

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Margarita URBAHA**

**NANOSTRUKTURĒTO NODILUMIZTURĪGO JONU -  
PLAZMAS PĀRKLĀJUMU IZVEIDE MAŠĪNU DETAĻU  
ATJAUNOŠANAI UN AIZSARDZĪBAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2011**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Transporta un mašīnzinību fakultāte  
Transportmašīnu tehnoloģiju institūts

**Margarita URBAHA**

Doktora studiju programmas „Transports” doktorante

**NANOSTRUKTURĒTO NODILUMIZTURĪGO JONU -  
PLAZMAS PĀRKLĀJUMU IZVEIDE MAŠĪNU DETAĻU  
ATJAUNOŠANAI UN AIZSARDZĪBAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr.habil.sc.ing., profesors  
**J. MARTINOVŠ**

**Rīga 2011**

UDK 621.793(043.2)  
Ur 134 n

**Urbaha M.** Nanostrukturēto nodilumizturīgo jonu - plazmas pārklājumu izveide mašīnu detaļu atjaunošanai un aizsardzībai. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2011. – 37. lpp.

Iespiests saskaņā ar „RTU P-20” promocijas padomes 2011. gada 1.jūnija lēmumu, protokols Nr. 01/2011.



Šis darbs izstrādāts ar:

Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

Eiropas Sociālā Fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

Eiropas Reģionālā attīstības fonda atbalstu projektā „Industriālās tehnoloģijas prototipa izstrāde daudzkomponentu nanostrukturētu jonu-plazmas nodilumizturīgu pārklājumu iegūšanai”.

ISBN 978-9984-49-338-1

## PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011. gada 25.augustā plkst. 13:00 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātes Transportmašīnu tehnoloģiju institūta telpās, Rīgā, Lomonosova ielā 1, V korpusā, 218. auditorijā.

### OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. habil.sc.ing. Jānis RUDZĪTIS  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Jūris CIMANSKIS  
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andrejs ŠAŅAVSKIS  
Valsts Civilās Aviācijas lidojumu drošības centrs, Krievija

### APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Margarita Urbaha .....(Paraksts)  
Datums: 2011. gada .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 22 pielikumus, 65 attēlus, 15 tabulas, kopā 173 lappuses. Literatūras sarakstā ir 86 nosaukumi.

## SATURS

1. DARBA TEMATA AKTUALITĀTE .....	6
2. PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI .....	6
3. PĒTNIECISKĀS METODES .....	7
4. PĒTĪJUMU OBJEKTS .....	8
5. DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE PĒTĪJUMU REZULTĀTI .....	8
6. DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME .....	10
7. AIZSTĀVAMĀS TĒZES .....	10
8. PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA .....	10
9. PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN SATURS .....	13
1. TRANSPORTMAŠĪNU DETAĻU UN MEZGLU VIRSMU ATJAUNOŠANAS METOŽU ANALĪZE .....	13
1.1. Mašīnu detaļu bojājumu iemeslu un galveno veidu analīze .....	13
1.2. Mašīnu detaļu atjaunojamo virsmu raksturojums .....	13
1.3. Mašīnu detaļu un mezglu atjaunošanas metožu raksturojums .....	13
1.4. Detaļu virsmas pārklājumu veidošanas elektroniskās-jonu-plazmas un nanotehnoloģijas .....	14
2. NANOSTRUKTURĒTO PĀRKLĀJUMU RADĪŠANAS UN KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS PROCESU MODELĒŠANA .....	15
2.1. Daudzkomponentu nanostrukturēto pārklājumu jonu-plazmas uzputināšanas procesa ar kombinēto metodi teorētiskā modelēšana .....	16
2.2. Lēmumu pieņemšanas teorija, novērtējot triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitāti .....	17
3. JONU PLAZMAS PĀRKLĀJUMU RADĪŠANAS UN TO FIZIKĀLI-MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU NOVĒRTĒŠANAS EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU METODES UN LĪDZEKĻI .....	19
3.1. Nodilumizturīgo nanostrukturēto daudzkomponentu pārklājumu radīšanas eksperimentālo pētījumu aprīkojums un metodika .....	20
3.2. Iekārtas NNV-6.6-11 modernizācija vakuuma jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas tehnoloģiskā procesa pilnveidošanai .....	20
3.3. Materiālu un pārklājumu mikrostrukturās un ķīmiskā sastāva pētīšanas iekārtas un metodika .....	21
3.4. Materiālu un pārklājumu mikrocietības mērīšanas metodika un līdzekļi .....	22
3.5. Detaļu ar pārklājumu virsmas raupjuma, makroģeometrisko formas noviržu un ģeometrisko raksturojumu mērīšanas metodika un līdzekļi .....	22
3.6. Pārklājumu tribotehnisko īpašību eksperimentālo pētījumu aprīkojums un metodika .....	24
3.7. Daudzslāņu pārklājumu materiāla cietības un elastības īpašību pētīšana ar nanoindentēšanu .....	25
4. NODILUMIZTURĪGO VAKUUMA JONU-PLAZMAS PĀRKLĀJUMU UZKLĀŠANAS TEHNOLOĢISKO PROCESU EKSPERIMENTĀLĀ PĒTĪŠANA UN OPTIMIZĀCIJA .....	26
4.1. Jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas uz paraugiem un izstrādājumiem no konstrukcijas materiāliem ar kondensācijas un jonu „bombardēšanas” metodi tehnoloģisko procesu pētīšana .....	26
4.2. Nodilumizturīgu jonu-plazmas nanostrukturēto daudzkomponentu pārklājumu uzklāšanas ar kombinēto metodi tehnoloģiskā procesa optimizācija .....	28
4.3. Jonu-plazmas nodilumizturīgu daudzkomponentu pārklājumu izveides tehnoloģija transportlīdzekļu spēka iekārtu precīzijas pāru detaļu aizsardzībai un atjaunošanai .....	29
5. NODILUMIZTURĪGO NANOSTRUKTURĒTO PĀRKLĀJUMU FIZIKĀLI- MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU NOVĒRTĒŠANA UN KVALITĀTES KONTROLE .....	30
5.1. Nanostrukturēto virsmu fizikāli-mehānisko un triboloģisko īpašību mērīšanas vienuma nodrošināšana .....	30
5.2. Nodilumizturīgo nanostrukturēto jonu - plazmas pārklājumu adhēzijas stipruma eksperimentālais novērtējums .....	30
5.3. Daudzslāņu pārklājumu cietības un elastības īpašību pētījumu ar nanoindentēšanu rezultāti .....	33
5.4. Nanostrukturēto aizsargpārklājumu tribotehnisko īpašību eksperimentālais pētījums .....	35

## 1. DARBA TEMATA AKTUALITĀTE

Lielākā daļa transporta līdzekļu spēka iekārtu atceļ, ieskaitot hidroagregātu iziešanu no ierindas, notiek regulējošo un sadales iekārtu, kā arī sūkņu un hidromotoru plunžeru un virzļu pāru bojājumu rezultātā. Visas precīzijas pāru detaļu atceļ un sagrūšanas notiek pēc viena no ekspluatācijas rādītājiem (nodiluma, korozijas u.c.), un parasti sākas no detaļas virsmas. Visas detaļu ekspluatācijas īpašības un to rādītāji ir cieši saistīti ar virsmas slāņu ģeometriskiem un fizikāli mehāniskajiem raksturojumiem. Dažādu nodilumizturības paaugstināšanas metožu – konstruktīvo, tehnoloģisko, ekspluatācijas analīze parāda, ka visai perspektīva ir detaļu virsmas īpašību uzlabošanas metode ar speciālu aizsargpārklājumu radīšanu. Pie tam īpašu interesi izraisa inovatīvie nanostrukturētie pārklājumi, kuri tiek radīti uz jonu-plazmas uzputināšanas tehnoloģiju pamata. Šī veida pārklājumi izceļas ar augstu tehnoloģiskumu un plašu fizikāli mehānisko un ekspluatācijas īpašību daudzveidību.

Latvijas Nacionālās inovāciju koncepcijas galvenais mērķis ir ražošanas tehniskā līmeņa atbilstoša attīstītām valstīm sasniegšana. Transportmašīnbūves kompleksa attīstība ir cieši saistīta ar materiālu nanostrukturēšanu, kuras izmantošana ļauj ne tikai paplašināt tehnisku objektu funkcionālās iespējas, bet arī nodrošināt ražošanas, dabas un energoresursu racionālāku izmantošanu. Turklāt Eiropas Komisija ziņojumā „Rīcības plāns Eiropai 2005.-2009.g.” ir norādījusi nanotehnoloģiju potenciālu Eiropas konkurētspējas veicināšanas kontekstā.

Pamatojoties uz promocijas darbā izvirzītiem uzdevumiem un, ņemot vērā, ka darbs atbilst valsts prioritārajam zinātnes virzienam – Inovatīvie materiāli un tehnoloģijas, sniedz ieguldījumu šī zinātnes virziena attīstībā un papildus sekmē zinātnes un ražošanas integrāciju, darba tēmu var uzskatīt par aktuālu un nepieciešamu gan Latvijā, gan pasaulē.

## 2. PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

**Promocijas darba mērķis** – inovatīvās tehnoloģijas izstrāde nanostrukturēto daudzkomponentu nodilumizturīgo pārklājumu iegūšanai ar jonu-plazmas kombinēto metodi mašīnu detaļu virsmas atjaunošanai un aizsardzībai.

### **Promocijas darba uzdevumi ir:**

1. Izstrādāt teorētisko modeli, kas pamato nanostrukturētu daudzkomponentu jonu-plazmas pārklājumu kombinētās uzklāšanas metodes pielietošanas efektivitāti, lai nodrošinātu to optimālās ekspluatācijas īpašības un intensificētu nogulsnešanas tehnoloģisko procesu;
2. Izstrādāt triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitātes novērtēšanas teorētisko modeli, kas balstās uz varbūtisko pieeju, izmantojot akustiskās emisijas kontroles diagnostikas datus;
3. Eksperimentāli izpētīt jonu-plazmas pārklājumu iegūšanas tehnoloģiskus procesus, izmantojot kondensācijas ar jonu bombardēšanu un magnetrona uzputināšanas metodes;
4. Izstrādāt jaunu jonu-plazmas tehnoloģiju nanostrukturētā nodilumizturīgā kompozītpārklājuma (daudzslāņu, daudzkomponentu) iegūšanai ar kombinēto metodi mašīnu detaļu virsmas atjaunošanai un aizsardzībai to ražošanas un remonta procesā;

5. Izveidot rūpniecisko izstrādājumu atjaunojoša un aizsargājoša nanostukturētā pārklājuma prototipu;
6. Eksperimentāli izpētīt izveidotā nanostukturētā pārklājuma kvalitātes raksturojumus (fizikāli-mehāniskās īpašības, struktūru, ķīmisko sastāvu un ģeometriskus raksturojumus). Veikt pārklājuma adhēzijas stiprības novērtēšanu ar „skrāpēšanas” metodes pielietošanu. Balstoties uz varbūtisko pieeju un veiktiem eksperimentāliem pētījumiem izstrādāt triboelementu pārklājumu kvalitātes novērtēšanas metodoloģiju. Balstoties uz nanoindentēšanas rezultātiem novērtēt izveidotā nanostukturētā pārklājuma nodilumpretestību;
7. Eksperimentāli izpētīt pārklājuma uzputināšanas procesa tehnoloģisko parametru (darba gāzu attiecība uzputināšanas kamerā) un ekspluatācijas īpašību (pārklājuma raupjums) ietekmi uz pārklājuma tribotehnikajām īpašībām.

## 3. PĒTĪNĒJUMS UN METODES

**Veikto pētījuma daļu metodoloģija un izmantotās pētnieciskās metodes:**

### *Teorētiskās metodes:*

- matemātiskā modelēšana;
- cietā ķermeņa fizika;
- matemātiskā statistika un korelācijas analīze;
- varbūtības un drošuma teorija.

### *Eksperimentālās metodes:*

- pārklājumu jonu-plazmas uzklāšanas metodes vakuumā;
- materiālu un pārklājumu mikrostruktūras un ķīmiskā sastāva eksperimentālā pētīšana;
- pārklājuma adhēzijas izturības ar pamatmateriālu eksperimentālā novērtēšana;
- pārklājumu materiāla cietības un elastības īpašību pētīšana ar nanoindentēšanu;
- pārklājumu tribotehnisko īpašību eksperimentālā pētīšana;
- pārklājumu virsmas raupjuma un makroģeometrisko formas noviržu parametru eksperimentālā pētīšana;
- eksperimentu rezultātu statistiskā apstrāde.

#### 4. PĒTĪJUMU OBJEKTS

Kā izpētes objekts tika izmantoti dīzeļa dzinēja augstspiediena sūkņa hidro – degvielas plunžera precīzijas pāri (PP).

#### 5. DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE PĒTĪJUMU REZULTĀTI

**Promocijas darbā veikto pētījumu zinātniskā novitāte:**

Promocijas darba rezultātā tika radīti inovatīvie produkti:

- jauna augsti efektīva jonu-plazmas tehnoloģija nanostrukturēto nodilumizturīgo kompozītpārklājumu iegūšanai ar kombinēto metodi (tika saņemts patents: Precīzijas pāru detaļu nodilumizturīga daudzslāņu pārklājuma iegūšanas paņēmieni. – LR Patents Nr. LV 14057 B, 20.03.2010)
- jauns nanostrukturēts jonu-plazmas kompozītpārklājums (divslāņu, trīskomponentu) uz Ti-Al-N bāzes ar paaugstinātu nodilumizturību.

Šie inovatīvie produkti sekmē Mašīnzinātnes nozares un ražošanas integrāciju un pētniecisko rezultātu ieviešanu atbilstoši valstī izvirzītajam prioritārajam zinātnes virzienam – Inovatīvie materiāli un tehnoloģijas (nanostrukturētie daudzfunkcionālie materiāli un nanotehnoloģijas).

**Darba izpildes gaitā ir sasniegti sekojošie pamatrezultāti:**

1. Piedāvāts teorētiskais modelis, kas pamato nanostrukturētu daudzkomponentu jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas kombinētās metodes pielietojuma efektivitāti pārklājumu optimālu ekspluatācijas īpašību nodrošināšanai un uzklāšanas tehnoloģiskā procesa intensifikācijai. Tika pierādīts, ka dažādu metālu piemaisījumu klātbūtnei pie daudzkomponentu pārklājumu nogulsnešanas ar kombinētās metodes palīdzību ir jānovēd pie nogulsnešanas procesa intensifikācijas, t.i. pie uzputināšanas ātruma palielināšanās un pie vienmērīgākas pārklājuma struktūras radīšanas, pie tā cietības un adhēzijas stipruma palielināšanās.
2. Piedāvāts uz varbūtisku pieeju balstīts triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitātes novērtēšanas teorētiskais modelis, izmantojot akustiskās emisijas kontroles metodes diagnostikas datus. Teorētiski pamatota brāķēšanas līmeņa un ar tā izvēli saistītās riska vērtības noteikšanas metodika, kontrolējot triboelementus ar pārklājumiem.
3. Eksperimentāli izpētīti jonu-plazmas pārklājumu iegūšanas tehnoloģiskie procesi, izmantojot dažādus materiāla uzputināšanas metodes (kondensācija ar jonu bombardēšanu un magnetrona). Eksperimentāli parādīti šo pārklājumu uzputināšanas metožu trūkumi un priekšrocības. KJB metodes pamatpriekšrocība ir liels pārklājumu nogulsnešanas ātrums (5...7  $\mu\text{m/h}$ ). Tomēr pārklājumi, kas tika izveidoti ar KJB metodi, satur ļoti lielu „pilienu fāzi” un paklājuma raupjuma parametra  $R_a$  vidēja vērtība sasniedz 0.688  $\mu\text{m}$ . Pārklājuma vidēja nanocietība ir 26 GPa. Savukārt izmantojot magnetrona uzputināšanas metodi,

pārklājumi atšķiras ar zemo raupjumu ( $R_a = 0.015 \mu\text{m}$ ) un paaugstināto nanocietību (41GPa) pie zema uzputināšanas ātruma (0.5...1  $\mu\text{m/h}$ ).

4. Tika izstrādāta jauna augsti efektīva jonu-plazmas tehnoloģija nanostrukturētā nodilumizturīgā kompozītpārklājuma iegūšanai ar kombinēto (KJONBOMU - kondensēšanas un jonu bombardēšanas + magnetrona uzputināšanas) metodi. Kombinēta tehnoloģija ļauj: veidot nanostrukturētus pārklājumus, nodrošināt pārklājuma augstu mikrocietību un nodilumpretestību; adhēziju un biežuma vienmērīgumu lielā laukumā; variēt pārklājuma sastāvu plašā diapazonā viena tehnoloģiskā cikla robežās; iegūt pārklājuma virsmas augstu gludumu (ievērojami samazinājās „pilienu fāzes” ietekme un paklājuma raupjuma parametri) viendabīgāki pēc sastāva, un nodrošināt ražošanas cikla ekoloģisko tīrību (tika saņemts patents: Precīzijas pāru detaļu nodilumizturīga daudzslāņu pārklājuma iegūšanas paņēmieni. – LR Patents Nr. LV 14057 B, 20.03.2010)
5. Tika izveidots nanosturkturētā kompozītpārklājuma prototips (divslāņu, trīskomponentu) uz Ti–Al–N bāzes ar paaugstinātu nodilumizturību. Pārklājums ir paredzēts triboelementu – sadalītāju un plunžeru precīzijas pāru detaļu - virsmas aizsardzībai un atjaunošanai to ražošanas un remonta procesā. Izstrādātais daudzkomponentu pārklājums ļauj samazināt berzes koeficientu un kontaktējošo virsmu nodilumu 2 reizes un rezultātā palielināt berzējošo detaļu resursu.
6. Eksperimentāli tika izpētīti izveidotā nanosturkturētā pārklājuma kvalitātes raksturojumi (fizikāli-mehāniskās īpašības, struktūra, ķīmiskais sastāvs un ģeometriskie raksturojumi (biežums, virsmas raupjuma divdimensiju (2D) un trīsdimensiju (3D) parametri).
7. Eksperimentāli izpētīts izveidotā nodilumizturīga nanosturkturētā pārklājuma sagrūšanas mehānisms un veikta tā adhēzijas stiprības novērtēšana „pārklājums-paraugs” un „pārklājums-detaļa” sistēmām ar skrāpēšanas-testeri CSM Revetest Xpress. Balstoties uz izmēģinājumu laikā veiktiem dažādu fizikālo parametru mērījumiem (akustiskā emisija, berzes koeficients, indentora iekļūšanas dziļums, normālā slodze, berzes spēks) aprakstīti sagrūšanas mehānismi un noteiktas kritiskās slodzes robežvērtības, kas noved pie pārklājumu sagrūšanas. Izveidotā pārklājuma adhēzijas stiprības vērtība 4...5 reizes pārsniedz to pārklājumu stiprību, kas ir iegūti ar zināmām jonu-plazmas uzputināšanas metodēm. Balstoties uz piedāvātu varbūtisku pieeju un izpildītiem eksperimentāliem pētījumiem tika izstrādāta triboelementu pārklājumu kvalitātes novērtēšanas metodoloģija atkarībā no kritiskās slodzes, kas noved pie pārklājumu adhēzijas pasliktināšanās un ar augstu jutīgumu tiek noteikta ar akustiskās emisijas metodi, robežvērtībām.
8. Balstoties uz nanoindentēšanas rezultātiem tika novērtēti izveidotā nanosturkturētā pārklājuma nodilumpretestības rādītāji. Ievērojami pieauga pārklājuma vidējā nanocietība. Plunžeriem ar pārklājumiem, kuri ir radīti ar kombinētās metodes palīdzību, cietības vērtības ir 37...41 GPa pie elastības moduļa 440...475 GPa. Attiecības  $H/E$  vidēja vērtība ir 0,085, bet  $H^3/Er^2$  –0,283 GPa. Parametru  $H/E$  un  $H^3/Er^2$  saņemto vērtību diapazons apstiprina pārklājuma nanostrukturētas esamību un apliecina tā augsto nodilumizturību un spēju pretoties plastiskai deformācijai.
9. Balstoties uz nanostrukturēto jonu-plazmas pārklājumu triboehnisko īpašību eksperimentālo pētījumu rezultātiem tika veikts pārklājumu uzputināšanas procesa tehnoloģisko parametru (darba gāzu attiecība uzputināšanas kamerā) un ekspluatācijas īpašību (pārklājuma raupjums) ietekmes uz berzes koeficientu novērtējums. Tā, veidojot pārklājumu ar KJONBOMU metodi, palielinot slāpekļa koncentrāciju gāzu maisījumā no 2 līdz 10, var iegūt vairāk kā divkārtēju virsmas raupjuma samazināšanos – no 0.35 līdz 0.13 $\mu\text{m}$ . Savukārt pārklājuma raupjums būtiski ietekmē berzes koeficientu. Tā samazinot pārklājuma raupjuma ( $R_a$ ) vidējo vērtību no 0.607  $\mu\text{m}$  (pārklājumam kas tika iegūts ar KJB

metodi) uz 0.097  $\mu\text{m}$  (pārklājumam kas tika iegūts ar KJONBOMU metodi) būtiski samazinājās berzes koeficients (no 0.417 līdz 0.181).

## 6. DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Promocijas darba rezultātiem ir plašs praktiskais nozīmīgums un pielietojums, jo tā ietvaros tika izstrādāta un patentēta ("Mašīnbūves detaļu nodilumizturīga daudzslāņu pārklājuma iegūšanas paņēmieni") jauna un augsti efektīva jonu-plazmas tehnoloģija nanostrukturēto nodilumizturīgo pārklājumu iegūšanai ar kombinēto metodi.

Promocijas darba rezultāti var pārsvarā tikt izmantoti transporta mašīnbūvē, transportlīdzekļu dzinēju, hidrauliskās un degvielas aparātūras, iekraušanas - izkraušanas iekārtu, multiplikatoru u.c. precīzijas pāru detaļu izgatavošanai un remontam.

Izstrādātā tehnoloģija kompozītpārklājumu izveidei ar jonu-plazmas uzputināšanu ir augsti tehnoloģiska, ekoloģiski droša un resursus saudzējoša, t.i., pilnībā atbilst mūsdienīga ražošanas procesa prasībām.

Ieviešot šo jauno tehnoloģiju rūpniecībā jaunu izstrādājumu izgatavošanai, kā arī eksistējošo izstrādājumu remontam, uzņēmumi paaugstinās savu konkurētspēju un sekmēs Latvijas tautsaimniecības attīstību. Darba rezultāti tika eksperimentāli apobēti Latvijas uzņēmumā „Metalserviss” aizsargpārklājumu izveidei rūpnieciskiem metālizstrādājumiem.

## 7. AIZSTĀVAMĀS TĒZES

Autors šajā darbā aizstāv:

1. Izstrādāto teorētisko modeli, kas pamato nanostrukturētu daudzkomponentu jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas kombinētās metodes pielietošanas efektivitāti.
2. Teorētiski pamatoto brāķēšanas līmeņa un ar tā izvēli saistītās riska vērtības noteikšanas metodiku, kontrolējot triboelementus ar pārklājumiem.
3. Izstrādāto augsti efektīvu jonu-plazmas tehnoloģiju nanostrukturētā nodilumizturīgā kompozītpārklājuma iegūšanai ar kombinēto (KJONBOMU - kondensēšanas un jonu bombardēšanas + magnetrona uzputināšanas) metodi.
4. Izveidoto nanostukturētā kompozītpārklājuma prototipu (divslāņu, trīskomponentu) uz Ti-Al-N bāzes ar paaugstinātu nodilumizturību.
5. Izstrādāto triboelementu pārklājumu kvalitātes novērtēšanas metodoloģiju atkarībā no kritiskās slodzes, kas noved pie pārklājumu adhēzijas pasliktināšanās.
6. Pārklājumu uzputināšanas procesa tehnoloģisko parametru (darba gāzu attiecība uzputināšanas kamerā) un ekspluatācijas īpašību (pārklājuma raupjums) ietekmes uz berzes koeficientu novērtējumu.

## 8. PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Par darba rezultātiem ziņots 16 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs:

1. International Conferences "Maritime Transport and Infrastructure" (IC MTI), LJA, Rīga, Latvija: 9. IC MTI, 19.-20.aprīlis, 2007; 12. IC MTI, 29.-30. aprīlis, 2010; 13.IC MTI, 28.-29. aprīlis, 2011.
2. 2nd International Nanotechnology Conference NanoIsrael 2010, November 8-9, 2010, Tel Aviv, Israel.
3. International Convention AES-ATEMA'2010: Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, June 19-23, 2010, Brixen, Italy.
4. 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials - NANOSMAT 5, October 19-21, 2010, Reims, France.
5. 2nd International Specialized Symposium "Space & Global Security of Humanity" (SGS 2010), July 5-9, 2010, Riga, Latvia.
6. Rīgas Tehniskās universitātes starptautiskās zinātniskās konferences (SZK), Rīga, Latvija: 47.SZK, 12.-14.oktobris, 2006; 48.SZK, 11.-13.oktobris, 2007; 49. SZK, 13. -15. oktobris, 2008; 50.SZK, 12. -16. oktobris, 2009.
7. 1st International EJC-PISE Workshop "Plasma Surface Engineering – Protective and Decorative Coatings", June 9-10, 2009, Riga, Latvia.
8. 7th International Nanotechnology Symposium: New Ideas for Industry "Nanofair' 2009" May 26-27, 2009, Dresden, Germany.
9. 3rd International Conference on Nanotechnology and Nanoscience „NanoAfrica 2009”, 1.-4. februāris, 2009, Pretoria, Dienvidāfrikas Republika.
10. Nanotech Northern Europe 2008, 23.-25.septembris, 2008, Kopenhāgena, Dānija.
11. XV International scientific-technical conference, trans&MOTAUTO'08, 18.-20. septembris, 2008, Sozopol, Bulgārija.
12. 2nd international conference on Advanced Nano Materials, Advanced Nano Materials, 22.-25.jūnijs, 2008, Aveiro, Portugāle.
13. International conference MCM 2008, Mechanics of Composite Materials - 2008, May 26-30, 2008, Riga, Latvia.
14. 5th International Conference "Metals, Welding&Powder Metallurgy: MET-2007", 13.-14.septembrī, 2007, Rīga, Latvija.
15. International Conference on Composites/Nano Engineering ICCE-15, July 15-21, 2007, Haikou, Hainan island, China.
16. 9th International Conference „Transport Means' 2005”, October 20-21, 2005, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania.

### Darba rezultāti publicēti 10 zinātniskos rakstos un ir saņemts 1 patents:

1. Urbaha M., Savkovs K., Kumermanis M., Martinovs J. Nanotehnoloģijas transportlīdzekļu spēka iekārtu detaļu virsmu inženierijā // Proceedings of International Conference "Maritime Transport and Infrastructure-2011", ISSN 1691-3817, Latvija, Rīga, 2011. - 162.-169. lpp.
2. Urbaha M. Possibilities of ionic-plasma methods of formation nanostructural wearproof composite coating // AES Technical Reviews Int. Journal, Part D: International Journal of Reliability and Safety of Engineering Systems and Structures (IJRESS), ISSN 1916-5374, 1(1) 2011, 2011. - pp. 39 - 42.
3. Urbaha M. Nodilumizturīgo nanostrukturēto jonu-plazmas pārklājumu fizikāli-mehānisko īpašību eksperimentālā pētīšana // RTU zinātniskie raksti. 6. sēr., Mašīnzinātne un transports. - 10. sēj. (2010), 2010.-80.-88. lpp.

4. Urbaha M. Triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitātes novērtēšana un drošuma prognozēšana // RTU zinātniskie raksti. 6. sēr., Mašīnzinātne un transports. - 10. sēj. (2010), 2010.-54.-60. lpp.
5. Urbaha M. Nanokristāliskie nodilumizturīgie pārklājumi kuģu dzinēju detaļu aizsargāšanai un atjaunošanai // Proceedings of 12th International Conference "Maritime Transport and Infrastructure-2010", ISSN 1691-3817, Latvija, Rīga, 2010. - 99.-105. lpp.
6. Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Precīzijas pāru detaļu nodilumizturīga daudzslāņu pārklājuma iegūšanas paņēmieni. – LR Patents Nr. LV 14057 B, 20.03.2010.
7. Urbaha M., Savkovs K., Urbach A. Development of protective coating for advanced aero engines// Book of abstracts of the 2<sup>nd</sup> International Symposium "Space & Global Security of Humanity", Latvia, Riga, 2010. – p. 95.
8. Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Multifunctional protective technological coverings// Abstracts of the 1st International EJC-PISE Workshop "Plasma Surface Engineering – Protective and Decorative Coatings", Riga, Latvia, 2009.
9. Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Nanostructured composite coatings for the protection and restoration of precision friction pair parts // International Journal Machines, Technologies, Materials. - ISSN 1313-0226, 2008. – pp. 58.-59.
10. Urbahs A., Savkovs K., Ņesterovskis V., Urbaha M. Synthesis of nanostructured composite coatings for the protection and restoration of precision friction pair parts // Book of abstracts of International conference MCM 2008, Mechanics of Composite Materials - 2008, Latvija, Rīga, 2008. – pp.267-268.
11. Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Technology for the Design of Nanostructured Composite Coatings // Book of abstracts of 3rd International Conference on Nanotechnology and Nanoscience „NanoAfrica 2009”, Dienvidāfrikas Republika, Pretoria, 2009.-58.-59.pp

**Promocijas darba rezultāti tika izmantoti 7 zinātniskajos projektos:**

1. IZM "Zinātniskās darbības attīstība augstskolā" finansētais projekts Nr. R7073 „Rūpniecisko izstrādājumu funkcionālo kompozīto pārklājumu izveide ar jonu plazmas uzputināšanu”, 2006.g.;
2. RTU zinātniskais projekts Nr. ZP/2005 – 06 „Jonu - plazmas pārklājumu izstrāde transportlīdzekļu spēku iekārtu detaļu aizsardzībai un atjaunošanai”, 2005.-2006.g.;
3. LZP zinātniskais projekts Nr. 09.1088 “Daudzkomponentu jonu - plazmas pārklājumu izveide mašīnbūves izstrādājumu aizsardzībai un atjaunošanai”, 2009.
4. LZP zinātniskais projekts Nr. 09.1612 Materiālu virsmu un makrostruktūras īpašību izpēte, 2009.-2010.g.
5. LZP sadarbības projekts Nr. 10.0009 “Rūpniecisko izstrādājumu daudzkomponentu nanostrukturēto aizsargājošo pārklājumu izveides tehnoloģiju izstrāde”, sākot ar 2010.g.
6. ERAF projekts “Industriālās tehnoloģijas prototipa izstrāde daudzkomponentu nanostrukturētu jonu-plazmas nodilumizturīgu pārklājumu iegūšanai”, sākot ar 2010.g.
7. Nanopārklājumu raupjumu raksturojošo telpisku nestandarta parametru pētījumi (FLPP-2010/1), sākot ar 2010.g.

## 9. PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN SATURS

Promocijas darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, secinājumiem, literatūras saraksta un 22 pielikumiem.

### 1. TRANSPORTMAŠĪNU DETAĻU UN MEZGLU VIRSMU ATJAUNOŠANAS METOŽU ANALĪZE

Šī nodaļa sastāv no piecām apakšnodaļām, kurās tiek atklāti jautājumi, kuriem ir pamatnozīme tālākajā teorētiskajā pētījumā un pētījuma rezultātu praktiskajā pielietojumā. Ir parādīti pārklājumu uzklāšanas metožu vakuumā salīdzinošās analīzes rezultāti, apskatīti šo metožu realizācijas paņēmieni un shēmas. Formulēti pētījuma mērķis un uzdevumi.

#### 1.1. Mašīnu detaļu bojājumu iemeslu un galveno veidu analīze

Mašīnu bojājumi rodas detaļu materiāla fizikāli mehānisko īpašību pastāvīga vai pēkšņa samazinājuma, detaļu materiāla dilšanas, deformēšanas, sakrokojuma, korozijas, vecošanas, paliesto spriegumu pārdalīšanas un citu iemeslu, kas izsauc detaļu sagraušanu, rezultātā. Praktiski jebkurš bojājums ir materiāla sastāva, struktūras vai mehānisko īpašību, detaļu konstruktīvo izmēru un to virsmu stāvokļa izmaiņu sekas.

Bojājumu rašanās ir saistīta ar konstruktīviem, tehnoloģiskiem un ekspluatācijas faktoriem.

Mašīnu detaļu bojājumus var sadalīt trīs grupās: nodilums, mehāniskie bojājumi un ķīmiski-siltuma bojājumi.

Visbiežāk sastopamais bojājumu veids ir detaļu nodilums. Detaļu nodiluma pieauguma intensitāte un kustīgo salāgojumu spraugu maiņa atkarībā no darba ilguma norisinās saskaņā ar noteiktu likumsakarību.

#### 1.2. Mašīnu detaļu atjaunojamo virsmu raksturojums

No visām atjaunojamām virsmās ārējās un iekšējās cilindriskās virsmas sastāda 53.3%, vītņu – 12.7%, daudzrievu – 10.4%, robainas – 10.2%, plakanās – 6.5%, visas pārējās – 6.9%

Mūsdienu izpratnē mācība par detaļu virsmu inženieriju sastāv no zinātniski pamatotas darba virsmu formas, ģeometrisko parametru (makronoviržu, viļņainuma, raupjuma) un fizikāli-ķīmisko īpašību, kas nodrošina detaļu drošumu un nepieciešamo ilgzinātību, noteikšanas teorijas izstrādes, kā arī no šādu virsmu veidošanas tehnoloģijas izstrādes, to kontroles, izmēģināšanas, izmaiņām ekspluatācijā, remonta, atjaunošanas un utilizācijas.

Mašīnu detaļu virsmas slāņa izpēti un pilnveidošanu nepieciešams veikt kompleksi visās tā dzīves cikla stadijās.

#### 1.3. Mašīnu detaļu un mezglu atjaunošanas metožu raksturojums

Atjaunojot detaļas galvenais uzdevums ir atgriezt to nodilušām virsmām sākotnējus parametrus. Galvenie tehnoloģiskie paņēmieni šajā jomā ir metālisko pārklājumu uzkausēšana un uzputināšana, metāla nogulsnešana, formu maiņa, difūzija, strukturālās izmaiņas, polimēro metālu uzklāšana utt.

Ražošanas apstākļos ir izstrādāti un tiek realizēti desmitiem dažādu detaļu atjaunošanas paņēmienu. Vispieņemamākā paņēmiena izvēle tiek veikta pēc atjaunojamo detaļu prasību

tehniskās, ekonomiskās un organizācijas analīzes, ņemot vērā detaļu darba apstākļu salāgojumā, ražošanas programmas, uzņēmumu aprīkojumu, nodrošinājumu ar materiāliem, enerģiju, darba spēku un citus konkrētus pasākumus.

Pārklājumus no metāliem, sakausējumiem, pseidosakausējumiem un plastmasām uzklāj uz detaļu virsmas to aizsardzībai no sabrukšanas eksploatācijas laikā, kalpošanas laika pagarināšanai, izmēru atjaunošanai, antifrīcijas, korozijas- un karstumizturīgu detaļu iegūšanai.

Mašīnu detaļu plazmas atjaunošanas metodes balstās uz jonizētās gāzes (plazmas) siltumfizisko īpašību izmantošanu. Tā kā iegūt plazmu tīrā veidā ir visai grūti, tad tehniskajām vajadzībām izmanto lokizlādi, kuru bagātina ar plazmu, t.i. lokizlādē kopā ar uzlādētām daļiņām (joniem un elektroniem) ir arī neitrālas daļiņas. Tāds gāzes stāvoklis tiek saukts par zemas temperatūras plazmu (gāzes temperatūra izejā no plazmatrona sprauslas ir 5000...7000 K).

Plazmas uzputināšanai kā uzputināmie materiāli tiek izmantoti pulveri, stieples un stiepi.

Būtisks uzputināmo pārklājumu trūkums ir to porainība, kas izskaidrojama ar nelielo kontakta virsmu kā starp daļiņām, tā arī starp daļiņām un pamatni. Iedarbojoties uz tādu slāni samērā nelielai slodzei, ir liela tīa atslāpošanās varbūtība. Lai uzlabotu uzputināto pārklājumu kvalitāti, tos pakļauj turpmākai apkausēšanai.

Ar plazmas uzputināšanas metodi ir iespējams iegūt vairākus milimetrus biezu pārklājumu, tomēr slāņa biezumam palielinoties >1...1.3 mm, tā sasaistīšanās ar pamatni stiprums samazinās, tādēļ vislietderīgāk ir atjaunot detaļas ar nodilumu, kas nepārsniedz 0,4...0,6 mm. Acīmredzami, ka šī metode neļauj atjaunot vai radīt pārklājumus nano un mikrolīmenī.

#### 1.4. Detaļu virsmas pārklājumu veidošanas elektroniskās-jonu-plazmas un nanotehnoloģijas

*Plāno kārtu ķīmiskās nogulsnešanas metodi* realizē darba kamerā (reaktorā), kas satur iegūstamās kārtas komponentes, ielaižot gāzes maisījumu, un daļas uz atomu un molekulu nogulsnešanas tieši no gāzes fāzes un elektriski neitrālo atomu, molekulu un radikāļu plazmas-ķīmisko nogulsnešanas. Eksistē CVD-metodes (CVD – Chemical Vapor Deposition), gāzes fāzes epitaksija, termiskā oksidēšanās, plazmoķīmiskās nogulsnešanas metodes.

Ķīmiskās nogulsnešanās metodes galvenā priekšrocība ir plašs nogulsnešanās ātruma  $v_0$  diapazons un iespēja iegūt uzdotu kārtas kristālisko struktūru (līdz pat monokristāliem), bet galvenais trūkums – toksisko, ekoloģiski bīstamu gāzes maisījumu izmantošana.

Literatūrā bieži ir sastopams termins PVD (Physical Vapor Deposition) – plāno kārtu uzklāšana, pie kura pieskaita visus augstāk minētās metodes, izņemot CVD.

Pēdējos gados aizvien lielāku mašīnbūves speciālistu interesi izraisa elektroniskās un nanotehnoloģijas. Šī interese ir īpaši liela no detaļu virsmu inženierijas pozīcijas, jo ļauj veidot to funkcionālās īpašības atsevišķo atomu un molekulu līmenī.

*Gāzizlādes plazma*, kas sastāv no elektroniem, joniem un elektriski neitrāliem atomiem, molekulām un radikāliem un ģenerē dažādus starojuma veidus, var kalpot par materiālu apstrādes instrumentu.

Apstrādi ar plazmu veic pie spiediena, kas ir mazāks par atmosfēras spiedienu, līdz ar to tā ir saderīga ar citiem vakuuma procesiem.

Viens no raksturīgākajiem gāzizlādes plazmas izmantošanas piemēriem mašīnbūvē ir apstrādājamā izstrādājuma virsmas attīrīšana un kodināšana, plānkārtas pārklājumu uzklāšana.

Ja plazma tiek aizdedzināta atsevišķā vakuuma kamerā (autonoms jonu avots), bet joni tiek izvilkti no tās kūļa veidā, kas virzās uz paraugu, šo procesu sauc par jonu-loka apstrādi, kuras atsevišķs gadījums ir jonu implantācija.

Pie *plāno kārtu uzklāšanas ar termisko iztvaicēšanu metodes* priekšrocībām pieskaita augstu uzklājamā materiāla frekvenci (process noris augstā un ļoti augstā vakuumā), universālumu (uzklāj metālu, sakausējumu, pusvadītāju, dielektriķu kārtas) un relatīvu realizācijas vienkāršumu. Metodes ierobežojumi ir neregulējams nogulsnešanās ātrums  $v_0$ , nogulsnejamā daļiņu zema, nepastāvīga un neregulējamā enerģija  $E$ .

*Plāno kārtu nogulsnešana ar lokizlādi* vakuumā notiek vielas erozijas dēļ, kas norisinās stipras strāvas lokizlādē (ar aukstiem un karstiem katodiem), jonizētās tvaika fāzes veidošanās (20...100% jonu), tās pārneses ar lielu ātrumu (daļiņu enerģija  $E$  no 10 eV) un kondensācijas uz pamatnes virsmas rezultātā.

Pie *plāno kārtu nogulsnešanas ar lokizlādi* vakuumā metodes priekšrocībām pieskaita: praktiski neierobežotu elektrisko jaudu; augstu iztvaicojamo daļiņu jonizācijas koeficientu  $k_j$ ; iespēju iegūt pārklājumus no sakausējumiem, oksīdiem, nitrīdiem, karbīdiem utt., turklāt gan ar mērķu no doto materiālu izmantošanas metodi, gan ar reaktīvo metodi; nav nepieciešamības pēc papildus gāzes jonizācijai. Metodes trūkumi ir pilienu fāzes esamība nogulsnejamās vielas plūsmā, neregulējamā daļiņu enerģija  $E$  un relatīva loka avotu konstrukcijas sarežģītība.

*Plāno kārtu nogulsnešanas ar jonu izsmidzināšanu metodes* pamatā ir divu procesu savienojums:

1) izejvielas plazmas ģenerācija ar vienu no elektriskās izlādes tipa vai augstas frekvences induktora palīdzību;

2) jonu vai visas kvazineitrālās plazmas paātrināšana ar turpmāko kondensāciju uz pamatnes (detaļas) virsmas.

Izejvielu iegūst ar vienu no termiskās iztvaicošanas metodes palīdzību (termionā metode); no gāzes maisījuma, kas satur uzklājamās kārtas komponentes (jonu-pazmas un jonu-loka metodes); ar gāzizlādes metodi, kuru izmanto kā plazmas paātrinātāja pirmo pakāpi (plazmotronā metode).

Doto metodi realizē ar vienu no sekojošiem paņēmieniem:

- *Jonu-plazmas* (diadais uz pastāvīgās strāvas, AF dioda, triju elektrodu, magnetronais ar pastāvīgu strāvu, reaktīvais utt.);
- *Jonu-loka* (ar karstu katodu, ar aukstu katodu, reaktīvais).

Kā darba gāzi izmantojot *Ar* un ķīmiski aktīvās gāzes ( $O_2$ ,  $N_2$  utt.) maisījumus tiek realizēta reaktīva oksīdu, nitrīdu, karbīdu utt.

Plāno kārtu uzklāšanas ar jonu izsmidzināšanu metodes priekšrocības ir universālums (iespēja uzklāt metālus, sakausējumus, dielektriķus, magnētiskās kompozīcijas), regulējams uzklāšanas ātrums  $v_0$  un relatīvi vienkārša iekārtu konstrukcija. Pie trūkumiem pieskaita salīdzinoši nelielu uzklājamās kārtas tīrību (darba gāzes esamības dēļ), uzklājamo daļiņu zemu un neregulējamu enerģiju  $E$ .

## 2. NANOSTRUKTURĒTO PĀRKLĀJUMU RADĪŠANAS UN KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS PROCESU MODELEŠANA

Šī sadaļa satur 2 apakšsadaļas, kas ir veltītas pārklājumu uzputināšanas procesu teorētiskajai modeļēšanai un tā kvalitātes turpmākai novērtēšanai. Tiek sniegts dažādu metālu piemaisījumu esamības ietekmes uz uzklāšanas tehnoloģiskā procesa efektivitāti teorētiskais pamatojums, veicot daudzkomponentu pārklājumu nogulsnešanu ar kombinētu metodi.

Izveidojamo pārklājumu kvalitāti ir piedāvāts novērtēt, balstoties uz akustiskās emisijas kontroles metodes diagnostikas datiem, ņemot vērā varbūtisko pieeju.

## 2.1. Daudzkomponentu nanostrukturēto pārklājumu jonu-plazmas uzputināšanas procesa ar kombinēto metodi teorētiskā modelēšana

Darbā tiek apskatīts dažādu metālu piemaisījumu klātbūtnes, nogulsņojot daudzkomponentu pārklājumus ar kombinētās metodes palīdzību, ietekmes uz nogulsnēšanas tehnoloģiskā procesa efektivitāti un radāmo pārklājumu kvalitāti, ņemot vērā procesu, kuri ir raksturīgi kā elektroloka, tā arī magnetrona metodēm, fiziku, teorētiskais pamatojums.

Jonu strāvas blīvumu katodā, kas ir vienāds ar jonu skaitu, kas krīt uz katoda virsmas vienību vienā laika vienībā, var noteikt pēc izteiksmes:

$$i = \frac{\rho g_T}{4}, \quad (2.1)$$

kur  $g_T$  – jonu siltuma ātrums,  $\rho$  – plazmas blīvums.

Turklāt katoda materiāla virsmas kustības ātrums dēļ erozijas ir vienāds ar:

$$g_p = \frac{\gamma i}{n},$$

kur  $\gamma$  – izsmidzināšanas koeficients,  $n$  – atomu skaits vienā materiāla apjoma vienībā.

Magnetronā ar sabalansētu magnētisko lauku magnētiskais lauks pie katoda virsmas ir paralēls tā virsmai. Plazmas blīvums  $\rho$  samazinās katoda virzienā, jo magnetizētie plazmas elektroni var novirzīties no tās robežas par rādiusa lielumu:

$$r_\lambda = \frac{m g_e c}{e B}, \quad (2.2)$$

kur  $m$  – elektrona masa,  $g_e$  – elektrona ātrums,  $e$  – elektrona lādiņš,  $c$  – gaismas ātrums,  $B$  – magnētiskais lauks.

Savukārt joni var „atrauties” no elektroniem tikai par lielumu:

$$r_d = \left( \frac{T}{4\pi \rho e^2} \right)^{1/2}, \quad (2.3)$$

kur  $T$  – plazmas temperatūra.

Rezultātā plazmas samazināšanās raksturīgo attālumu var noteikt kā:

$$r_0 = r_\lambda + r_d.$$

Izanalizēts paātrinātās difūzijas mehānisms, kas tiek novērots gadījumos, kad ir liela dažādu metālu piemaisījumu koncentrācija ņemot vērā to mijiedarbību. Mijiedarbojoties piemaisījumu atomiem tajā skaitā notiek arī atsevišķu piemaisījuma atomu „izstumšana” no detaļas virsējā slāņa materiāla dziļumā.

Piemaisījumu mijiedarbība noved pie ķīmiskā potenciāla izmaiņām par lielumu:

$$\Delta\mu = \varepsilon C, \quad (2.4)$$

kur  $C$  – piemaisījumu koncentrācija, atomu daļas;  $\varepsilon$  – konstanta, kas raksturo piemaisījumu atomu mijiedarbību. Gadījumā, kad notiek piemaisījumu atomu savstarpējā atgrūšana,  $\varepsilon > 0$ .

Ķīmiskā potenciāla gradients izsauc spēka darbību uz piemaisījuma atomu:

$$F = - \frac{d(\Delta\mu)}{dx}.$$

Šajā gadījumā piemaisījumu atomu difūzijas vienādojumu var izteikt kā:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K \frac{\partial}{\partial x} \left( C \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (2.5)$$

kur  $D$  – difūzijas koeficients;  $K = D\varepsilon/T$ .

Palielinoties piemaisījumu koncentrācijai ( $C > 1 \dots 3$  atoma daļu, %) vienādojuma (2.5) otrais saskaitāmais būs lielāks par pirmo, kas nozīmē, ka būtiski palielinās piemaisījumu pārese.

Šajā gadījumā vienādojumu (2.5) var reducēt uz lineāro difūzijas vienādojumu:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\partial}{\partial x} \left( C \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (2.6)$$

Vienādojumam (2.6) pie noteiktas uz virspusi virzītas piemaisījumu plūsmas

$$KC \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\theta$$

ir risinājums:

$$C = \left( \frac{\theta^2 t}{K} \right)^{1/3} f \left( \frac{x}{x_e} \right), \quad (2.7)$$

kur  $x_e = \varepsilon \left( \frac{\theta^2 t}{T} \right)^{1/3}$  – piemaisījumu atomu iekļūšanas dziļums, kas palielinās, pieaugot uz

virsmu virzītai piemaisījumu plūsmai  $\theta$ .

Piemaisījumu iekļūšanas dziļums var vairākkārt pārsniegt iekļūšanas dziļumu pie parastās difūzijas.

Tādejādi, dažādu metālu piemaisījumu klātbūtnē pie daudzkomponentu pārklājumu nogulsnēšanas ar kombinētās metodes palīdzību ir jānovērtē pie nogulsnēšanas procesa intensifikācijas, t.i. pie uzputināšanas ātruma palielināšanās un pie vienmērīgākas pārklājuma struktūras radīšanas, pie tā cietības un adhēzijas stipruma palielināšanās. Pie tam pārklājumiem, kuri ir iegūti ar kombinētās metodes palīdzību, ir jābūt tirākiem (tiek samazināta "pilienu fāzes" ietekme) dēļ papildu magnetronu izsmidzināšanas izmantošanas.

## 2.2. Lēmumu pieņemšanas teorija, novērtējot triboelementu ar nodilumizturīgiem pārklājumiem kvalitāti

Lēmumu par triboelementa ar nodilumizturīgu pārklājumu derīgumu tālākajai ekspluatācijai var pieņemt, piemēram, uz informatīvo parametru, kurus reģistrē, kontrolējot detaļu ar vienu no nesagraujošās kontroles metožu (ultraskaņas vai akustiskās emisijas (AE)) palīdzību, analīzes pamata.

Pie tam jāatzīmē, ka lēmuma pieņemšanas process par triboelementu pārklājumu kvalitāti nav vienkārša darbība, kas aprobežojas ar dažādu diagnosticēšanas parametru

salīdzināšanu. Bez zināšanām par materiāla strukturālo izmaiņu fiziku un defektu rašanās avotiem, to izplatīšanas mehāniku, ir nepieciešams pilnībā izmantot matemātiskās statistikas un varbūtības teorijas likumus.

Izstrādājumu AE kontroles gadījumā aparātūra reģistrē dažas signālu  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  informatīvā parametra vērtības. Apzīmēsim ar  $X$  vektora  $x$  iespējamo komponentu vērtību kopumu. Kopā  $X$  var noteikt funkcijas  $W(x/H_0)$  un  $W(x/H_1)$ , kas apraksta attiecīgi kontrolējamās partijas bezdefektu un defektīvo izstrādājumu vērtības  $x$  sadalījuma nosacītās varbūtības (vai varbūtību biežumu). Šie likumi tiek noteikti teorētiski vai eksperimentāli, kontrolējot divas pietiekami lielas izstrādājumu partijas, katra no kurām sastāv no attiecīgi bezdefektu un defektīviem izstrādājumiem. Uz kontroles procesā reģistrētā kopuma  $x$  pamata var pieņemt divas hipotēzes:

- 1) hipotēze  $H_0$  – kopums  $x$  ir iegūts no izlases, kura atbilst sadales likumam  $W(x/H_0)$ , un attiecīgi, kontrolējamajam izstrādājumam nepiemīt defekti;
- 2) hipotēze  $H_1$  – kopums  $x$  ir iegūts no izlases, kura atbilst sadales likumam  $W(x/H_1)$ , un kontrolējamajam izstrādājumam piemīt defekti.

Atbilstoši defektu atklāšanas uzdevumam, kopa  $X$  jāsadala apakškopās  $X_0$  un  $X_1$ . Izstrādājums tiek brāķēts, ja  $x$  nokļūst apgabalā  $X_1$ , un tiek atzīts par derīgu, ja  $x$  pieder  $X_0$ . Tādējādi, lēmuma pieņemšanas kārtula par kontrolējamā objekta kvalitāti (brāķēšanas kārtula) izpaužas kā robežas noteikšana starp kopām  $X_0$  un  $X_1$ . Kopas  $X$  sadalīšana kopās  $X_0$  un  $X_1$  tiek veikta saskaņā ar dažādām lēmumu pieņemšanas kārtulām (kritērijiem). Viena vai cita kritērija izmantošanu nosaka apriorās informācijas esamība par kontrolējamiem izstrādājumiem.

Vispārējā gadījumā brāķēšanas kārtulu izteiksim kā attiecību:

$$\lambda(x) = W(x|H_1)/W(x|H_0) \underset{H_0}{\overset{H_1}{<}} \lambda_0, \quad (2.8)$$

kur  $\lambda(x)$  – universāls raksturlielums, kas apraksta defekta esamības varbūtību un kuru sauc par ticamības attiecību;  $\lambda_0$  – tā kritiskā vērtība, kuru nosaka izmantojamais lēmuma pieņemšanas kritērijs. Ticamības attiecība satur visu pieejamo informāciju par defekta klātbūtni, kura parādās diagnostisko mērījumu rezultātā.

Zinot  $\lambda(x)$ , var atrast defekta klātbūtnes vai neesamības varbūtību. Pie  $\lambda(x) > \lambda_0$  tiek pieņemts lēmums (hipotēze)  $H_1$  par izstrādājuma brāķēšanu, pie  $\lambda(x) < \lambda_0$  – hipotēze  $H_0$  par tā derīgumu.

Lemjot par izstrādājuma defektivitāti, ir iespējamas divu veidu kļūdas. Pirmā veida kļūda (pārbrāķēšana) – derīga izstrādājuma brāķēšana, tas ir, hipotēzes  $H_1$  pieņemšana, kad pareiza ir hipotēze  $H_0$ . Otrā veida kļūda (neizbrāķēšana) – tiek atzīti par derīgiem izstrādājumi, kuriem ir nepieļaujams defekts, tas ir, hipotēzes  $H_0$  pieņemšana, kad pareiza ir hipotēze  $H_1$ .

Lai pie fiksēta diskriminācijas  $D$  līmeņa reģistrējamo akustisko signālu līmenis ir  $\Delta k$ . Jāpieņem lēmums par triboelementa pārklājumu defektivitāti. Pie tam ir zināms, ka varbūtības sadalījuma blīvums  $\Delta k$  bezdefektu izstrādājumiem tiek pakļauts viensusējam normāla sadalījuma likumam ar vidējo  $\overline{\Delta k}_0$  un dispersiju  $S_0^2$ , bet defektīvu izstrādājumu gadījumā viensusējam normāla sadalījuma likumam ar vidējo  $\overline{\Delta k}_1$  un dispersiju  $S_1^2$ .

Lēmuma pieņemšana par izstrādājuma derīgumu nozīmē pārbaudi, vai hipotēzes  $H_0$  vērtība  $\Delta k$  ir iegūta no sadalījuma:

$$W(\Delta k | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \exp\left(-\frac{[\Delta k - \overline{\Delta k}_0]^2}{2S^2}\right), \quad \Delta k > 0,$$

un kontrolējamajam izstrādājumam nepiemīt defekti, pret alternatīvu par to, ka  $\Delta k$  ir iegūts no sadalījuma:

$$W(\Delta k | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \exp\left(-\frac{[\Delta k - \overline{\Delta k}_1]^2}{2S^2}\right), \quad \Delta k > 0,$$

un, attiecīgi, kontrolējamo izstrādājums ir defektīvs. Pie tam tiek pieņemta hipotēze  $H_1$  par izstrādājuma defektivitāti, ja reģistrētajam signālu līmenim  $\Delta k$  atbilst nevienādība:

$$\lambda(\Delta k) = W(\Delta k | H_1)/W(\Delta k | H_0) \geq \lambda_0. \quad (2.9)$$

Pārbrāķēšanas varbūtība ir saistīta ar reģistrējamo signālu sliekšņa vērtību  $\Delta k$  ar attiecību:

$$P_p = \int_{\Delta k_0}^{\infty} W(\Delta k | H_0) d\Delta k = 1 - \Phi\left(-\frac{\Delta k_0 - \overline{\Delta k}_0}{S}\right),$$

kurā  $\Phi(\Delta k) = \left(1/\sqrt{2\pi}\right) \int_{-\infty}^{\Delta k} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  - kļūdu integrālis.

Ja tiek noteikta vērtība  $P_p$ , tad no (2.9) atrodam defektivitācijas sliekšni:

$$\Delta k_0 = \overline{\Delta k}_0 + \delta S_0, \quad (2.10)$$

kur  $\delta$  – viensusējais tolerances koeficients, kurš ir atkarīgs no mērījumu daudzuma, notikuma  $\Delta k < \Delta k_0$  pieņemtā nozīmības līmeņa  $q$  un  $\Delta k$  trāpījuma dotajā diapazonā ticamības varbūtības;  $S_0$  – selektīvā vidējā kvadrātiskā novirze;  $\overline{\Delta k}_0$  – selektīvā vidējā parametra vērtība.

Tādējādi, ja pie AE aparātūras fiksēta diskriminācijas līmeņa triboelementa ar pārklājumu nesagraujošās kontroles procesā ir reģistrēts signāls ar līmeni  $\Delta k \geq \Delta k_0$ , tad nevienādība (2.12) ir patiesa un izstrādājums tiek brāķēts, pretēja gadījumā izstrādājums tiek atzīts par derīgu. Varbūtība atzīt brāķētu izstrādājumu par derīgu šai gadījumā ir:

$$P_n = \int_0^{\Delta k_0} W(\Delta k | H_1) d\Delta k = \Phi\left(\delta - \frac{\overline{\Delta k}_1 - \overline{\Delta k}_0}{S_0}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta k_1}{S_0}\right) - 1. \quad (2.11)$$

### 3. JONU PLAZMAS PĀRKLĀJUMU RADĪŠANAS UN TO FIZIKĀLI-MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU NOVĒRTĒŠANAS EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU METODES UN LĪDZEKĻI

Dotajā nodaļā ir iekļautas 6 sadaļas, kuras ir veltītas jonu plazmas vakuuma pārklājumu eksperimentālo pētījumu un to fizikāli mehānisko īpašību novērtēšanas metodoloģijas izstrādāšanai. Ar nolūku paaugstināt nanostrukturizēto aizsargpārklājumu radīšanas pētījumu efektivitāti un pilnveidot to tehnoloģiskos procesus ir doti eksperimentālo iekārtu raksturojumi un piedāvāti modernizācijas risinājumi.

### 3.1. Nodilumizturīgo nanostrukturēto daudzkomponentu pārklājumu radīšanas eksperimentālo pētījumu aprīkojums un metodika

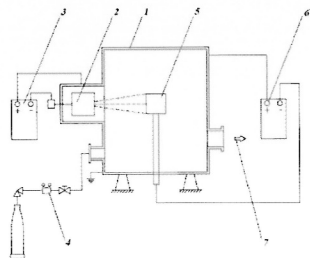
Pārklājumu radīšanas process vakuumā sastāv no trijiem posmiem: atomu, molekulu vai jonu ģenerācijas, to pārvešanas uz izstrādājuma virsmas un pārklājuma ar vajadzīgajiem parametriem radīšanas uz izstrādājuma virsmas. Pārklājumu sastāvs un struktūra ir atkarīgi no izejmateriāliem, kā arī no uzklāšanas metodēm un režīmiem, kuri nodrošina nepieciešamo materiāla energomasu pārnesi.

*Tehnoloģiskā iekārta*, kura realizē jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas metodi, ir vakuuma iekārta «NNV-6.6-II», kura sastāv no darba kameras ar iebūvēto plazmas iztvaikotāju un lokizlādes iniciācijas sistēmas, elektriskās barošanas avota, gāzes stacijas darba gāzes ievadīšanai kamerā, kontroles mēraparātiem un vadības aparatūras (3.1.att.).

Iekārtas pamatelements ir vakuuma uzputināšanas kamera ar uzputināmā materiāla avotiem un grozāmu darbāgaldu ar nostiprinātām apstrādājamām detaļām uz tā. Iekārta aprīkota ar vakuuma atsūkņēšanas sistēmu, darba gāzes padevi, dzesēšanu un elektropadevi.

Materiāla iztvaicētāja nogulsnešana uz detaļu virsmām notiek nepārtrauktā elektriskā un magnētiskā lauka ietekmē, kuri intensificē uzputināšanas procesu, paaugstina pārklājuma blīvumu un adhēziju ar pamatni.

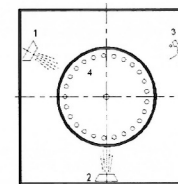
Tā kā vakuuma iekārtai «NNV-6.6-II» ir trīs iztvaicētāji, ir iespējams veidot dažāda tipa un kombināciju daudzslāņu pārklājumus. Piemēram, viens no iztvaicējamajiem katodiem var būt sakausējums, bet divi citi – dažādi metāli. Atkarībā no mērķa, mainot katodu materiālus un iztvaicēšanas secību, intensitāti un ilgumu, ir iespējams sasniegt nepieciešamo rezultātu.



3.1. att. Jonu – plazmas pārklājumu radīšanas vakuumeiārtas principālā shēma:  
1 – vakuumkamera, 2 – iztvaikotāja katods, 3 – zemsprieguma barošanas avots, 4 – leģējošās gāzes padeves sistēma, 5 – apstrādājamais izstrādājums, 6 – augstsprieguma barošanas avots, 7 – leģējošās gāzes atsūkņēšana

### 3.2. Iekārtas NNV-6.6-II modernizācija vakuuma jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas tehnoloģiskā procesa pilnveidošanai

Lai paplašinātu vakuuma iekārtas darbības iespējas tika veikta tās modifikācija - viena no esošo elektroloka iztvaicētāju vietā tika uzstādīts planārais magnetrona izsmidzinātājs “Magnetron 2” (3.2.att). Magnetronu izsmidzināšanas sistēmas darbības princips balstās uz magnetrona katoda virsmas izputināšanas efekta ar darba gāzes joniem, kas atrodas elektriskā un magnētiskā lauku krustojumā.



3.2.att. Iztvaicētāju atrašanās vietu shēma uz modificētās vakuuma iekārtas:  
1, 2 – elektroloka iztvaicētāji; 3 – magnetrons; 4 – rotējošs darba galds

Magnetronā uzputināšanas priekšrocība ir pilnīga pilienu fāzes neesamība, iespēja uzputināt plaša spektra materiālus, augsts materiāla izmantošanas koeficients, labas regulēšanas īpašības, augsts blīvums un vienmērība pat plāniem pārklājumiem.

Modernizācijas rezultātā, apvienojot elektroloka un magnetronā uzputināšanas metodes, radās iespēja daļēji samazināt abu metožu trūkumus, vienlaicīgi izmantojot to pamatpriekšrocības. Šī tehnoloģija ļāva samazināt pilienu fāzes veidošanos, bez ievērojamās jonu bombardēšanas efektivitātes krišanās. Pie tam, tika paplašināts uzputināmo materiālu spektrs un uzlabota to kvalitāte.

### 3.3. Materiālu un pārklājumu mikrostruktūras un ķīmiskā sastāva pētīšanas iekārtas un metodika

#### 3.3.1. Materiālu un pārklājumu mikrostruktūras pētīšanas iekārtas un metodika

Lai veiktu izveidoto pārklājumu mikrostruktūras pētījumus nanolīmenī, darbā tika izmantots skenējošais elektronu mikroskops SEM HITACHI – S3000N.

Mikroskops ir paredzēts cietu ķermeņu virsmas pētīšanai ar elektronu zondes palīdzību.

Mikroskopa maksimālā izšķirtspēja ir 3.5 nm, palielinājums 15...300000.

Elektronu mikroskops tika izmantots ne tikai mikrostruktūras pētīšanai, bet arī izveidoto pārklājumu virsmas topogrāfijas analīze. Mikroskops ļauj arī ar augstu precizitāti noteikt daudzslāņu nanostrukturēta pārklājuma biezumu.

Lai izgatavotu mikropieslēpņus, tika izmantota speciāla iekārta - «Slīpēšanas – pulēšanas darbāgalds Beta/2», kura ļāva ar augstu precizitāti veikt virsmu slīpēšanu paraugu un detaļu griezumos sekojošai materiālu un pārklājumu pētīšanai.

#### 3.3.2. Materiālu un pārklājumu ķīmiskā sastāva pētīšanas iekārtas un metodika

Radīto nanostrukturēto *pārklājumu sastāva ķīmiskā analīze*, tika veikta ar rentgenspektrālās mikroanalīzes metodes, kura ir viena no jutīgākajām analītiskajām metodēm, palīdzību. Šiem mērķiem tika izmantota energodispersionālās (EDS) mikroanalīzes rentgena sistēma BRUKER-QUANTAX 200.

QUANTAX sistēmas komplektā ietilpst rentgena detektors, signālu apstrādes bloks ar integrētu skenēšanas sistēmu un dators.

Sistēma ļauj iegūt informāciju par elementu sastāvu ar telpisko izšķiršanu 1 μm un noteikšanas robežu masas procenta desmitdaļās.

Sistēma BRUKER – QUANTAX 200 ir apgādāta ar programmpaketi ESPRIT, kurai ir intuitīva saskarne, tajā ietilpst kvantitatīvā analīze, zemo enerģiju līniju paplašināta bibliotēka, kartēšana utt.

### 3.4 Materiālu un pārklājumu mikrociētības mērīšanas metodika un līdzekļi

Mikrociētību (atsevišķu sakausējuma vai materiāla struktūras sastāvdaļu ciētība, kā arī virsmas slāņu ciētība) nosaka pēc pretestības, kas rodas dimanta piramīdu iespiežot materiālā nelielu slodžu iedarbībā. Mikrociētības mērīšanai tika pielietotas PMT-3 (noslogojuma diapazons - 0,0196...4,9 N) un MTI-3M (noslogojuma diapazons - 0,05...10,0 N) tipa ierīces.

*Interferences mikrociētības mērītājs PMT-3* ļauj veikt dažādu materiālu mikrociētības mērījumus pēc dimanta piramīdas (Vikersa piramīdas) iespiešanas dziļuma.

### 3.5 Detaļu ar pārklājumu virsmas raupjuma, makroģeometrisko formas noviržu un ģeometrisko raksturojumu mērīšanas metodika un līdzekļi

#### 3.5.1 Detaļu virsmas raupjuma un makroģeometrisko formas noviržu parametru vispārējs raksturojums

Darbā ir izanalizēti pamattermini un apzīmējumi, kuri attiecas uz detaļu 2D un 3D virsmas raupjumu un makroģeometriskām formas novirzēm atbilstoši ISO standartiem.

Apskatītas četras 3D parametru pamatkategorijas, kuras attiecas uz virsmas stāvokļa analīzi:

- *Amplitūdas parametri* (Amplitude parameters, Height);
- *Telpiskie parametri* (Spacing parameters, Spatial);
- *Funkcionālie parametri* (Function – Bearing Area);
- *Hibrīda parametri* (Hybrid parameters, Height & Spatial).

Darbā ir parādīti 3D parametru ietekmes uz materiālu īpašībām un mašīnu konstrukcijas elementu tehniskiem raksturojumiem salīdzinošās analīzes rezultāti.

#### 3.5.2. Paraugu un detaļu virsmas raupjuma mērīšana ar kontaktiērci – testeris

Praugu un detaļu virsmas materiāla raupjuma mērīšana tika veikta ar kontaktiērci – testeris SURFACE ROUGHNESS TESTER TRI00.

Ierīce – testeris ļauj veikt raupjuma bāzes parametru Ra un Rz mērījumus sekojošā diapazonā: Ra: 0.05 – 15.0 μm; Rz: 0.1 – 50.0 μm ar mērīšanas kļūdu ± 6%. Virsmas ģeometrisko parametru pārvēršana elektiskajos signālos notiek ar piezoelektriskā pārveidotāja dimanta adatu ar rādiusu 5±1 μm palīdzību. Skenēšanas trases garums ir 6 mm, raupjuma parametru vērtības novērtēšanas darba apgabala garums – 1.25 mm/ 4.0 mm/5.0 mm. Skenēšanas ātrums ir 1 mm/sek. Ierīce saskaņā ar ISO un DIN standartu prasībām ļauj veikt mērījumus uz plakanām virsmām, cilindru ārējām virsmām un slīpām virsmām. Tai ir iekšējās kalibrācijas funkcija.

#### 3.5.3. Paraugu un detaļu ar pārklājumu virsmas raupjuma un makroģeometrisko formas noviržu mērīšanas ar kontakta profilogrāfu-profilometru metodika

Pārklāto un nepārklāto paraugu virsmas ģeometrisko parametru un raupjuma mērīšana tika veikta ar uzņēmuma Taylor Hobson kontakta profilogrāfu-profilometru «Form Talysurf Intra 50».<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pētījumi tika veikti uz RTU Transporta un mašīnzinību fakultātes Mašīnbūves tehnoloģijas institūta bāzes kopējo projektu ar Transportmašīnu tehnoloģiju institūtu „Industriālās tehnoloģijas prototipa izstrāde daudzkomponentu nanostrukturētu jonu-plazmas nodilumizturīgu pārklājumu iegūšanai” un „Rūpniecisko izstrādājumu daudzkomponentu nanostrukturēto aizsargājošo pārklājumu izveides tehnoloģiju izstrāde” ietvaros.

Šī iekārta ļauj vienlaicīgi mērīt parauga virsmas izmēru, formu un tekstūru.

Ierīces izšķirtspēja ir 16 nm 1 mm diapazonā. Mērījumi tika veikti atbilstoši standarta ISO 3274 prasībām.

Ierīce Form Talysurf Intra (3.3.att.). Ļauj veikt kā virsmas profila 2D, tā arī virsmas apgabala telpiskus 3D mērījumus ar augstu izšķirtspēju (līdz 3.2 nm). Mērīšanas kļūda, piemēram augstuma parametriem, ir 2% +/-6 nm.



3.3.att. Kontakta profilogrāfa-profilometra darba principiālā shēma

Vispirms, lai iegūtu virsmas raupjuma parametra orientējošo vērtību, piemēram, Ra vai Rz, iegūst brīvi izvēlētu virsmas apgabala profilogrammu. Pie tam mērīšanas kļūda Ra vairākam tehnisko virsmu nepārsniedz 5...10%. Pēc parametra vērtības iegūšanas saskaņā ar esošajiem standartiem nosaka bāzes garuma vērtību.

Šajā darbā veikto mērījumu bāzes garums bija 0.25 mm, virsmas darba laukuma mērījumu veikšanai izmērs bija 5x5 mm. Katra parauga kopējais mērīšanas punktu skaits bija 140625.

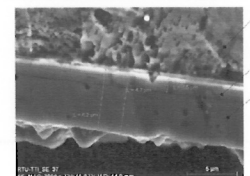
#### 3.5.4. Pārklājuma biezuma mērīšanas iekārtas

Nesagraujošajai pārklājuma biezuma ekspresmērīšanai tika izmantotas iekārtas "Coating thickness measurement eXacto®" un "Coating thickness measurement MiniTest™ 600FN".

Iekārtu "eXacto®" un "MiniTest™ 600FN" darbība balstās uz magnētiski induktīvo (modeļi F) vai virpuļstrāvu (modeļi N) darbības principiem. FN modeļos tiek izmantoti abi darbības principi.

Iekārta "eXacto®" ļauj veikt pārklājuma biezuma mērīšanu diapazonā: F-probe: 0...3000 μm; N-probe: 0...2000 μm; FN-probe: 0...2000 μm ar precizitāti ±(2 μm+3% no rādījuma).

Lai precīzi izmērītu pārklājuma biezumu mikro- vai nanolīmenī (izšķirtspēja - 3.5 mm) (3.4.att.), tika lietots skenējošais elektronu mikroskops.



3.4.att. Daudzslāņu nanostrukturēta pārklājuma biezuma noteikšanas rezultāti: 1-pamatmateriāls; 2 – pārklājuma pirmais slānis; 3 – pārklājuma otrais slānis

### 3.6. Pārklājumu tribotehnisko īpašību eksperimentālo pētījumu aprīkojums un metodika

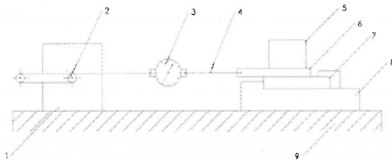
#### 3.6.1. Pārklājumu berzes koeficienta noteikšana

Lai noteiktu pārklājumu berzes koeficientu, tika izmantota speciāla iekārta, kuras shēma ir attēlota 3.5.att.

Kā eksperimentālie paraugi tika izmantotas tērauda plāksnes ar izmēriem 100x30x1,5 mm.

Par pretparaugiem tika izmantotas četras tērauda plāksnes, pēc izmēriem identiskas ar pētāmiem objektiem. Eksperimentos tika izmantoti divi pretparaugi ar titāna nitrīda (TiN) pārklājumu, pie kam viena parauga virsmu pēc pārklājuma uzputināšanas pulēja (vidējā raupjuma parametra vērtība  $R_a=0,15 \mu\text{m}$ ). Pretparaugu ar nepulētu virsmu vidējā raupjuma vērtība atbilda  $R_a=0,62 \mu\text{m}$ . Eksperimentā tika lietoti arī 2 pretparaugi bez pārklājuma, pie tam viena no tiem vidējā virsmas raupjuma parametra vērtība  $R_a$  pēc pulēšanas atbilda 0,11  $\mu\text{m}$ , bet otra (bez pulēšanas)  $R_a=0,45 \mu\text{m}$ .

Berzes koeficientu nosaka sausās berzes (bez smērvielām) gadījumam.



3.5.att. Pārklājumu tribotehnisko īpašību pētīšanas eksperimentālās iekārtas shēma:

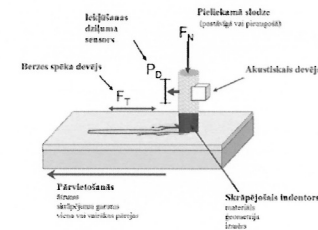
1 – spriegojuma ierīce, 2 – vārpsta, 3 – dinamometrs, 4 – trose, 5 – slogs, 6 – paraugs ar pārklājumu, 7 – pretparaugs, 8 – turētājs, 9 – pamatne.

#### 3.6.2. Pārklājuma adhēzijas izturības ar pamatmateriālu eksperimentālā novērtēšana

Viens no visdrošākajiem pārklājuma adhēzijas ar pamatni noteikšanas paņēmieniem ir pārklājuma virsmas skrāpēšana ar Rokvella veida dimanta indentoru pie nepārtraukti pieaugošas slodzes.

Pārklājumu adhēzijas īpašību pētījumi mikro- un nano- līmeņos tika veikti ar skrāpējuma testera CSM Revetest (CSM Instruments) (normālā spēka diapazons - 0,5...200 N; maksimālais berzes spēks – 200 N; maksimālais skrāpējuma garums - 70 mm; izšķiršana pēc dziļuma – 1,5 nm) palīdzību, izmēģinot paraugus un izstrādājumus ar skrāpēšanas palīdzību. Ierīce ir paredzēta pārklājumu adhēzijas stiprības, izturības pret skrāpēšanu un sagraušanas mehānismu noteikšanai.

Indentora uzgali (dimanta vai volframa karbīda) (sk.3.6.att.) automātiskajā režīmā pārvieto pa parauga virsmu ar pastāvīgas, pakāpeniskas vai lineāri pieaugošas normālās slodzes  $F_N$  pielikšanu. Lai noteiktu pārklājuma adhēzijas stiprumu, slodzi palielina lineāri noteiktajā diapazonā.



3.6.att. Ierīces CSM Revetest Xpress darba principiālā shēma pārklājumu adhēzijas stipruma izmēģinājumiem

Izmēģinājumu laikā veic dažādu fizisko parametru reģistrāciju atkarībā no pieliktās slodzes un skrāpējuma garuma. Pārklājuma adhēzijas vai kohēzijas sagraušanas momentu fiksē pēc izmēģinājumiem vizuāli ar optiskā mikroskopa, kurš ir apgādāts ar ciparu kameru, palīdzību, kā arī pēc viena no pieciem parametriem izmaiņas:

- akustiskās emisijas,
- berzes spēka  $F_t$ ,
- berzes koeficienta,
- indentora iekļūšanas dziļuma.

Pie noteiktās kritiskās slodzes sāksies pārklājuma sagrūšana. Kritiskās slodzes sasniegšanas moments tiek ļoti precīzi fiksēts pēc akustiskās emisijas (AE) signālu reģistrācijas rezultātiem. AE signālu reģistrācijai tika izmantota skrāpēšanas testerī iebūvēta portatīvā akustiskās-emisijas ierīce (Vallen Systeme GmbH), kas ļauj fiksēt akustiskās emisijas parametrus. AE kanāla frekvenču diapazons ir no 100 KHz līdz 1 MHz. Signāla sākotnējai pastiprināšanai tika pielietots pirmspastiprinātājs ar pastāvīgu pastiprināšanu 26 dB frekvenču diapazonā no 100 KHz līdz 1 MHz. AE sensors SE 150-M (Dunegan Engineering Company) ir konstruktīvi iebūvēts sloģošanas ierīcē. Eksperimentu gaitā tika fiksēta AE signālu amplitūda.

Izmēģinājumu rezultātā nosaka minimālo (kritisko) slodzi ( $F_c$ ), kura noved pie pārklājuma sagrūšanas. Dotā metodika atbilst starptautiskajam standartam ISO 20502.

#### 3.7. Daudzslāņu pārklājumu materiāla cietības un elastības īpašību pētīšana ar nanoindentēšanu

Nanoindentēšanas (NI) metode ļauj veikt materiālu un pārklājumu dažādu fizikāli-mehānisko īpašību novērtēšanu nanolīmenī: cietības  $H$ , materiāla elastības moduļa  $E$  (Junga moduļa) utt.

Nanocietības mērītajos tiek izmantota plānu pārklājumu cietības mērīšanas metode, kura pamatojas uz indentora iespiešanas slodzes un dziļuma nepārtrauktu reģistrāciju.

Daudzslāņu pārklājumu materiāla cietības un elastības moduļa pētījumi tika veikti uz nanocietības mērītāja (nanoindentora) Nano-Hardness Tester (NHT) (CSM Instruments) (normālā spēka diapazons - 0,1...500 mN; izšķiršana pēc slodzes -0,04  $\mu\text{N}$ ; maksimālais dziļums - 200  $\mu\text{m}$ ; izšķiršana pēc dziļuma - 0,04 nm) saskaņā ar standartiem ISO14577 un ASTM E 2546-07.

Ierīces funkcionēšanas princips ir sekojošs: indentora uzgalis, kurš ir perpendikulārs parauga virsmai tiek ieguldīts paraugā ar pakāpeniski picaugošas slodzes palīdzību, kamēr tā sasniedz iepriekš noteiktu vērtību.

Pēc tam slodzi pakāpeniski samazina, līdz notiek pilnīga vai daļēja materiāla relaksācija.

Nanocietības mērītājā NHT tiek izmantots modificēts Berkoviča indentors, kuram ir pareizas trīskaldņu piramīdas forma ar vienādmalu trijstūra formas pamatni.

Mērījumi tika veikti nepārtrauktā indentēšanas režīmā, bet cietības aprēķinu veica pēc Oliver-Pharr metodes.

Indentora noslodzes spēks tika mainīts diapazonā 0,5...20 mN, bet noslodzes – atslodzes ātrums attiecīgi diapazonā 1...40 mN/min.

#### 4. NODILUMIZTURĪGO VAKUUMA JONU-PLAZMAS PĀRKLĀJUMU UZKLĀŠANAS TEHNOLOĢISKO PROCESU EKSPERIMENTĀLĀ PĒTĪŠANA UN OPTIMIZĀCIJA

##### 4.1. Jonu-plazmas pārklājumu uzklāšanas uz paraugiem un izstrādājumiem no konstrukcijas materiāliem ar kondensācijas un jonu „bombardēšanas” metodi tehnoloģisko procesu pētīšana

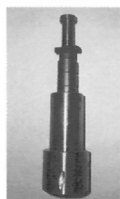
Viena no visperspektīvākajām nanostrukturēto jonu - plazmas pārklājumu radīšanas metodēm vakuumā ir *vielas kondensācijas metode ar jonu "bombardēšanu"* (KJB), kas ir attiecināma uz pārklājumu fiziskās nogulsnešanas metožu kategoriju (PVD - Physical Vapor Deposition).

KJB procesu var attēlot divu sekojoši noriotošu procesu veidā:

- apstrādājamās detaļas virsmas jonu "bombardēšanas";
- pārklājuma nogulsnešanās.

Tīru metālu un to sakausējumu uzputināšanai kamerā tiek ievadīts argons, lai iegūtu, piemēram, nitrīdus, karbīdus – reakcijas gāze (slāpekļis, metāns u.c.). Argona vidē iztvaicējot titānu uz detaļas nogulsnešas tīrs titāns atomu un šķīdri metāla pilieni veidā. Uzputināšanas kamerā ionizējot slāpekli notiek plazmas – ķīmiskās reakcijas, kuru rezultātā izveidojas titāna nitrīda savienojumi, kuri arī veido pārklājumu.

Kā izpētes objekts tika izmantoti eksperimentālie paraugi - tērauda plāksnes ar izmēriem 100x30x1,5 mm un dīzeļa dzinēja augstspiediena sūkņa hidro – degvielas plunžera precīzijas pāris (PP). Precīzijas pāris sastāv no iekšējā elementa – plunžera un ārējā – čaulas (4.1.att.).



a)



b)

4.1.att. Dīzeļa dzinēja augstspiediena sūkņa hidro – degvielas plunžera precīzijas pāris (a) un plunžeris (b)

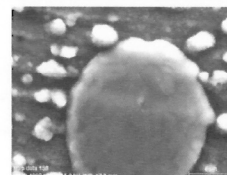
Uz pētāmajiem paraugiem vispirms tika uzklāti daudzkomponentu aizsargpārklājumi ar sekojošiem uzsmidzināšanas režīmiem:

- *atbalstspriegums* -  $U_{pam} = 120$  V,
- *strāvas stiprums* uz katoda - iztvaikotāja -  $I_{itv} = 110$  A
- *vakuumā pakāpe* uzsmidzināšanas kamerā – ne mazāk par  $1,33 \times 10^{-1}$  Pa

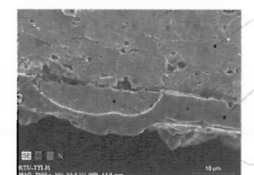
Darba gāzu attiecība pēc tilpuma (slāpekļa  $N_2$  pret argonu  $Ar$ ) tika variēta atsevišķām paraugu grupām sekojošos variantos: 1:1, 2:1, 3:1 utt. līdz 12:1.

Viens no metodes būtiskajiem trūkumiem ir „pilienu fāzes” esamība.

Kā ir redzams no 4.2.attēla pārklājums satur dažādu izmēru “pilienu fāzes” daļiņas, kā arī nelielu krāteru daudzumu.



4.2.att. Pārklājuma, kas tika iegūts ar KJB metodi, virsmas mikropograjība

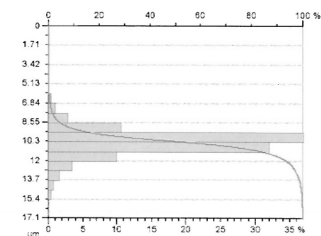


4.3.att. Parauga ar pārklājumu materiāla struktūra un mikrorentgenspektālās ķīmiskā sastāva analīzes rezultāti: 1 - pamatmateriāls; 2 – pārklājums; 3 – pārklājuma defekts («pilienu fāzes» veidošanās)

Dažos gadījumos lielu izmēru „pilienu fāzes” daļiņas izrādījās „iespiestas” pārklājumā visā tā biezumā (sk.4.3.att.).

„Pilienu fāzes” izmēru salīdzinošā analīze parādīja, ka to lielākajai daļai (25%) pilienu izmēri (pielīdzinātais diametrs) ir diapazonā 1...1,5  $\mu$ m, būtiskai pilienu daļai (17%) - diapazonā 1,5...2,5  $\mu$ m. Pārklājumā atklāto pilienu maksimālais izmērs sastādīja 16...18  $\mu$ m. To relatīvais daudzums pie tam nepārsniedza 2%.

Tika noteikts, ka pārklājumiem, kas tika iegūti ar KJB, atsevišķu „pilienu fāzes” piķu augstums sasniedza 15,4  $\mu$ m (sk. 4.4.att.) pie vidējās raupjuma parametru vērtības  $Sa=0,778$   $\mu$ m un  $Ra=0,688$   $\mu$ m. Turklāt pārklājumu biezums vidēji bija vienāds ar 15,0  $\mu$ m.



4.4.att. Pārklājuma virsmas atbalsta līkne un virsotņu sadalījuma histogramma (KJB metode)

#### 4.2. Nodilumizturīgu jonu-plazmas nanostrukturēto daudzkomponentu pārklājumu uzklāšanas ar kombinēto metodi tehnoloģiskā procesa optimizācija

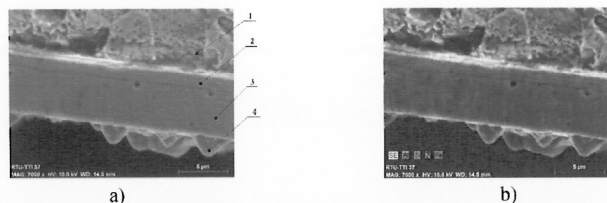
Lai novērstu KJB metodes trūkumus, eksperimentālajos pētījumos papildus tika pielietota arī magnetronā jonu izsmidzināšanas (MU) metode.

Uzsmidzinot ar magnetronu, ir iespējams veidot praktiski jebkuru metālu un sakausējumu pārklājumus. Atkarībā no darba atmosfēras sastāva, ir iespējams veidot dažādu materiālu oksīdu, nitrīdu, karbīdu un sulfīdu pārklājumus, tai skaitā tādus pārklājumus, kurus nav iespējams iegūt, pielietojot termiskās iztvaicēšanas metodi.

Kombinētās uzputināšanas gadījumā iekārta «NNV-6.6-11» tika aprīkota ar diviem gala loka iztvaicētājiem ar konusa katodiem 2 (Ti un Al) un magnetronu izsmidzināšanas katodu (Al).

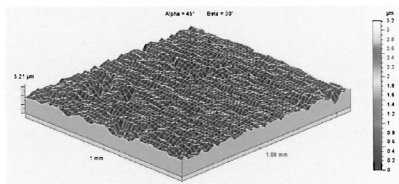
Viens no daudzkomponentu divslāņu nanostrukturētā pārklājuma, kas ir iegūts ar kombinēto metodi, piemēri ir sniegts 4.5. att.

No attēliem ir redzams, ka pilienu fāzes ietekme uz pārklājuma veidošanās procesu tika būtiski samazināta (ir novēroti atsevišķi pilieni, bet ar daudz mazākiem izmēriem), pārklājuma struktūrai ir homogēns raksturs.

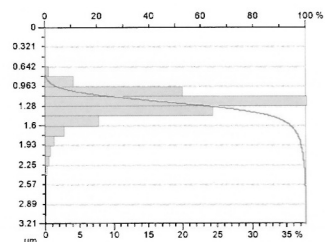


4.5.att. Izstrādājuma divslāņu pārklājuma materiāla struktūra (a) un materiāla ķīmiskā sastāva mikro-rentgenspektrālās analīzes rezultāti (b): 1 – pamatmateriāls; 2 – pārklājuma iekšējais slānis; 3 – pārklājuma ārējais slānis; 4 – „pilienu fāze”

Ar KJONMOBU metodi iegūto pārklājumu kopējais biežums mainījās robežās 5...15 μm. Kombinētās metodes pielietošanas rezultātā pārklājuma raupjums tika būtiski (4 reizēs) samazināts.



4.6.att. Pārklājuma virsmas raupjums (KJONBOMU metode)



4.7.att. Pārklājuma virsmas atbalsta līkne un virsotņu sadalījuma histogramma

Tika konstatēts, ka pārklājumiem, kas ir iegūti ar kombinēto metodi, atsevišķu „pilienu fāzes” piķu augstums sasniedza vien 2,25 μm pie raupjuma parametru vidējās vērtības Sa=0,154 μm un Ra=0,062 μm (sk. 4.6.- 4.7.att.).

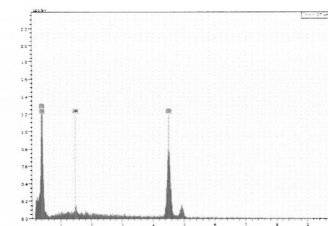
Pārklājuma iegūšana ar alumīniju (līdz 4...5% sastāva) noved pie nanokompozītu struktūras veidošanās ar kristāliskās fāzes TiN pamatā grauda izmēriem 15...20 nm.

4.1. tabulā, kā arī 4.8. attēlā parādīti divslāņu pārklājuma materiāla ķīmiskā sastāva mikro-rentgenspektrālās analīzes rezultāti.

4.1.tabula

Pārklājuma virsmas ķīmiskais sastāvs

El	AN	Series	unn. [wt.-%]	C norm. [wt.-%]	Atom. [at.-%]	C Error [%]
N	7	K-series	35.15	35.66	65.29	2.3
Al	13	K-series	0.69	0.59	0.56	0.1
Ti	22	K-series	64.16	63.76	34.15	2.8
Total:			100.00	100.00	100.00	



4.8.att. Pārklājuma virsmas ķīmiskā sastāva spektrs

#### 4.3. Jonu-plazmas nodilumizturīgu daudzkomponentu pārklājumu izveides tehnoloģija transportlīdzekļu spēka iekārtu precīzijas pāru detaļu aizsardzībai un atjaunošanai

Tehnoloģijā ir paredzēta nepieciešamu izmēru atjaunojošu un virsmas aizsargājošu pārklājumu radīšana, kas tiek uzklāta ar jonu – plazmas uzputināšanas metodi un atšķiras ar uzlabotām ekspluatācijas īpašībām (augstu cietību, paaugstinātu nodilumizturību, pazeminātu berzes koeficientu).

Izpētāmais PP darbojas diezgan sarežģītos ekspluatācijas apstākļos. Pieļaujamais PP radiālais salāgojuma salaidums nepārsniedz 2 μm.

Piedāvājamās nerūsējošā tērauda precīzijas pāru detaļu daudzslāņu nodilumizturīgā pārklājuma izveides tehnoloģijas būtība ir aizsargpārklājuma radīšana ar kombinētās uzsmidzināšanas metodes KJONBOMU palīdzību.

Tehnoloģija izceļas ar to, ka remonta laikā uz precīzijas pāru iekšējā konstruktīvā elementa tiek uzsmidzināts divslāņu pārklājums uz nitrīdu, oksīdu, metālu karbīdu un citu elementu vai to konglomerātu bāzes. Pārklājuma mainīgā biežuma iekšējo slāni ar mikrociētību līdz 10000 MPa uzklāj detaļas izmēru atjaunošanai. Ārējam aizsargslānim ar mikrociētību virs 10000 MPa piemīt paaugstināta nodilumizturība.

Šī tehnoloģija nodrošina augstākas kvalitātes pārklājumus - nozīmīgi augstāku nano- un mikrocietību un adhēziju, kā arī mazāku raupjumu un berzes koeficientu.

Saskaņā ar piedāvāto metodi precizitātes pāra remonta tehnoloģijas cikls ietver sevī sekojošus pamatētapus:

1. Atjaunošanai paredzētās detaļas izmērijumu veikšana;
2. Uzputināmā virsslāņa nepieciešamā izmēra noteikšana;
3. Pirmā, izmēra atjaunojošā slāņa jonu – plazmas uzputināšana;
4. Otrā (ārējā), paaugstinātas nodilumizturības slāņa jonu – plazmas uzputināšana;
5. Detaļas apstrāde pēc uzputināšanas;
6. Gremdvirzuļa pāra pieslipēšana;
7. Atjaunotās detaļas kontroles mērījumu veikšana.

Tādā veidā, tehnoloģiskā procesa realizācijas rezultātā, kas arī ir piedāvātās tehnoloģijas būtība, tika nodrošināta nepieciešamā salaiduma precizitāte un uzlaboti ekspluatācijas parametri. Pie tam, tiek izslēgta nepieciešamība veikt salāgotu detaļu selektīvo piemeklēšanu.

Izstrādātā tehnoloģija atšķiras ar novitāti, ko apstiprina iegūtais patents, un ļauj iegūt maza biezuma pārklājumus ar unikālām antifriktīvām īpašībām un augsto adhēziju ar pamatni.

## 5. NODILUMIZTURĪGO NANOSTRUKTURĒTO PĀRKLĀJUMU FIZIKĀLI-MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU NOVĒRTĒŠANA UN KVALITĀTES KONTROLE

### 5.1. Nanostrukturēto virsmu fizikāli-mehānisko un triboloģisko īpašību mērīšanas vienuma nodrošināšana

Turpmāk izskatāmo nanostrukturēto pārklājumu eksperimentālo metožu fizikāli-mehānisko un triboloģisko īpašību pamatā ir tā saucamā "Herca uzdevuma" par divu cietu sfēru savstarpējo deformāciju pie to saspiešanas analītiskais risinājums.

Herca modeļa izmantošana indentora un parauga mijiedarbības aprakstīšanai ir korekta tai gadījumā, kad virsmas spēki ir neievērojami salīdzinot ar summārajiem mijiedarbības spēkiem, un kontakta rādiusa laukums ir būtiski mazāks par indentora rādiusu.

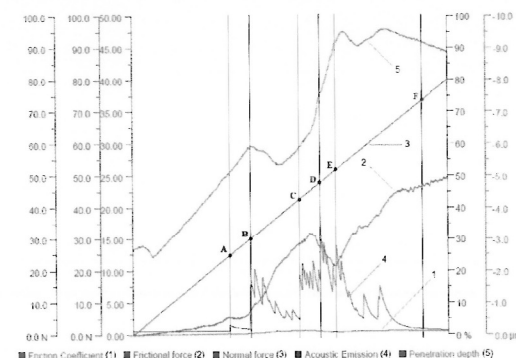
### 5.2. Nodilumizturīgo nanostrukturēto jonu - plazmas pārklājumu adhēzijas stipruma eksperimentālais novērtējums

Adhēzijas stipruma, izturības pret skrāpējumiem novērtējums, kā arī iegūto nodilumizturīgo pārklājumu sagrūšanas mehānisma pētīšana tika veikta ar skrāpējumu testera CSM Revetest Xpress. Uz pārklājuma virsmas ar sfēriskā dimanta indentora "Rokvela S" tipa ar noapaļojuma rādiusu 200 μm palīdzību tika veikti skrāpējumi ar pastāvīgi pieaugošu slodzi. Izmēģinājumu procesā tika veikti tādu fizisko parametru reģistrācija, kā akustiskā emisija, berzes koeficients, indentora iekļūšanas dziļums, normālās slodzes vērtība  $F_N$ , berzes spēks  $F_t$ .

Par pētījumu objektiem tika izmantoti eksperimentālie paraugi un gatavi izstrādājumi – precizitātes pāru plunžeri ar uzklātiem pārklājumiem. Plunžeru ar pārklājumu izmēģināšanas režīms atbilda sekojošiem nosacījumiem: slodzi uz indentoru  $F_N$  lineāri palielināja diapazonā no 0,3 līdz 80 N, noslogojuma ātrumu - 3,0 N/s, indentora pārvietošanās ātrums bija 6 mm/min, skrāpējumu garums – 3 mm.

Pārklājumu deformēšanas ar dimanta indentoru rezultāti papildus tika pētīti ar iebūvētā optiskā mikroskopa un skenējošā elektronmikroskopa SEM HITACHI – S3000N, kurš ir aprīkots ar integrēto mikroanalīzes sistēmu Bruker Quantax, palīdzību.

Iegūtie rezultāti (sk. 5.1. un 5.2.att.) ļāva izanalizēt ar KJONBOMU metodi radīto pārklājumu sagraušanas mehānismu un novērtēt to adhēzijas stiprumu.

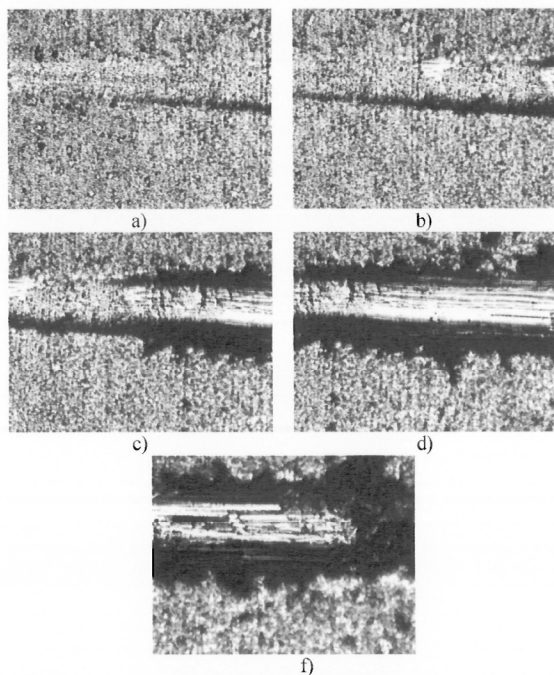


5.1.att. Sistēmas "pārklājums (TiAlN) – plunžeris (nerusējaisais tērauds)" adhēzijas izmēģinājumu rezultāti: 1 – berzes koeficients  $\mu_v$ ; 2 – berzes spēki  $F_t$ ; 3 – normālā slodze  $F_N$ ; 4 – akustiskās emisijas signālu amplitūda  $A_{AE}$ ; 5 – indentora iekļūšanas dziļums  $h$

Eksperimentālo pētījumu datu salīdzinošā analīze parādīja, ka sagraušanas mehānisma un pārklājumu adhēzijas stipruma novērtēšanas visinformatīvākais parametrs ir AE signālu amplitūda  $A_{AE}$  (skat. 5.1.att.). Pie tam berzes koeficienta  $\mu_v$  un berzes spēka  $F_t$  zmaiņu raksturs ir salīdzināms ar parametra  $A_{AE}$  izmaiņām.

Pēc AE mērījumu rezultātiem tika noteiktas slodžu vērtības, kuras atbilst pārklājumu bojājumu noteiktām stadijām. Apskatāmajā piemērā minimālā (kritiskā) slodze  $F_{Nc1}$ , kura ir vienāda ar 25,02 N, atbilst pirmajam AE amplitūdas pīķim un liecina par pirmo bojājumu rašanos sistēmas "pārklājums - plunžeris" mikrolīmenī (punkts A 5.1.att., 5.2.a.att.). Līdzās ar parametra  $A_{AE}$  vērtības būtisku pieaugumu pie  $F_{Nc1}$  sasniegšanas tiek novērota arī parametru  $\mu_v$  un  $F_t$  vērtības palielināšanās (skat. 5.1.att.), kas paaugstina secinājumu par pirmo bojājumu pārklājuma materiālā rašanos ticamību. Skrāpējuma strukturālo īpatnību salīdzinošā analīze ļauj secināt, ka noslogošanas sākumstadijā (slodze mazāka par 25,02 N) indentors praktiski neatstāj pēdas uz pārklājuma (skat. 5.2a. att.). Dimanta indentora slīdēšana pa pārklājumu notiek ar ļoti mazu berzes koeficientu (mazāku par 0,1).

Tālāka slodzes paaugstināšana noved pie daudzu pārklājuma nošķelumu rašanās, kas atainojas AE amplitūdas izmaiņu grafikā (pie slodzes  $F_{Nc2} = 30,05$  N) (punkts B 5.1.att., 5.2b.att.). Slodze  $F_{Nc3} = 42,63$  N atbilst dažu pārklājuma virsmas apgabalu daudzkārtīgas atslāpošanās sākumam (punkts C 5.1.att., 5.2c.att.), kura pēc tam pārvēršas par masveidīgas atslāpošanās procesu pie slodzes  $F_{Nc4} = 47,32$  N (punkts D 5.1.att., 5.2d.att.). Šāda veida bojājumu rašanos pavada AE signāla amplitūdas pieaugums, kā arī parametru  $\mu_v$  (līdz 0,2) un  $F_t$  vērtību monotons pieaugums. Daudzo pārklājuma nošķelumu parādīšanās tiek pavadīta ar asiem līknes  $\mu_v$  un  $F_t$  impulsiem uz augšu, bet līknes  $h$  – uz leju (skat. 5.1.att.).



5.2.att. Plunžera pārklājuma skrāpējumu fotogrāfijas, novērojot tās optiskajā mikroskopā, sekojošām slodzēm uz indentoru: a) 25,02 N; b) 30,05 N; c) 42,63 N; d) 47,32 N; e) 52,51 N; f) 73,68 N

Savukārt, pamatnes materiāla parādīšanās skrāpējuma dibenā pie  $F_N = 40...50N$  augstām slodzēm liecina par pārklājuma augstu adhēzijas stiprību.

Nākamais posms (punkts E 5.2.att.) pie slodzes  $F_{Nc4} = 52,51 N$  atbilst pārklājuma sagrūšanas procesa pārejai sekojošā pamatnes materiāla (plunžera) plastiskā deformācijā (nodilšanā). Pēdējā indentora pārvietošanās pa pētāmā objekta virsmu stadijā pie slodzes  $F_{Nc5} = 73,68 N$  tiek novērota sagrūšanas fragmentu, kurus veido pārklājuma un pamatnes materiālu konglomerāts, masveidīga koncentrācija (punkts F 5.1.att., 5.2.f.att). Šis apstāklis liecina par to, ka pārklājumi pie skrāpēšanas nodilst un atslāpojas kopā ar izstrādājuma pamatnes materiālu, tas ir, sagrūst pēc kohēzijas mehānisma, kurš ir saistīts ar plastisko deformāciju un plaisu rašanos pārklājuma materiālā.

Tādējādi, apskatītajā piemērā pārklājuma adhēzijas stiprība ir vienāda ar  $F_{Nc1} = 25,02 N$ .

Uz iegūto eksperimentālo datu pamata pie pietiekami lielas izlases (7 paraugu 59 mērījumi un 5 izstrādājumu 40 mērījumi) kritiskās slodzes  $F_{Nc1}$  vidējā vērtība bija vienāda ar 25,15 N. Iegūtā nanostrukturēto nodilumizturīgo pārklājumu adhēzijas stipruma vērtība ievērojami (4...5 reizes) pārsniedz līdzīgo pārklājumu zināmos datus.

### 5.3. Daudzslāņu pārklājumu cietības un elastības īpašību pētījumu ar nanoindentēšanu rezultāti

Lai novērtētu jonu-plazmas pārklājumu nodilumpretestību, tiek izmantoti raksturojumi, kuri tika iegūti ar nanoindentēšanas palīdzību. Viens no materiāla pamatraksturojumiem pie nanoindentēšanas ir tā cietības  $H$  attiecība pret elastības moduli (Junga moduli)  $E - H/E$ . Vērtība  $H/E$  raksturo materiāla spēju mainīt tā izmērus un formu deformācijas procesa laikā un var kalpot kā materiālu pretestības deformēšanai pie mehāniskās slodzes salīdzinošais raksturojums, t.i. atainot tā struktūras stāvokli. Vērtība  $H/E$  tiek izmantota arī, lai raksturotu materiāla nodilumizturību berzes apstākļos. Kvantitatīvās plastiskās deformācijas pretestības raksturojums ir arī attiecība  $H^3/E_r^2$ , kur  $E_r$  – pievestais (efektīvais) elastības modulis kontaktā «indentors - izstrādājuma pārklājums». Parasti šī attiecība ir vienāda ar 0,15...1,52 GPa. Deformācijas pretestības palielināšanai ir nepieciešams pie augstas cietības tiekties pēc mazākā iespējamā Junga moduļa.

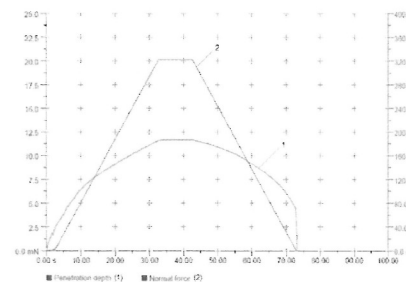
Pārklājumu cietības un elastības īpašību pētījumi tika veikti ar nanoindentora Nano-Hardness Tester palīdzību.

Lai veiktu nanoindentēšanu, šajā darbā tika izmantots normālā spēka izmaiņu trapeceveida profils (5.3.att.), kurš tika sastādīts no slodzes lineārās pieaugšanas ar uzdoto pastāvīgu ātrumu  $dP/dt$  segmentiem, izturēšanas pie maksimālās spēka  $P_{max}$  vērtības un sekojošās atslodzes.

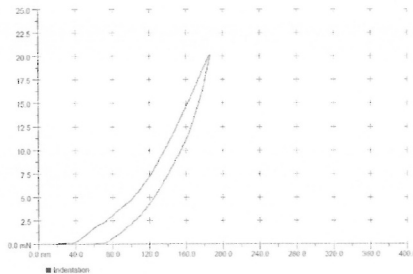
Tika pētīti divi nanostrukturēto pārklājumu tipi. Pirmā tipa pārklājumi tika uzklāti uz paraugiem no tērauda 3 ar KJB metodes palīdzību, bet otrā tipa - uz plunžeriem no nerūsējošā tērauda 12H18 ar kombinētās metodes (KJONBOMU) palīdzību.

Izmēģinājumi tika veikti pie sekojošiem noslodzes apstākļiem (5.3.att.): indentora maksimālais iespēšanas spēks  $P_{max} = 20 mN$ ; izturēšana pie maksimālās spēka  $P_{max}$  vērtības – 10 s; noslodzes - atslodzes ātrums - 40 mN/min; kopējais noslodzes cikla ilgums - ne vairāk par 100 s. Noslodzes procesā tiek ierakstītas noslodzes un atslodzes diagrammas koordinātēs « $P-h$ ». Katram paraugam tika veikta sērija no pieciem mērījumiem ar uzdoto noslodzes režīmu. Nanoindentēšanas rezultāti uz viena no plunžeriem divslāņu pārklājuma ir parādīti 5.3. un 5.4. att.

Noslodzes  $P$  noteikšanas precizitāte bija  $\pm 1 mN$ , indentēšanas dziļuma -  $\pm 2,5 nm$ .



5.3.att. Plunžera pārklājuma nanoindentēšanas rezultāti: 1 - indentēšanas dziļuma  $h$  izmaiņu laikā grafiks; 2- normālā spēka  $P$  izmaiņu laikā grafiks



5.4.att. Plunžera pārklājuma nanoindentēšanas (normālā spēka  $P$ , mN un nanoindentēšanas dziļuma  $h$ , nm sakarība) eksperimentālā diagramma

Pārklājumu cietība  $H$  tika noteikta kā dotajā brīdī pieliktā spēka  $P$  attiecība pret indentora neatjaunotā nospieduma laukumu  $A_c$ :

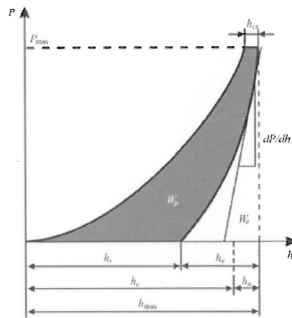
$$H = P / A_c \quad (5.1)$$

$A_c$  vērtība tika aprēķināta pēc indentora neatjaunotā nospieduma kontakta dziļuma  $h_c$  datiem.

Parametrs  $h_c$  tika noteikts saskaņā ar Oliver - Pharr metodi (OPM) pēc attiecības:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon_c P_{\max} / S \quad (5.2)$$

kur  $S = dP/dh$  – sistēmas «indentors - paraugs» kontakta stingrums atslodzes atzara sākumposmā (sk. 5.5.att.);  $\varepsilon_c$  - koeficients, kurš ir atkarīgs no indentora ģeometrijas. Saskaņā ar ISO14577 Berkoviča indentoram ieteicams pieņemt  $\varepsilon_c = 0,75$ .



5.5.att. Noslodzes diagramma pēc Oliver - Pharr metodes:  $h_r$  – palielošā nospieduma dziļums;  $h_e$  – elastīgā atjaunošanās;  $h_c$  – indentora neatjaunotā nospieduma dziļums;  $h_0$  – parauga virsmas elastīgais izliekums;  $h_{\max}$  – nospieduma maksimālais dziļums pie maksimālās noslodzes  $P_{\max}$ ;  $h_{cr}$  – plūstamība pie  $P = const$ ;  $W_p$  – elastīgās deformācijas darbs;  $W_p$  – plastiskās deformācijas darbs pie nospieduma deformēšanas

Pētāma materiāla Junga modulis  $E$  var tikt iegūts no izteiksmes:

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_c} \quad (5.3)$$

kur koeficientu  $\beta$  bez iepriekšējas informācijas ir ieteicams pieņemt  $\beta = 1,05$ .

Tādējādi, lai noteiktu reducēto (efektīvo) elastības moduli kontaktā «indentors – izstrādājuma pārklājums»  $E_r$ , ir nepieciešams vispirms noteikt  $S$  un  $A_c$  eksperimentālās vērtības.

Reducēts elastības modulis  $E_r$  ir saistīts ar pētāmā materiāla un indentora elastības konstantēm ar izteiksmi:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (5.4)$$

kur  $E$  un  $E_i$  – Junga moduli,  $\nu$  un  $\nu_i$  – attiecīgi izmēģinājama materiāla un indentora Puasona koeficienti. Dimanta indentoram  $E_i = 1141 \text{ GPa}$ ,  $\nu_i = 0,07$ .

No izteiksmes (5.4) pēc zināmām  $E_r$  un  $E_i$  vērtībām nosakām pārklājuma materiāla elastības moduli  $E$ .

Raksturojumu  $h_{\max}$ ,  $h_c$ ,  $h_r$ ,  $S$ ,  $A_c$ ,  $H$ ,  $E$ ,  $E_r$  vērtības tika noteiktas pēc augstāk aprakstītās metodoloģijas un tika aprēķinātas automātiski.

Pārklājumiem, kuri tika iegūti ar KJB metodes palīdzību, pētāmo parametru vērtības ir: nanocietība  $H = 25 \dots 27 \text{ GPa}$  pie elastības moduļa  $E = 320 \dots 328 \text{ GPa}$ . Attiecības  $H/E$  vidējā vērtība ir 0,08, bet  $H^3/Er^2 = 0,167 \text{ GPa}$ .

Plunžeriem ar pārklājumiem, kuri ir radīti ar kombinētās metodes palīdzību, cietības vērtības ir 37...41 GPa pie elastības moduļa 440...475 GPa. Attiecības  $H/E$  vidējā vērtība ir 0,085, bet  $H^3/Er^2 = 0,283 \text{ GPa}$ .

Parametru  $H/E$  un  $H^3/Er^2$  saņemto vērtību diapazons apstiprina pārklājuma nanostrukturās esamību un apliecina tā augsto nodilumizturību un spēju pretoties plastiskai deformācijai.

Jonu-plazmas pārklājumu kombinētās uzklāšanas metodes pielietošana ļāva jūtami palielināt to cietību - no 27 līdz 41 GPa, tai pašā laikā reducēts elastības modulis izmainījās no 328 līdz 475 GPa, un tādējādi, attiecība  $H^3/Er^2$  palielinājās no 0,167 līdz 0,283. Tas liecina par būtisku pārklājuma nodilumizturības palielināšanos.

#### 5.4. Nanostrukturēto aizsargpārklājumu tribotehnisko īpašību eksperimentālais pētījums

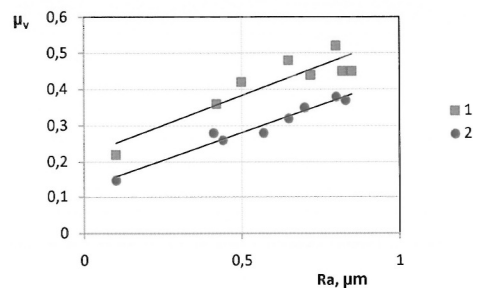
Veicot eksperimentālos pārklājumu tribotehnisko īpašību pētījumus, tika novērtēta tādu raksturlielumu, kā pārklājuma raupjuma un darba gāzu attiecības uzsmidzināšanas kamerā, ietekme uz berzes koeficientu.

Pēc iegūtajiem eksperimentālajiem datiem tika konstruēti berzes koeficientu izmaiņu atkarības no nodilumizturīgā pārklājuma raupjuma un pārklājuma raupjuma atkarības no gāzu  $N_2/Ar$  attiecības uzsmidzināšanas vakuūmkamerā grafiki. Izlases apjoms (izmēģināto paraugu skaits) katrā veikto eksperimentu sērijas partijā bija 8 - 15 paraugi.

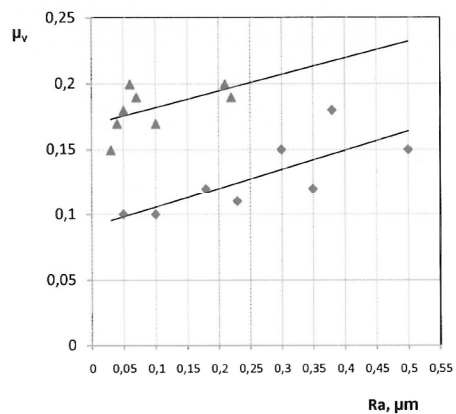
5.6.att. ir attēloti eksperimentālo datu rezultāti, kuri tika iegūti dažādos berzes pāru variantos: 1- berzes pārim "paraugs ar pārklājumu - pretparaugs ar pārklājumu" bez iepriekšējas pulēšanas; 2 - berzes pārim "paraugs ar pārklājumu - pretparaugs bez pārklājuma" bez iepriekšējas pulēšanas; 3- berzes pārim "paraugs ar pārklājumu - pretparaugs ar pārklājumu" ar iepriekšēju pulēšanu. Visas minētās atkarības raksturo pārklājumu, kuri ir iegūti ar KJB metodes palīdzību, īpašības. Atkarība 4 (skat.5.6b. att.) raksturo pārklājumu,

kuri ir iegūti ar kombinētās (KJONBOMU) metodes palīdzību, īpašības berzes pārim "paraugs ar pārklājumu - pretparaugs ar pārklājumu" bez iepriekšējas pulēšanas.

No iegūtajām eksperimentālajām atkarībām var secināt, ka pārklājuma raupjums visai būtiski ietekmē berzes koeficientu. Tā samazinot pārklājuma raupjuma ( $R_a$ ) vidējo vērtību no  $0.607 \mu\text{m}$  (pārklājumam kas tika iegūts ar KJB metodi) uz  $0.097 \mu\text{m}$  (pārklājumam kas tika iegūts ar KJONBOMU metodi) būtiski samazinājās berzes koeficients (no  $0.417$  līdz  $0.181$ ).



a)

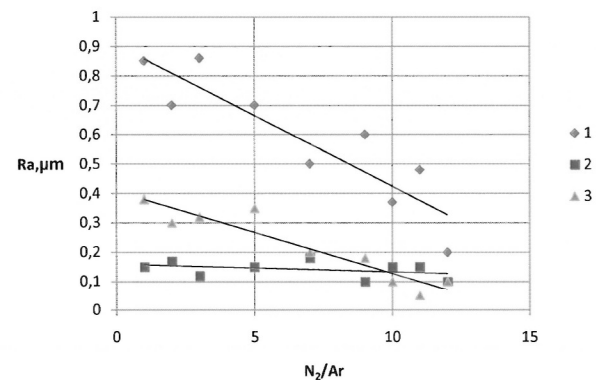


b)

5.6.att. Statiskā berzes koeficienta atkarība no nanostrukturētā pārklājuma raupjuma

Darbā tika pētīta arī reakcijas gāzu ( $N_2$  un  $Ar$ ) sastāva ietekme uz pārklājumu kvalitāti, it īpaši uz to raupjumu. Eksperimentālo datu rezultāti ir attēloti 5.7.att. Acīmredzami, ka slāpekļa koncentrācijas palielināšana gāzu maisījumā noved pie būtiskas raupjuma samazināšanās. Tā, veidojot pārklājumu ar KJONBOMU metodi, palielinot slāpekļa

koncentrāciju gāzu maisījumā no 2 līdz 10, var iegūt vairāk kā divkārtēju virsmas raupjuma samazināšanos – no  $0.35$  līdz  $0.13 \mu\text{m}$ .



5.7.att. Pārklājumu raupjuma atkarība no gāzu attiecības vakuūmkamerā

Detaļas ar pārklājumu virsmas sekojošā mehāniskā pulēšana ļauj iegūt optimālo raupjumu. Pie tam gāzu maisījuma sastāva ietekme netika novērota visā parametru izmaiņu diapazonā (atkarība 2, 5.7.att.). Vidējā raupjuma parametra  $R_a$  vērtība bija  $0.15 \mu\text{m}$ .

Nodilumizturīgo aizsargpārklājumu tribotehnisko raksturojumu izmaiņu iegūtajām likumsakarībām ir praktiskā nozīme. Regulējot uzsmidzināšanas tehnoloģiskos parametrus, var iegūt nodilumizturīgus nanostrukturētus pārklājumus ar augstiem antifriktīviem raksturojumiem, kurus var izmantot detaļu atjaunošanai un stiprināšanai.

**Margarita URBAHA**

**NANOSTRUKTURĒTO NODILUMIZTURĪGO JONU - PLAZMAS PĀRKLĀJUMU  
IZVEIDE MAŠĪNU DETAĻU ATJAUNOŠANAI UN AIZSARDZĪBAI**

Promocijas darba kopsavilkums

---