ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME -10

# DEVELOPMENT OF SCIENCE

## scientific journal



# Development of science

## Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 10

ISSN 3030 -3907

*Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.*

**BOSH MUHARRIR:**
***Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.***
**TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:**
***Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor***
***TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI***

**TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Bozorov G‘ayrat Rashidovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Abdurahmonov Olim Rustamovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Adizov Bobur Zamirovich***
*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor*
***Hayitov Ruslan Rustamjonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Jumayev Qayum Karimovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Berdiyev Dorob Murodovich***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Maxmudov Rafiq Amonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Tilloyev Lochin Ismatilloyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Raxmonov Qahramon Sanakulovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Barakayev Nusratullo Rajabovich***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Panoyev Erali Rajabboyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Ataullayev Sherzod Nabiullyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Murodov Malik Negmurodovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Axmedova Ozoda Bahronovna***
*Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.*
***Safarov Bahri Jumayevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Xaydarov Axtam Amonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Safarov Jasur Alijon o‘g‘li***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*

**KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Axmedov Voxid Nizomovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Umarov Baqo Bafoyevich***
*Buxoro Davlat Universiteti, professor*
***Kodirov Abduaxad Abduraximovich***
*Qarshi davlat Universiteti, professor*
***Qurbonov Mingniqul Jumagulovich***
*Qarshi davlat Universiteti, dotsent*
***Turemuratov Sharibay Naurizbaevich***
*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor*
***Tursunov Kaxor Shonazarovich***
*Qarshi davlat Universiteti, professor*
***Do‘stov Hamro***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor*
***Panoyev Nodir Shavkatovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Kasimov Sherzod Abduazimovich***
*Termiz Davlat Universiteti, professor.*
***Aliqulov Rustam Valiyevich***
*Termiz Davlat Universiteti, professor*
***Tropov Xamza Tursunovich***
*Samarqand Davlat Universiteti, professor*

**IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Nizamov Aslitdin Badreddinovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Boboyev Akmal Choriyevich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor*
***Saidaxmedova Nodira Ilxomovna***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor*
***Muxsinov Bekzod Toxirovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Shakarov Qulmat Ashirovich***
*Renessans ta'lim universiteti,dotsent.*
***Jumaeva Zulfiya Qayumovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Norova Salomat Yusupovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Jalilov Jamshid G‘anijonovich***
*Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent*
***Xasanova Gulruh Djumanazarovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*

**PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**

***Siddiqova Sadoqat G‘afforovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Zoyirov Erkin Xalilovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor*
***Gaffarov Feruz Hasanovich***
Puchon Universiteti, *professor*
***Ruziyev Davron Yuldashevich***
*Buxoro Davlat Universiteti, professor*
***Muradova Firuza Rashidovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Yunusova Gulandon Samiyevna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***To‘xtayeva Zebo Sharifovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.*
***Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Uzoqova Laylo Polvonovna***
*Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.*
***To‘raqulova Marjona Qiyom qizi***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Muradova Zarina Rashidovna***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Murodov Sanjar Aslonovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.*
***Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich***
*Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent*
***Gaffarov Laziz Hasanovich***
*Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.*

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.


ISSN 3030-3907

**Development of science** ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.


ISSN 3030-3907

# GETEROSTRUKTURALI QOPLAMALARNING ELASTIK MODULI VA YOPISHQOQLIGI O‘RTASIDAGI KORRELYATSIYA

**Xojimatov Umidbek Turg‘unboy o‘g‘li**
*Stajyor o‘qituvchi, "Materialshunoslik" kafedrasi, Andijon davlat texnika instituti, Andijon, O‘zbekiston*
*E-mail: umidbekkhojimatov@gmail.com*

**Annotatsiya.** Mazkur maqolada PVD usuli bilan po‘lat asoslarga yotqizilgan 12 ta turli geterostrukturali qoplama (monoqatlam, ikkiqatlam, ko‘pqatlamli va nanolaminat tizimlar) tahlil qilingan, ularning elastik moduli E (nanoindentirlash usuli, GOST R 8.748-2011) va kritik adgeziya yuklamasi $Lc_2$ (skratch-test, ASTM C1624-05) aniqlangan. Tahlil shuni ko‘rsatdiki, E va $Lc_2$ o‘rtasida kuchli manfiy chiziqli bog‘liqlik mavjud (Pearson $r = –0,963$, $p < 0,001$), bu mikrostrukturaning monoqatlamdan nanolaminatga o‘tishi bilan kuzatiladi: monoqatlamlar uchun E = 390–425 GPa, $Lc_2$ = 30–35 N; nanolaminatlar uchun E = 308–335 GPa, $Lc_2$ = 64–72 N.

**Kalit so‘zlar:** geterostrukturali qoplama; PVD; nanolaminat; ko‘pqatlamli qoplama; elastik moduli; adgeziya; skratch-test; kritik yuklama; nanoindentirlash; korrelyatsion tahlil.

**Аннотация.** В настоящей статье проанализированы 12 различных гетероструктурных покрытий, нанесённых методом PVD на стальные подложки (моно-, двухслойные, многослойные и нанослоистые системы), определены их модуль упругости E (метод наноиндентирования, ГОСТ Р 8.748-2011) и критическая нагрузка отслоения $Lc_2$ (скретч-тест, ASTM C1624-05). Установлено, что между E и $Lc_2$ существует сильная отрицательная линейная корреляция (Pearson $r = –0,963$, $p < 0,001$), которая отражает переход микроструктуры от монослоя к наноламинату: для монослойных покрытий E = 390–425 ГПа и $Lc_2$ = 30–35 Н, для нанослоистых - E = 308–335 ГПа и $Lc_2$ = 64–72 Н.

**Ключевые слова:** гетероструктурное покрытие; PVD; наноламинат; многослойное покрытие; модуль упругости; адгезия; скретч-тест; критическая нагрузка; наноиндентирование; корреляционный анализ.

**Abstract.** This article analyzes 12 different heterostructured coatings deposited by PVD on steel substrates (monolayer, bilayer, multilayer, and nanolaminate systems), and determines their elastic modulus E (nanoindentation, GOST R 8.748-2011) and critical delamination load $Lc_2$ (scratch test, ASTM C1624-05). It was established that a strong negative linear correlation exists between E and $Lc_2$ (Pearson $r = –0.963$, $p < 0.001$), reflecting the microstructural transition from monolayer to nanolaminate: monolayer coatings exhibit E = 390–425 GPa and


ISSN 3030-3907

$Lc_2$ = 30–35 N, whereas nanolaminate coatings show E = 308–335 GPa and $Lc_2$ = 64–72 N.

**Keywords:** heterostructured coating; PVD; nanolaminate; multilayer coating; elastic modulus; adhesion; scratch test; critical load; nanoindentation; correlation analysis.

## 1. KIRISH.

Zamonaviy mashinasozlikning rivojlanish darajasi ko‘p jihatdan ish o‘qlari yuzasiga yotqizilgan qattiq qoplamalarning xossalari bilan belgilanadi. Kesuvchi asbob, qolip va ekstruder, hatto turbinaning kuraklari ham ishlash muhitida kuchli mexanik, kimyoviy va termik yuklamalarga duch keladi. PVD (Physical Vapor Deposition) va PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) usullari bilan yotqiziladigan o‘tish metallarining nitridlari va karbonitridlari - TiN, CrN, TiAlN, TiCN, CrAlN - bu sohada keng tarqalgan yechimlardir [1, 2].

Qoplamalar ishlashi uchun ikki asosiy talab birgalikda bajarilishi kerak: yetarli mexanik mustahkamlik (qattiqlik, elastik moduli, eyilishbardoshlik) va asos bilan yuqori adgeziya. Ushbu ikki talab orasidagi muvozanat amalda har doim ham ta'minlanavermaydi: yuqori qattiq qoplamalar ko‘pincha mo‘rtdir va asos bilan zaif yopishqoqlikka ega; aksincha, yumshoqroq qoplamalar yaxshi adgeziya namoyon qiladi, lekin eyilishbardoshligi past bo‘ladi [3].

Bu muammoning yechimi sifatida so‘nggi yillarda geterostrukturali (ko‘pqatlamli, gradient, nanolaminat) qoplamalar ishlab chiqilmoqda. Bunday qoplamalarda turli kimyoviy tarkibga ega ingichka qatlamlar bir-biriga ketma-ket joylashtiriladi, natijada makroskopik darajada qattiqlik saqlangan holda mikroskopik darajada elastik moslashish va energiyani yutish mexanizmlari shakllanadi. Nanolaminat tuzilishlari (qatlam qalinligi 5–20 nm) ayniqsa istiqbolli bo‘lib, ular Hall-Petch effekti va qatlamlararo chegaralarda dislokatsiyalarning to‘xtatilishi tufayli mexanik xossalarini va adgeziyani bir vaqtning o‘zida oshiradi [4, 5].

Shu bilan birga, geterostrukturali qoplamalarning mexanik xossalari va adgeziyasi o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni miqdoriy aniqlash hozirgi paytda yetarlicha o‘rganilmagan. Klassik adgeziya nazariyalari (Lichinchi, Bull, Holmberg modellari) elastik moduli (E), qattiqlik (H) va asos bilan o‘zaro bog‘lanish kuchining hisobini taqdim etadi, ammo turli geterostrukturalar uchun ushbu munosabatlar empirik tarzda tasdiqlanishi zarur [6]. Bu yo‘nalishdagi tadqiqotlar nafaqat ilmiy, balki amaliy ahamiyatga ham ega: agar E va adgeziya o‘rtasida aniq korrelyatsiya o‘rnatilsa, ishlab chiqarishda qoplama sifatini nazorat qilish va loyihalashning samarali vositasi yaratilishi mumkin.

Mazkur ishning maqsadi - PVD usulida tayyorlangan 12 ta turli arxitektura va tarkibga ega geterostrukturali qoplama uchun elastik moduli (E) va kritik


ISSN 3030-3907

adgeziya yuklamasi ($Lc_2$) qiymatlari orasidagi bog‘liqlikni aniqlash va miqdoriy tahlil qilish. Vazifalar: (1) PVD usulida turli arxitekturadagi qoplamalarni (monoqatlam, ikkiqatlam, ko‘pqatlamli, nanolaminat) tayyorlash; (2) nanoindentirlash usuli bilan E qiymatini aniqlash; (3) skratch-test usulida $Lc_2$ ni o‘lchash; (4) E va $Lc_2$ o‘rtasida statistik korrelyatsiya tahlilini bajarish va olingan natijalarni amaliy qo‘llanilish nuqtai nazaridan sharhlash.

## 2. TADQIQOT METODOLOGIYASI.

### 2.1. Qoplamalarni yotqizish

Tajribalar 12-X18N10T markasidagi austenit po‘lat asoslar (40×20×3 mm) ustiga olib borildi. Yotqizishdan oldin asoslar etanolda va asetonda ultrasonik tozalashdan o‘tkazildi, so‘ng PVD kamerasi ichida Ar+ ionlarining 15 minutlik ionli tozalashiga duchor qilindi. Qoplamalar magnetron-sputter (DC va RF) hamda katod yoyi (cathodic arc) usullari yordamida Hauzer FlexiCoat 850 universal qurilmasida tayyorlandi. Yotqizish parametrlari: po‘lat haroratisi 350±10 °C, ish gazlari aralashmasi Ar + $N_2$ (oqim nisbati 3:1), umumiy bosim 0,5 Pa, asosga bias kuchlanishi –50 V. Qoplama qalinligi 2,8–3,2 mkm orasida saqlandi.

Tajriba uchun to‘rt sinfdagi 12 ta turli arxitekturali qoplama tayyorlandi (1-jadval): monoqatlamlar (TiN, CrAlN, TiAlN), ikkiqatlamli (TiN/CrN, TiAlN/CrN, TiCN/TiN), ko‘pqatlamli 10–20 ta qatlamli (TiAlN/CrN, TiN/CrN, TiAlN/AlN) va nanolaminat (TiAlN/CrAlN, TiN/AlN, CrN/AlN). Nanolaminatlarda qatlam qalinligi 8–12 nm orasida, qatlamlar soni 150–180 ta.

**1-jadval.**

**Tadqiq etilgan geterostrukturali qoplamalar tizimi va arxitekturasi**

| № | Qoplama tizimi | Arxitektura | Qalinligi, mkm | Qatlamlar soni |
|---|---|---|---|---|
| 1 | TiN | Monoqatlam | 3,0 | 1 |
| 2 | CrAlN | Monoqatlam | 2,9 | 1 |
| 3 | TiAlN | Monoqatlam | 3,1 | 1 |
| 4 | TiN/CrN | Ikkiqatlam | 3,0 | 2 |
| 5 | TiAlN/CrN | Ikkiqatlam | 2,9 | 2 |
| 6 | TiCN/TiN | Ikkiqatlam | 3,1 | 2 |
| 7 | TiAlN/CrN | Ko‘pqatlamli (10) | 3,0 | 10 |
| 8 | TiN/CrN | Ko‘pqatlamli (15) | 3,0 | 15 |


ISSN 3030-3907

| № | Qoplama tizimi | Arxitektura | Qalinligi, mkm | Qatlamlar soni |
|---|---|---|---|---|
| 9 | TiAlN/AlN | Ko‘pqatlamli (20) | 3,1 | 20 |
| 10 | TiAlN/CrAlN | Nanolaminat | 2,8 | ≈150 |
| 11 | TiN/AlN | Nanolaminat | 3,0 | ≈170 |
| 12 | CrN/AlN | Nanolaminat | 3,2 | ≈180 |

**2.2. Xarakteristika usullari**

Elastik moduli (E) Anton Paar TTX-NHT² nanoindentirlash qurilmasida Berkovich pirsasi yordamida aniqlandi (GOST R 8.748-2011 va ISO 14577-1:2015 standartlariga muvofiq). Yuklash rejimi: maksimal yuklama 5 mN, yuklash tezligi 10 mN/min, ushlash vaqti 5 s, tushirish tezligi 10 mN/min. Har bir namuna uchun 16 ta indentirlash o‘tkazildi, ortacha qiymat va standart og‘ish hisoblandi. E qiymati Oliver-Pharr modeli asosida hisoblandi.

Adgeziya kritik yuklamasi ($Lc_2$ - qoplamaning ko‘p qismi asosdan to‘liq ajralib chiqishi nuqtasi) skratch-test usulida CSM Revetest qurilmasida ASTM C1624-05 standartiga muvofiq aniqlandi. Olmosli Rockwell C pirsasi (radius 200 mkm), yuklash tezligi 100 N/min, skrotsh chizig‘i uzunligi 5 mm. Har bir namuna uchun 3 ta skratch chizig‘i amalga oshirildi; $Lc_2$ yuklamasi optik mikroskop ostida vizual va aktiv akustik emissiya signali asosida aniqlandi.

Qoplama strukturasi va qalinligi skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM, JEOL JSM-7500F) va rentgen difraktometriyasi (XRD, Bruker D8 Discover, Cu Kα nurlanishi, $\lambda$ = 0,15406 nm) usullari bilan tasdiqlandi. Nanolaminat qoplamalarda qatlamlar struktura davriyligini tasdiqlash uchun yuqori aniqlikdagi transmission elektron mikroskopiyasi (HRTEM) qo‘llanildi.

**2.3. Statistik tahlil**

E va $Lc_2$ qiymatlari o‘rtasidagi munosabat parametrik Pearson korrelyatsiya koeffitsienti yordamida baholandi. Chiziqli regressiya tenglamasi koeffitsientlari eng kichik kvadratlar usulida hisoblandi. Korrelyatsiyaning statistik signifikantligi t-mezon yordamida tekshirildi (signifikantlik darajasi $\alpha$ = 0,05). Statistik ishlov Python 3.11 (SciPy 1.11) muhitida amalga oshirildi.

**3. NATIJALAR VA TAHLIL.**

**3.1. Elastik moduli va kritik adgeziya yuklamasi qiymatlari**

Tadqiq etilgan 12 ta qoplama tizimi uchun nanoindentirlash va skratch-test natijalari 2-jadvalda umumlashtirilgan.


ISSN 3030-3907

**2-jadval.**

**Geterostrukturali qoplamalarning elastik moduli (E) va kritik adgeziya yuklamasi ($Lc_2$)**

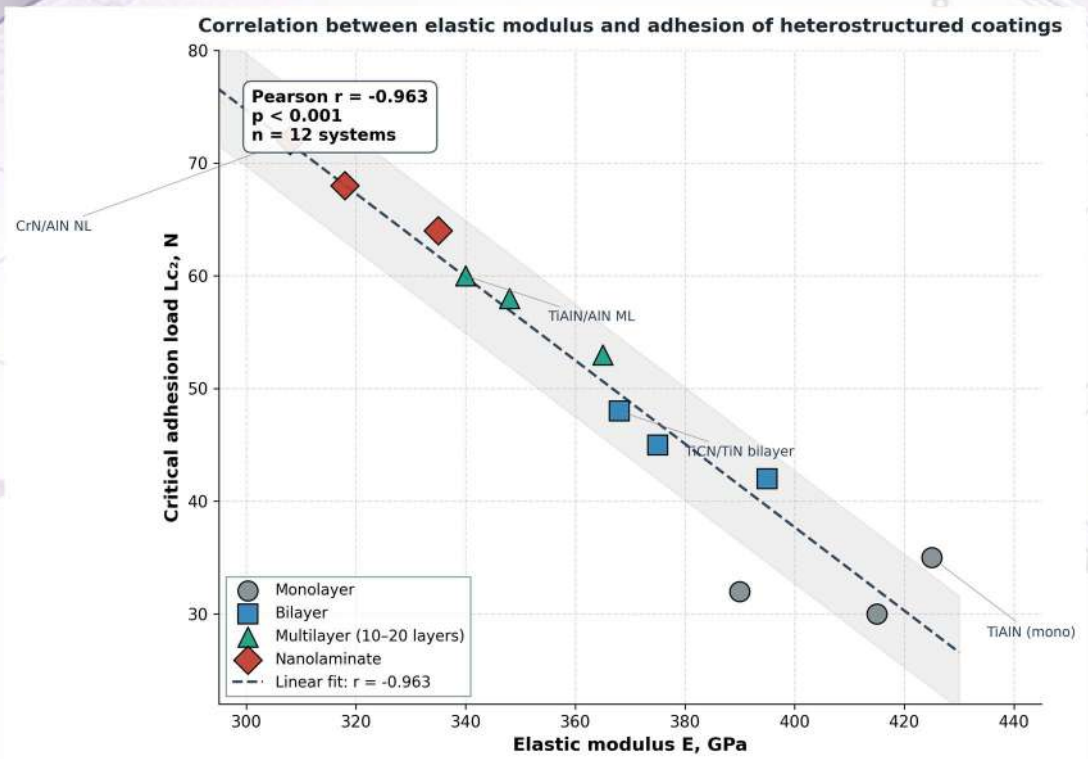
| № | Qoplama tizimi | Arxitektura | E, GPa | $Lc_2$, N |
|---|---|---|---|---|
| 1 | TiN | Monoqatlam | 390 ± 14 | 32 ± 2 |
| 2 | CrAlN | Monoqatlam | 415 ± 16 | 30 ± 2 |
| 3 | TiAlN | Monoqatlam | 425 ± 18 | 35 ± 3 |
| 4 | TiN/CrN | Ikkiqatlam | 375 ± 13 | 45 ± 3 |
| 5 | TiAlN/CrN | Ikkiqatlam | 395 ± 15 | 42 ± 3 |
| 6 | TiCN/TiN | Ikkiqatlam | 368 ± 12 | 48 ± 3 |
| 7 | TiAlN/CrN | Ko‘pqatlamli (10) | 365 ± 12 | 53 ± 3 |
| 8 | TiN/CrN | Ko‘pqatlamli (15) | 348 ± 11 | 58 ± 4 |
| 9 | TiAlN/AlN | Ko‘pqatlamli (20) | 340 ± 11 | 60 ± 4 |
| 10 | TiAlN/CrAlN | Nanolaminat | 335 ± 10 | 64 ± 4 |
| 11 | TiN/AlN | Nanolaminat | 318 ± 9 | 68 ± 5 |
| 12 | CrN/AlN | Nanolaminat | 308 ± 9 | 72 ± 5 |

2-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, monoqatlamli qoplamalar yuqori elastik moduli (E = 390–425 GPa), lekin nisbatan past kritik adgeziya yuklamasi ($Lc_2$ = 30–35 N) ko‘rsatadi. Nanolaminat qoplamalar uchun aksincha holat kuzatildi: elastik moduli sezilarli darajada past (E = 308–335 GPa), ammo kritik yuklama 2 marta yuqori ($Lc_2$ = 64–72 N). Ikkiqatlamli va ko‘pqatlamli qoplamalar oraliq qiymatlarni ko‘rsatadi.

### 3.2. E va $Lc_2$ orasidagi korrelyatsion tahlil

Olingan ma'lumotlarning grafik tahlili 1-rasmda taqdim etilgan. Tasvirda har bir qoplama arxitekturasi alohida shartli belgi va rang bilan ko‘rsatilgan, hamda eng kichik kvadratlar usulida qurilgan chiziqli regressiya egri chizig‘i tasvirlangan.


ISSN 3030-3907




**1-rasm. Geterostrukturali qoplamalarning elastik moduli (E) va kritik adgeziya yuklamasi ($Lc_2$) o‘rtasidagi korrelyatsiya. Soya zonasi - taxminan 95 % ishonch oralig‘i. Pearson r = –0,963, p < 0,001, n = 12 qoplama tizimi**

Statistik tahlil natijalari quyidagicha:

–Pearson korrelyatsiya koeffitsienti: r = –0,963 (kuchli manfiy korrelyatsiya);

–Determinatsiya koeffitsienti: $R^2$ = 0,927 ($Lc_2$ ning 92,7 % o‘zgaruvchanligi E o‘zgarishi bilan tushuntiriladi);

–Chiziqli regressiya tenglamasi: $Lc_2 = –0,328 \cdot E + 169,4$;

–Statistik signifikantlik: t = –10,99; p < 0,001 ($\alpha$ = 0,05 dan ancha past);

–Standart xato: $s_{y|x}$ = 4,1 N.

Olingan natija mexanik xossalar va adgeziya orasidagi muvozanat to‘g‘risida muhim fundamental xulosani tasdiqlaydi: E ning kamayishi qoplamaning elastik moslashuvchanligini va asos bilan moslashish qobiliyatini oshiradi, bu esa kritik yuklamani sezilarli darajada oshiradi. Bu xulosa Holmberg va Matthews (2009) [3] tomonidan tribologik qoplamalar uchun taklif qilingan modelga va Musil (2012) [4] ning nanolaminat tuzilishlari uchun tahlillariga to‘liq mos keladi.

## 4. MUHOKAMA.

Kuzatilgan kuchli manfiy korrelyatsiya bir nechta fizik mexanizm bilan izohlanadi. Birinchidan, geterostrukturali qoplamalarda elastik moduli ko‘pincha qatlamlararo chegaralarda kichik bo‘lib, mexanik energiyani yutish va qayta taqsimlashga qodir bo‘lgan zonalarni shakllantiradi. Bu zonalar qoplama-asos


ISSN 3030-3907

interfeysida konsentratlangan kuchlanishlarning kamayishiga olib keladi va shu sababli adgeziya ortadi [7].

Ikkinchidan, nanolaminat tuzilishlarida (qatlam qalinligi 8–12 nm) qatlamlararo chegaralarning yuqori zichligi dislokatsiyalarning siljishini cheklab, plastik deformatsiya jarayonida har bir individual qatlamning elastik xossalarini saqlab qoladi. Bu Hall-Petch effektining qatlamlar darajasidagi analogi sifatida tushuniladi va birvaqtning o‘zida ham mexanik mustahkamlikni, ham yopishqoqlikni ta'minlaydi [4, 8].

Uchinchidan, qatlamlardagi kimyoviy gradient mavjudligi qoplama-asos interfeysida fazaviy o‘tishni yumshatadi va kuchlanish konsentratsiyasini taqsimlaydi. Misol uchun, CrN/AlN nanolaminatida CrN qatlamning Fe ga moslik darajasi yuqori (po‘lat asos uchun), AlN esa yuqori qattiqlik ta'minlaydi; ularning navbatma-navbat joylashishi orqali har ikkala foyda erishiladi [9].

Olingan korrelyatsion bog‘liqlik ($Lc_2 = -0{,}328 \cdot E + 169{,}4$) amaliy ahamiyatga ega. Birinchidan, u yangi geterostrukturali qoplamalarni loyihalashda dastlabki baholash vositasi sifatida foydalanilishi mumkin: agar elastik moduli ma'lum bo‘lsa, mos adgeziya yuklamasini ±4 N aniqlik bilan oldindan aytib berish mumkin. Ikkinchidan, u sifat nazorati uchun: ishlab chiqarishda qoplama elastik modulini tezkor o‘lchash (nanoindentirlash 5–10 minutda amalga oshiriladi) orqali to‘liq skratch-testsiz adgeziyani baholash mumkin, bu sifat nazorat tsiklini sezilarli qisqartiradi [10].

Korrelyatsiyaning umumlashtirilishi cheklovlari ham mavjud. Mazkur ish faqat nitrid asosli (Ti, Cr, Al) qoplamalar bilan cheklangan; karbid, oksid yoki diamond-like carbon (DLC) qoplamalari uchun korrelyatsiyaning chizgisi va kuchi farqlanishi mumkin. Bundan tashqari, asos sifati va dastlabki tozalash sifati $Lc_2$ ga sezilarli ta'sir ko‘rsatadi va shu sababli korrelyatsiyaning amaliy qo‘llanilishi standartlashtirilgan tayyorlash sharoitlarini talab qiladi [11].

E va $Lc_2$ orasidagi munosabatni yana kuchaytirish uchun keyingi tadqiqotlar qiziqarli yo‘nalishlarni o‘z ichiga oladi: (a) H/E (qattiqlik-elastiklik) nisbati bilan korrelyatsiyani solishtirish; (b) turli asos materiallari uchun (po‘lat, qattiq qotishma, alyuminiy qotishmalar) korrelyatsiyani aniqlash; (c) tribologik tajribalar (eyilishbardoshlik, kavitatsion eroziya) bilan o‘zaro bog‘liqlikni baholash.

## 5. XULOSA.

Olib borilgan tadqiqot quyidagi asosiy xulosalarni shakllantirishga imkon berdi:

Birinchidan, 12 ta turli arxitektura va tarkibga ega geterostrukturali qoplamani PVD usulida muvaffaqiyatli tayyorlash va ularning elastik moduli (E) hamda kritik adgeziya yuklamasi ($Lc_2$) ni o‘lchash amalga oshirildi.


ISSN 3030-3907

Monoqatlamli qoplamalar uchun E = 390–425 GPa va $Lc_2$ = 30–35 N, nanolaminat uchun E = 308–335 GPa va $Lc_2$ = 64–72 N qiymatlar olindi.

Ikkinchidan, E va $Lc_2$ qiymatlari o‘rtasida juda kuchli manfiy chiziqli korrelyatsiya aniqlandi: Pearson r = –0,963 ($p < 0,001$), $R^2$ = 0,927. Regressiya tenglamasi: $Lc_2 = –0,328 \cdot E + 169,4$. Bu munosabat fizikaviy jihatdan elastik moslashuvchanlikning oshishi va kuchlanishlarni qayta taqsimlash imkoniyatining kengayishi orqali izohlanadi.

Uchinchidan, geterostrukturali qoplamalarning arxitekturasi va elastik xossalari orasidagi izchil munosabat o‘rnatildi: monoqatlam → ikkiqatlam → ko‘pqatlamli → nanolaminat o‘tishi bilan E qiymati monoton kamayadi, $Lc_2$ esa monoton oshadi. Bu yo‘naltirilgan loyihalashning poydevorini yaratadi: yuqori adgeziya zarur bo‘lganda qatlamlar sonini oshirish va qatlam qalinligini kamaytirish strategiyasi qo‘llanilishi kerak.

To‘rtinchidan, olingan regressiya tenglamasi sanoat sifat nazorati tizimida qo‘llanilishi mumkin: nanoindentirlash (5–10 minutda amalga oshiriladigan) yordamida E qiymatini o‘lchab, adgeziya yuklamasini ±4 N aniqlik bilan bashorat qilish mumkin, bu vaqt-talab qiluvchi skratch-testning zaruriyatini kamaytiradi.

Kelajakdagi tadqiqotlar uchun istiqbolli yo‘nalishlar quyidagilarni o‘z ichiga oladi: H/E nisbati bilan korrelyatsiyani taqqoslash; karbid va DLC qoplamalari uchun korrelyatsiyaning chegaralarini aniqlash; tribologik ko‘rsatkichlar (eyilishbardoshlik, oksidlanishbardoshlik) bilan o‘zaro bog‘liqliklarni baholash.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection // Surface and Coatings Technology. – 1995. – Vol. 76-77. – P. 328–336. DOI: 10.1016/0257-8972(95)02555-3.

2. PalDey S., Deevi S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 342, No. 1-2. – P. 58–79. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00259-9.

3. Holmberg K., Matthews A. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering. – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 576 p.

4. Musil J. Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 207. – P. 50–65. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.073.

5. Vepřek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // Thin Solid Films. – 1995. – Vol. 268, No. 1-2. – P. 64–71. DOI: 10.1016/0040-6090(95)06695-0.


ISSN 3030-3907

6. Bull S. J. Failure modes in scratch adhesion testing // Surface and Coatings Technology. – 1991. – Vol. 50, No. 1. – P. 25–32. DOI: 10.1016/0257-8972(91)90188-3.
7. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. – 2000. – Vol. 246, No. 1-2. – P. 1–11. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00488-9.
8. Mayrhofer P. H., Mitterer C., Hultman L., Clemens H. Microstructural design of hard coatings // Progress in Materials Science. – 2006. – Vol. 51, No. 8. – P. 1032–1114. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.002.
9. Wang Q., Zhou F., Ding X., et al. Microstructure and properties of CrN/AlN multilayer coatings deposited by reactive magnetron sputtering // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 280. – P. 154–161. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.04.116.
10. Bull S. J., Berasetegui E. G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing // Tribology International. – 2006. – Vol. 39, No. 2. – P. 99–114. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.04.013.
11. Lichinchi M., Lenardi C., Haupt J., Vitali R. Simulation of Berkovich nanoindentation experiments on thin films using finite element method // Thin Solid Films. – 1998. – Vol. 312, No. 1-2. – P. 240–248. DOI: 10.1016/S0040-6090(97)00739-6.
12. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation // Journal of Materials Research. – 2004. – Vol. 19, No. 1. – P. 3–20. DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.3.
13. GOST R 8.748-2011. Метрологическое обеспечение измерений твёрдости методом инструментального индентирования. Часть 1. Метод испытаний. – Moskva: Standartinform, 2012. – 28 b.
14. ASTM C1624-05. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing. – West Conshohocken: ASTM International, 2015. – 29 p.
15. ISO 14577-1:2015. Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method. – Geneva: ISO, 2015. – 46 p.


ISSN 3030-3907