM analizinin nəticələri göstərilmişdir.  $H^+$  ionlarının orta kinetik enerjisi və nümunənin dərinlik profili üzrə elektron tormozlanma hesablamaları SRIM nəticələrində təqdim edilmişdir. Aşağı və yüksək enerjili proton hissəcikləri ilə şüalanmış örtük materiallarında vakansiya və sərbəst həcmələri yaranması müxtəlif radiasiya təsirlərinə səbəb olmuş, kristal strukturda ionların paylanması müəyyən edilmişdir. Örtük materialının sıxlığından və üzərinə düşən protonların enerjisindən asılı olaraq mikrostrukturda yerdəyişmiş atomların formalaşması və kristal qəfəsin koordinat yerdəyişməsi yeni sərbəst həcmələri yaranmasına gətirib çıxarmışdır. İonun enerjisindən asılı olaraq maksimum nüfuz etmə dərinliyi doza piki kimi qəbul olunmuşdur. TiCN materialının sıxlığının 5.08–6.0 q/sm<sup>3</sup> intervalında dəyişdiyi, bəzi mənbələrdə isə dəqiq tərkibi və kimyəvi formasından asılı olaraq 6.00–6.8 q/sm<sup>3</sup> intervalında olduğu göstərilmişdir. 15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerjili  $H^+$  ionlarının TiNbCN, TiSiCN,

---

<sup>13</sup> Ziegler, J.F. SRIM—The stopping and range of ions in matter (2010) / J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, – 2010. – 268(11–12). – p. 1818–1823.

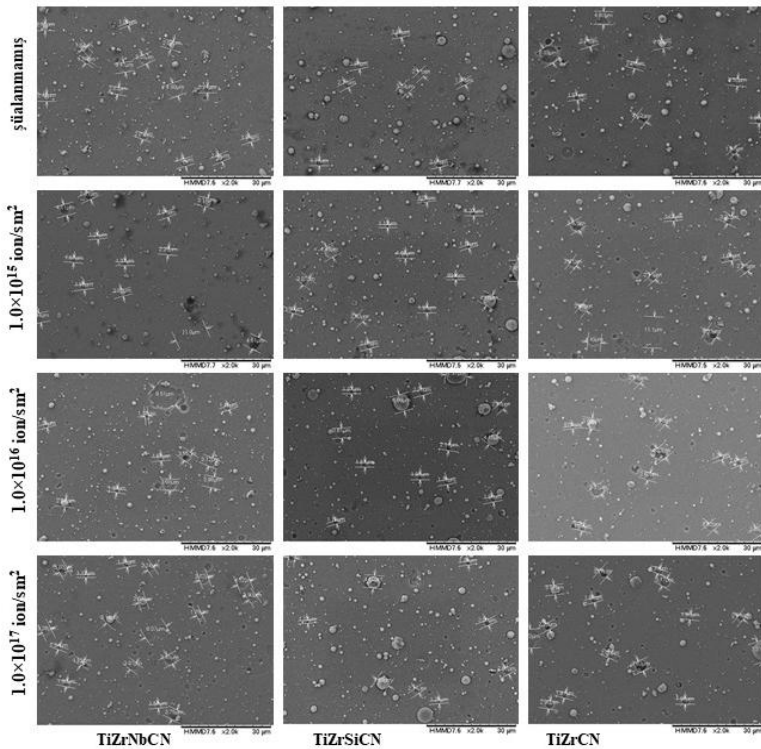
TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrində SRIM analizləri nüfuz etmə dərinliyinin 100 nm ilə 28 mkm intervalında dəyişdiyini göstərmişdir. Riyazi modelləşdirmə əsasında proton ionlarının karbonitrid nümunələrində maksimum təxminən 20 mkm dərinliyə qədər paylana bildiyi müəyyən edilmişdir. 15 və 200 keV enerjili ionların materiala nüfuz etmə dərinliyi təxminən 150 nm ətrafında olmuş, proton enerjisinin 1.2 və 2.0 MeV intervalına keçməsi ilə nüfuz etmə dərinliyinin mkm səviyyəsinə qədər artdığı müəyyən edilmişdir.



**Şəkil 9. Karbonitrid birləşmələrində 15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerjili H<sup>+</sup> ionlarının yaratdığı vakansiya və nüfuz etmə dərinliyi.**

Şəkil 10-da TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrinin şüalanmamış və 2.0 MeV enerjiyə malik protonlarla  $1.0 \times 10^{15}$ ,  $1.0 \times 10^{16}$  və  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlıqlarında şüalanmadan sonrakı səth morfolojiyalari təqdim edilmişdir.

Protonların enerji və sel sıxlığından asılı olaraq səthdə genişmiqyaslı kristaldan amorf hala keçid və həcmli qabarmaların əmələ gəlməsi müşahidə edilməmişdir. Karbonitrid örtüklər proton şüalanmasından sonra həm mikro, həm də nanoölçülü təbəqədə əsasən sabit səth morfologiyası nümayiş etdirmişdir. Bununla belə, şüalanmanın təsiri nəticəsində bəzi mikro və makroölçülü kristalvari hissəciklərdə lokal amorflaşma qeydə alınmışdır. Səthdə paylanma heterogen olmuş, karbon quruluşu aktiv qarşılıqlı təsir göstərən, lakin zəif əlaqələndirilmiş struktur kimi qiymətləndirilmişdir. Bütün tədqiq olunan səthlərdə mövcud mikro və makroölçülü hissəciklərin çökdürmə prosesi zamanı formalaşdığı və defekt mərkəzləri kimi çıxış etdiyi müəyyən edilmişdir.



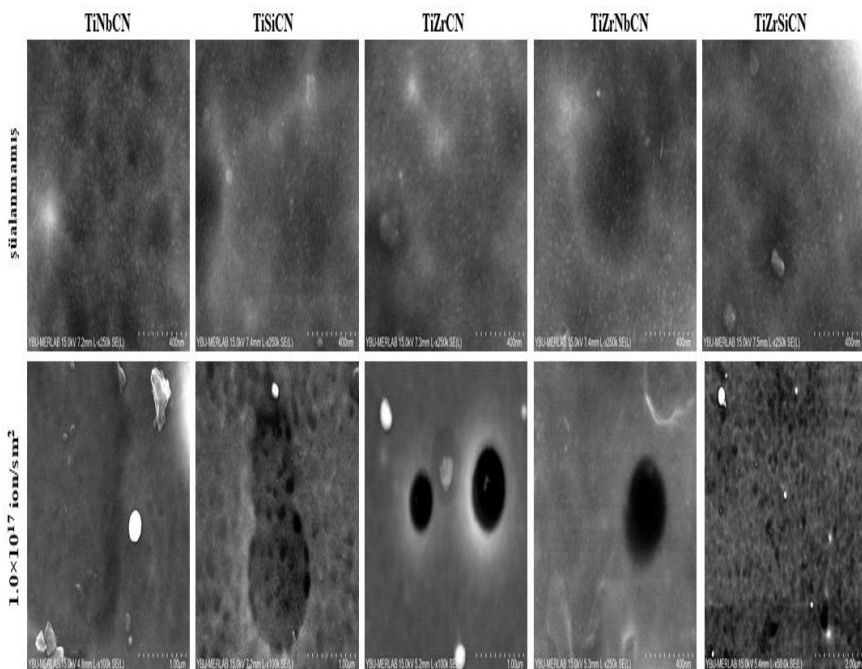
**Şəkil 10. 2.0 MeV enerjili protonlarla  $1.0 \times 10^{15}$  ion/sm<sup>2</sup>,  $1.0 \times 10^{16}$  ion/sm<sup>2</sup> və  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> intensivlikdə şüalanmış TiZrNbCN, TiZrSiCN, və TiZrCN birləşmələrinin səth morfologiyası.**

2.0 MeV enerjili  $H^+$  ionlarının təsiri ilə TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrinin səthində baş verən proses və dəyişmələr yüksək ayırdetmə qabiliyyətinə malik TEM cihazında öyrənilmişdir. Müxtəlif enerjili proton ionlarının örtüklərin səthində yaratdığı qabarma və çuxur effektlərinin öyrənilməsi radiasiya davamlılığı baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır.<sup>14</sup> Proton şüalanmasından əvvəl mikrodamcıların ölçüləri bütün örtüklər üçün oxşar olmuş, Si və Nb əlavəsinin bu ölçülərə təsir göstərmədiyini müəyyən edilmişdir. Şüalanmadan sonra ölçülərdə cüzi artım müşahidə olunmuş, lakin bu dəyişiklik araşdırılan sahədən asılı olduğuna görə əhəmiyyətli hesab edilməmişdir.

Şəkil 11-də şüalanmamış TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrinin və 2.0 MeV enerjili proton  $H^+$  ionları ilə fərqli sel sıxlıqlarında, yəni  $1.0 \times 10^{15}$ ,  $1.0 \times 10^{16}$  və  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> qiymətlərində şüalanmadan sonra 400 nm ölçüdə morfolojiyaları göstərilmişdir. Müqayisəli təsvirlər örtüklərin yüksək enerjili proton təsirinə qarşı ümumi morfoloji stabilliyini göstərmişdir. Proton şüalanmasından sonra karbonitridlərin səthində qabarmalar və qabarmaların “adsorbsiya” mexanizmi müşahidə olunmamış, proton ionlarının təsiri ilə altlıq ilə təbəqə arasında “qabarmaların qarşılıqlı keçid effektləri” baş verməmişdir. Bununla yanaşı, səthdə homogen paylanmış 3–25 nm ölçülü iynə dəşiklərin formalaşması aydın seçilmişdir.

---

<sup>14</sup> Badrutdinov, A. In situ observations of blistering of a metal irradiated with 2-MeV protons / A. Badrutdinov, T. Bykov, S. Gromilov [et al.] // Metals, – 2017. – 7(12). – p. 558.



**Şəkil 11. Şüalanmamış və 2.0 MeV enerjili protonlarla  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> intensivlikdə şüalanmış TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrinin səth morfologiyası.**

Enerjisi keV tərtibində olan ionlarda nüfuzetmə dərinliyi təxminən 100 nm ətrafında dəyişdiyi halda, enerjinin MeV diapazonuna yüksəlməsi ilə nüfuzetmə dərinliyinin mkm səviyyəsinə qədər artdığı müşahidə olunmuşdur. keV miqyasından MeV enerji diapazonuna keçdikdə səthdə iynə dəliklərin sayının artması qeydə alınmışdır. Müxtəlif istiqamətlərdə dislokasiyaların yaranması və atom təbəqələrinin kristal qəfəsə perpendikulyar istiqamətdə hərəkəti nadir hallarda müşahidə olunmuşdur. Örtüklərin səth morfologiyasında Frank halqalarının formalaşması quruluş daxilində yeni atom təbəqələrinin yaranması ilə əlaqələndirilmişdir. H<sup>+</sup> ionlarının sürətli ağır ionlarla müqayisədə material atomları ilə qarşılıqlı təsir prinsipi fərqli olsa da, strukturda yaranan sərbəst həcm

və defekt klasterlərinin dəyişmə mexanizmlərinin oxşar xarakter daşdığı göstərilmişdir.

TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələri  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  altlığı üzərində kubik NaCl-tipli karbonitrid matrisində formalaşmış və başlanğıc vəziyyətdə FCC quruluş üçün səciyyəvi olan (111), (200) və (220) istiqamətlərinin üstünlüyü müşahidə edilmişdir. Altlıq piklərinin örtük pikləri ilə qismən üst-üstə düşməsi səbəbindən başlanğıc difraktoqramların analizində altlığın payının ayrıca nəzərə alınması vacib olmuşdur. Pik nisbətlərinin təsadüfi toz nümunəsinə görə cüzi fərqlənməsi örtüklərdə teksturanın mövcudluğunu göstərmişdir. 15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerjili protonlarla  $1.0 \times 10^{17}$  ion/sm<sup>2</sup> sel sıxlığında şüalanmadan sonra aparılan struktur analizləri aşağı enerjili protonların materialın struktur parametrlərində nəzərəcarpacaq dəyişiklik yaratmadığını göstərmişdir. Proton enerjisi artdıqca strukturda yalnız cüzi və monoton dəyişikliklər baş vermişdir. Bu dəyişikliklər kristal qəfəsdə uzaq nizamlılığı pozmadan zəif elastik relaksasiya ilə əlaqələndirilmişdir. Şüalanmadan sonra örtüklərin heç birində yeni fazaların formalaşması və ya faza keçidləri müşahidə olunmamış, bütün örtüklər kubik NaCl-tipli karbonitrid matrisini qorumuşdur.

**Cədvəl 2.**

**15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerji protonlarla şüalanmış TiSiCN, TiNbCN, TiZrCN, TiZrSiCN və TiZrNbCN birləşmələrinin qəfəs parametrlərinin dəyişməsi.**

| Tədqiqat nümunələr | H <sup>+</sup> ionlarının enerjisi | Şüalanmadan əvvəl və sonra qəfəs parametrləri, Å |         | Şüalanmadan əvvəl və sonra qəfəsin həcmi, Å <sup>3</sup> |           |
|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------|-----------|
| TiSiCN             | 15 keV                             | 4.33289                                          | 4.33289 | 81.34550                                                 | 81.34550  |
|                    | 200 keV                            | 4.33289                                          | 4.33294 | 81.34550                                                 | 81.34578  |
|                    | 1.2 MeV                            | 4.33289                                          | 4.33322 | 81.34550                                                 | 81.34596  |
|                    | 2.0 MeV                            | 4.33289                                          | 4.33363 | 81.34550                                                 | 81.34614  |
| TiNbCN             | 15 keV                             | 4.33289                                          | 4.33289 | 81.34550                                                 | 81.34550  |
|                    | 200 keV                            | 4.33289                                          | 4.33294 | 81.34550                                                 | 81.34578  |
|                    | 1.2 MeV                            | 4.33289                                          | 4.33322 | 81.34550                                                 | 81.34596  |
|                    | 2.0 MeV                            | 4.33289                                          | 4.33363 | 81.34550                                                 | 81.34614  |
| TiZrCN             | 15 keV                             | 4.45521                                          | 4.45521 | 88.43130                                                 | 88.43130  |
|                    | 200 keV                            | 4.45521                                          | 4.45528 | 88.43130                                                 | 88.43146  |
|                    | 1.2 MeV                            | 4.45521                                          | 4.45573 | 88.43130                                                 | 88.43171  |
|                    | 2.0 MeV                            | 4.45521                                          | 4.45612 | 88.43130                                                 | 88.43223  |
| TiZrSiCN           | 15 keV                             | 4.29398                                          | 4.29398 | 79.17368                                                 | 79.17368  |
|                    | 200 keV                            | 4.29398                                          | 4.29403 | 79.17368                                                 | 79.17379  |
|                    | 1.2 MeV                            | 4.29398                                          | 4.29431 | 79.17368                                                 | 79.17403  |
|                    | 2.0 MeV                            | 4.29398                                          | 4.29489 | 79.17368                                                 | 79.17437  |
| TiZrNbCN           | 15 keV                             | 4.67704                                          | 4.67704 | 102.30899                                                | 102.30899 |
|                    | 200 keV                            | 4.67704                                          | 4.67712 | 102.30899                                                | 102.30907 |
|                    | 1.2 MeV                            | 4.67704                                          | 4.67745 | 102.30899                                                | 102.30933 |
|                    | 2.0 MeV                            | 4.67704                                          | 4.67812 | 102.30899                                                | 102.30975 |

Beləliklə, 15 keV, 200 keV, 1.2 MeV və 2.0 MeV enerjili protonlarla aparılan şüalanmalar karbonitrid örtüklərin əsas kristal quruluşunda ciddi dəyişiklik yaratmamışdır. Proton enerjisinin artması ilə nüfuz etmə dərinliyi nm-dən mkm səviyyəsinə keçmiş,

lokal vakansiyalar, dislokasiyalar və defekt mərkəzləri yaranmış, səthdə 3–25 nm ölçülü iynə dəşiklər formalaşmışdır. Bununla yanaşı, genişmiqyaslı amorflaşma, faza keçidi və qabarma prosesləri müşahidə edilməmişdir. Neytron aktivləşmə nəticələri qısaömrürlü radioaktiv izotopların yaranmadığını, morfoloji tədqiqatlar isə TiNbCN örtüyünün yüksək enerjili proton şüalanmasından sonra daha davamlı struktur nümayiş etdirdiyini göstərmişdir

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Müəyyən edilmişdir ki, titan əsaslı karbonitridlərinin mikrostrukturunda C:N nisbətinin qiymətindən asılı olaraq hazırlanmış birləşmələr həmin nisbətə 1.6 qiymətində yüksək korroziya davamlılığına malik səth morfolojiyasına malikdir. Materialların səthindəki elektrokimyəvi proseslər nəticəsində örtüklərin səthində passiv təbəqələrin formalaşması baş verir. Stoxiometriyadan asılı olaraq bütün birləşmələr üstün elektrokimyəvi xüsusiyyətlərə, aşağı tutum göstəricilərinə, yüksək məsamə müqavimət, aşağı cərəyan sıxlığı və yüksək polyarizasiya müqavimətinə malikdir. C:N nisbətinin 1.6 qiymətində TiNbCN birləşməsi korroziyadan sonra ən kiçik kristal dəyişmələrinə malik nümunədir.
2. Birləşmələrin səthində korroziyadan sonra amorflaşma prosesi kiçik miqyasda baş verməsinə baxmayaraq səthin müxtəlif istiqamətlərində 100-350 nm ölçüdə lokal degradasiya zonaların formalaşmasına səbəb olmuşdur. Səth morfolojiyasının analizlərində müəyyən olunmuşdur ki, C:N nisbətinin 0.6 qiymətində kimyəvi korroziyadan sonra lokal degradasiyalar, C:N nisbətinin 1.6 qiymətində isə lokal degradasiyalar “çuxur” strukturlarla əvəz olunmuşdur.
3. Müəyyən olunmuşdur ki, 1 MeV enerjili sürətli neytronlarla selinin sıxlığı  $1.65 \times 10^7$  n/(sm<sup>2</sup>×san), ümumi neytron selinin sıxlığı  $1.71 \times 10^{13}$  n/sm<sup>2</sup> aktivləşmə analizi aparıldıqdan sonra TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN nümunələrində uzun ömürlü radioizotoplar müşahidə olunmamışdır.

4. Müxtəlif enerjili proton ionları ilə şüalandırılmış birləşmələri səth morfologiyasında şüalanmadan sonra kristal fazadan amorf fazaya keçid müşahidə olunmur. Həmçinin kiçik enerjili proton ionları ilə səthdə müxtəlif ölçülü iynəvari strukturların əmələ gəlməsi müşahidə olunmur. Yüksək enerjili proton şüalanmasından sonra materialın səthində müxtəlif istiqamətlər üzrə dislokasiyalar, təbəqələşmiş kristal struktur, səth morfologiyasında nano ölçülü Frank halqaları formalaşmışdır. Birləşmələrdən TiNbCN kristal quruluş və səth morfologiyasında minimum kiçik təsir müşahidə olunmuş və səthin morfoloji homogenliyi saxlanılmışdır.
5. 2.0 MeV enerjili  $H^+$  ionların təsiri ilə TiNbCN, TiSiCN, TiZrCN, TiZrNbCN və TiZrSiCN birləşmələrin səth morfologiyasında FCC quruluş üçün səciyyəvi olan (111), (200) və (220) istiqamətlərinin saxlanması müşahidə olunmuşdur. Müəyyən olunmuşdur ki, birləşmələr üçün seçilmiş şüalanmadan öncə və sonra qəfəs parametrləri və qəfəsin həcmnin dəyişməsi müşahidə olunmur və həmin örtük materiallarının kosmik və nüvə texnologiyalarında uğurla tətbiq oluna bilər.

## DISSERTASIYA MÖVZUSU ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ ELMİ İŞLƏR

1. Mirzayev M.N., Parau A.C., Slavov L., Dinu M., Neov D., Slavkova Z., Popov E.P., Belova M., Hasanov K., Aliyev F.A., Vladescu A. TiSiCN as coatings resistant to corrosion and neutron activation // *Materials*, – 2023, 16(5), – p. 1835.
2. Vladescu A., Mirzayev M.N., Abiyev A.S., Asadov A.G., Demir E., Hasanov K.M., Isayev R.S., Doroshkevich A.S., Jabarov S.H., Lyubchyk Sv., Lyubchyk S., Popov E.P. Effect of Si and Nb additions on carbonitride coatings under proton irradiation: A comprehensive analysis of structural, mechanical, corrosion, and neutron activation properties // *Nuclear Materials and Energy*, – 2023, 35, – p. 101457.
3. Hasanov K., Samadov O., Garibov R., Allahverdiyev Q., Mehdiyeva R., Mirzayev M. Investigating surface morphology and crystal structure of carbon nitride coatings // “Radiasiya təhlükəsizliyi problemləri: regional aspektlər” Akademik Mahmud Kərimovun anadan olmasının 75 illiyinə həsr olunmuş elmi-texniki konfrans. Naxçıvan, Azərbaycan: – 18–19 oktyabr, – 2023, – s. 70–71.
4. Hasanov K.M. Thermal oxidation resistance of carbon nitride coatings // X Всероссийский молодежный научный форум с международным участием «Open Science 2023». Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Гатчина, Россия: – 15–17 ноября, – 2023, – с. 58.
5. Mirzayev M.N., Hasanov K.M., Parau A.C., Demir E., Abiyev A.S., Karaman T., Jabarov S.H., Dinu M., Popov E.P., Vladescu A. Effect of the C/N ratio modification on the corrosion behavior and performance of carbonitride coatings prepared by cathodic arc deposition // *Journal of Materials Research and Technology*, – 2023, 27, – p. 1724–1738.

6. Hasanov K.M., Mustafayev I.I., Samedov O.A., Mehdiyeva R.N. Heat flow rate function and thermophysical properties of TiNbCN coating materials // Journal of Radiation Researches, – 2024, 11(1), – p. 33–39.
7. Mirzayev M.N., Imanova G.T., Neov D., Rasoul M., Bekpulatov I.R., Khallokov F.K., Popov E.P., Hasanov K., Isayeva S., Mauey B., Mirzayeva D.M., Tatarard F., Dinu M., Kaminski G., Vladescu A. (Dragomir). Surface evaluation of carbonitride coating materials at high temperature: An investigation of oxygen adsorption on crystal surfaces by molecular dynamics simulation // Journal of Porous Materials, – 2024, 31(4), – p. 1531–1539.
8. Hasanov K.M., Mirzayev M.N. Molecular dynamics simulation of the distribution mechanism of proton in the carbonitride structure // Молодежная школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2025). Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Рошино, Ленинградская область, Россия: – 24–28 марта, – 2025, – с. 133.
9. Mirzayev M., Imanova G., Jabarov S., Hasanov K., Abiyev A., Dinu M., Popov E., Samadov S., Kurmanaliyev Z., Vladescu A. (Dragomir). Development of TiNbCN coatings via cathodic arc evaporation for industrial use // Materials Today Communications, – 2025, 44, – p. 111872.



Dissertasiyanın müdafiəsi 28 oktyabr 2026-  
ci il tarixdə, saat 11:00 -da Azərbaycan Respublikasının Elm və  
Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu PHŞ-nin nəzdində fəaliyyət  
göstərən FD 1.14 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1073, Bakı ş., H.Cavid pr., 131.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil  
Nazirliyinin Fizika İnstitutu PHŞ-nin elmi kitabxanasında tanış olmaq  
mümkündür

Avtoreferatın elektron versiyası Azərbaycan Respublikasının Elm və  
Təhsil Nazirliyinin Fizika İnstitutu PHŞ-nin rəsmi internet saytında  
yerləşdirilmişdir

Avtoreferat «23» sentyabr 2026-ci il tarixində zəruri  
ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 11.09.2026

Kağızın formatı: A5

Həcm: 39 710

Tiraj: 100