

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Aeronautikas institūts

**Konstantīns SAVKOVS**

Doktora studiju programmas „Transports un satiksme” doktorants

**GĀZTURBĪNU DZINĒJU KARSTĀ TRAKTA DETAĻU  
METĀLKERAMISKO NANOPĀRKLĀJUMU IZSTRĀDE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs

Dr.habil.sc.ing., profesors

**A. URBAHS**

**Rīga 2014**

UDK 629.735.036:621.793(043.2)

Sa 937 g

**Savkovs K.** Gāzturbīnu dzinēju karstā trakta detaļu metālkeramisko nanopārklājumu izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU, 2014.–.51pp.

Iespiests saskaņā ar „RTU P-22” promocijas padomes 2013. gada 16.septembra lēmumu, protokols Nr. 06/2013.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

ISBN 978-9934-10-524-1

## PROMOCIJAS DARBS

### IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gada 27. februārī plkst. 14:30 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātes Aeronautikas institūta telpās, Rīgā, Lomonosova ielā 1A, 1 korpusā, 218. auditorijā

#### OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Juris CIMANSKIS

Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Vadošais pētnieks, Dr. sc.ing. Nikolajs KUĻEŠOVŠ

Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andrejs ŠAŅAVSKIS

Valsts Civilās Aviācijas lidojumu drošības centrs, Krievija

#### APSTIPRINĀJUMS

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

Konstantīns Savkovs .....(Paraksts)

Datums:

2014. gada .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tas satur ievadu, 6nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 67 attēlus, 15 tabulas, kopā 133 lappuses. Literatūras sarakstā ir 68 nosaukumi.

## SATURS

DARBA TEMATA AKTUALITĀTE.....	6
PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	6
PĒTNIECISKĀS METODES .....	7
PĒTĪJUMU OBJEKTS .....	8
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE PĒTĪJUMU REZULTĀTI .....	8
DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME.....	11
AIZSTĀVĀMĀS TĒZES.....	11
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA.....	12
PROMOCIJAS DARBASTRUKTŪRA UN SATURS.....	16
1. GĀZTURBĪNU DZINĒJU EFEKTIVITĀTES PALIELINĀŠANA .....	17
1.1. GTD efektivitātes un ilgmūžības galvenās problēmas.....	17
1.2. GTD efektivitātes un ilgmūžības palielināšanas mūsdienas metodes .....	17
2. GTD KARSTĀ TRAKTA DETAĻU METĀLKERAMISKĀ NANOPĀRKLĀJUMA KONCEPCIJAS IZSTRĀDE.....	21
2.1. Pārklājuma struktūras raksturojums.....	21
2.2. Eksperimentālie pētījumi karstumizturīga intermetālkeramiska pārklājuma <i>IMCER</i> un modificēta pārklājuma <i>DIALAT</i> izveidē uz nikela un titāna bāzes GTD lāpstiņu ar kondensācijas un jonu bombardēšanas metodi .....	22
2.3. GTD karstā trakta detaļu karstumizturīga nanopārklājuma fiziskā modeļa izveide ..	26
3. DETAĻU AR DAUDZSLĀŅU KARSTUMIZTURĪGIEM PARKLĀJUMIEM PARAMETRISKĀ DROŠUMA PROGNOZĒŠANA, IEVĒROJOT TO FIZIKĀLI MEHĀNISKUS RAKSTUROJUMUS UN EKSPLOATĀCIJAS NOSACĪJUMUS.....	33
3.1. Atteikumu modeļi detaļām ar aizsargpārklājumiem .....	33
3.2. Detaļu ar karstumizturīgiem pārklājumiem parametriskā drošuma prognozēšana ....	34
4. VAIRĀKU SLĀŅU NANOPĀRKLĀJUMA UZ <i>TI-AL-N</i> BĀZES MONOSLĀŅU OKSIDĒŠANĀS NOVĒRTĒJUMS.....	35
5. INTERMETALĪDU, KONGLOMERĀTU UN NITRĪDU MONOSLĀŅU ATTIECĪBAS NOTEIKŠANA VAIRĀKU SLĀŅU KARSTUMIZTURĪGA METĀLKERAMISKAJAM PĀRKLĀJUMAM UZ <i>TI-AL-N</i> SISTĒMAS BĀZES.....	38
5.1. Pētāmie pārklājumi .....	38
5.2. Pārbaude uz ilgstošu karstumizturību .....	41
5.3. Virsmas elektro mikroskopiskā analīze pēc ilgstošas karstumizturības pārbaudes ...	43

6. OPTIMIZĒTĀ VAIRĀKU SLĀŅU METĀLKERAMISKĀ NANOPĀRKLĀJUMA NANOKS UZ <i>Ti-AL-N</i> BĀZES PĒTĪJUMS PĒC UZPUTINĀŠANAS LAIKA .....	45
6.1. Katra slāņa biezuma attiecības optimizācija vairāku slāņu pārklājumā.....	45
6.2. Optimizētā 110.pārklājuma uzputināšana un strukturālā analīze.....	46
6.3 Optimizētā 110.NANOKS pārklājuma izmēģinājumiuz ilgstošu karstumizturību .....	48

## DARBA TEMATA AKTUALITĀTE

Aviopārvadājumu efektivitātes un drošības palielināšana ir viens no aviācijas industrijas pamatvirzieniem. Jaunas paaudzes gāzes turbīnas dzinēju (GTD), kuriem ir zems īpatnējais svars un kas patērē mazāk degvielas, izveide ir prioritārs aviācijas uzdevums. Veidojot perspektīvu GTD, kompresora saspiešanas pakāpe ir 35-40 reizes un tai piemīt tālāka palielināšanās tendence. Turklāt kompresoru gaisa darba temperatūras pēdējās pakāpēs sasniedz 500°C un pat vairāk, savukārt, gāzu temperatūra turbīnas ieejā sasniedz 1 900°C.

Lai nodrošinātu tik augstas ekspluatācijas īpašības, papildus efektīvai dzesēšanas sistēmai nepieciešams izveidot jaunus karstumizturīgus un karstumlietderīgus materiālus, kā arī nepieciešams izveidot jaunus speciālus karstumizturīgus pārklājumus GTD turbīnas, sadegšanas kameras un kompresora detaļu aizsardzībai. Kā viens no dotās problēmas risinājuma variantiem ir vairāku slāņu funkcionāla nanopārklājumu izstrāde, kuriem piemīt augstas erozijas un karstumizturības īpašības un kas ir spējīgi izturēt augstas temperatūras gaisa plūsmu ilgā laikā periodā.

Promocijas darbā ir izveidoti inovatīvi nanopārklājumi, kuri ir radīti uz vakuuma jonu-plazmas uzputināšanas tehnoloģiju pamata. Šī veida pārklājumi izceļas ar augstu tehnoloģiskumu un plašu fizikāli mehānisko un ekspluatācijas īpašību daudzveidību.

Pamatojoties uz promocijas darbā izvirzītajiem uzdevumiem un, ņemot vērā to, ka darbs atbilst valsts prioritārajam zinātnes virzienam „Inovatīvie materiāli un tehnoloģijas”, un to, ka promocijas darbs 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.

## PĒTĪJUMA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

### **Promocijas darba mērķis**

– inovatīvās tehnoloģijas izstrāde metālkeramisko nanopārklājumu iegūšanai ar vakuuma jonu-plazmas metodi gāzturbīnu dzinēju karstā trakta detaļu karstumizturības paaugstināšanai.

### **Pētījuma uzdevumi**

- 1) Izstrādāt vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma fizisko modeli, kas nodrošina GTD turbīnas un kompresoru lāpstiņu materiāla efektīvu aizsardzību pret augstas temperatūras oksidēšanos.

- 2) Izstrādāt parametru drošuma prognozēšanas matemātisku modeli detaļām ar daudzslāņu karstumizturīgu pārklājumu, ņemot vērā to fizikālas un mehāniskas īpašības un ekspluatācijas nosacījumus, pamatojoties uz varbūtības metodi.
- 3) Veikt vakuuma jonu-plazmas uzputināšanas tehnoloģisko procesu eksperimentālus pētījumus vairāku slāņu karstumizturīga nanopārklājuma GTD lāpstiņu un kompresora izstrādē.
- 4) Veikt kombinētas jonu-plazmas uzputināšanas tehnoloģisko procesu eksperimentālus pētījumus un izstrādāt vairāku slāņu karstumizturīga nanopārklājuma ar mainīgu struktūru un sastāvu ražošanas tehnoloģiju.
- 5) Veikt jonu-plazmas uzsmidzināšanas iekārtas modifikāciju ar mērķi nodrošināt izstrādātā vairāku slāņu karstumizturīga pārklājuma iegūšanu.
- 6) Izstrādāt vairāku slāņu karstumizturīga metālkeramiska nanopārklājuma ar pieprasītajām īpašībām jaunu ražošanas tehnoloģiju ar kombinēto jonu-plazmas metodi.
- 7) Veikt paraugu eksperimentālus pētījumus, novērtējot katra slāņa, kuri veido vairāku slāņu pārklājumu, karstumizturību, novērtēt to efektivitāti un izanalizēt oksidēšanas mehānisma īpašības.
- 8) Izveidot vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma eksperimentālo paraugu sēriju un veikt to karstumizturības izmēģinājumus, ar mērķi optimizēt to ķīmisko sastāvu, struktūras attiecību un komponentu slāņu biezumu.
- 9) Izveidot vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma industriālo prototipu GTD kompresora statora darba lāpstiņām, ņemot vērā ekspluatācijas īpatnības, kā arī pārklājuma parametru optimizācijas rezultātus – ķīmisko sastāvu, struktūru attiecību un komponentu slāņu biezumu.
- 10) Veikt GTD lāpstiņu, kas pārklātas ar iegūto vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājumu, izmēģinājumus uz ilgstošu karstumizturību un izanalizēt iegūtos rezultātus.

## PĒTNIECISKĀS METODES

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

Teorētiskās metodes:

- a) matemātiskā modelēšana;
- b) cieta ķermeņa fizika;

- c) zema spiediena plazmas fizika;
- d) cietu vielu rentgenspektrālā mikroanalīze;

Ekspierimentālās metodes:

- a) pārklājumu jonu-plazmas uzklāšanas metodes vakuumā;
- b) materiālu un pārklājumu mikrostrukturās un ķīmiskā sastāva eksperimentālā pētīšana;
- c) rastru elektroniskā mikroskopija;
- d) ķīmiskā sastāva noteikšana ar energodispersijas mikroanalīzes palīdzību;
- e) pārklājuma karstumizturības eksperimentālā novērtēšana.

## PĒTĪJUMU OBJEKTS

Kā izpētes objekts tika izmantoti GTD turbīnas lāpstiņas un GTD kompresora lāpstiņas.

## DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE PĒTĪJUMU REZULTĀTI

### **Promocijas darbā veikto pētījumu zinātniskā novitāte:**

Promocijas darba rezultātā ir radīti inovatīvi produkti:

- 1) Jauna tehnoloģija GTD turbīnas lāpstiņu vairāku slāņu karstumizturīga nanopārklājuma izveidē, pielietojot kondensēšanas un jonu bombardēšanas metodes vakuumā.
- 2) Jauna tehnoloģija GTD kompresora darba lāpstiņu vairāku slāņu karstumizturīga metālkeramiska nanopārklājuma ar mainīgu struktūru un sastāvu izveidē, pielietojot kombinēto jonu-plazmas metodi, t.s. *KJONBOMU* – kondensēšanās, jonu bombardēšanas un magnetrona uzputināšanas metodi.
- 3) Jauna tehnoloģija GTD turbīnas un kompresoru lāpstiņu trīs slāņu jonu-plazmas trīs komponentu metālkeramiskā nanopārklājuma uz *Ti-Al-N* sistēmas bāzes izveidē, t.s. *NANOKS*, ar augstām karstumizturības īpašībām GTD lāpstiņām no titāna un titānalumīnija sakausējumiem.

Šie inovatīvie produkti sekmē mašīnzinātnes nozares un ražošanas integrāciju un pētniecisko rezultātu ieviešanu atbilstoši valstī izvirzītajam prioritārajam zinātnes virzienam „Inovatīvie materiāli un tehnoloģijas (Nanostukturētie daudzfunkcionālie materiāli un nanotehnoloģijas)”.



## DARBA IZPILDES GAITĀ TIKA SASNIEGTI SEKOJOŠI PAMATREZULTĀTI:

- 1) Ir izstrādāts jaunais karstumizturīga metālkeramiska vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma NANOKS fiziskais modelis, kas nodrošina GTD turbīnas un kompresora lāpstiņu materiāla efektīvu aizsardzību no augstas temperatūras oksidēšanās gaisa un gāzes vidēs. Pārklājums uz *Ti-Al-N* bāzes iekļauj sevī trīs pamata slāņus un katrs no tiem pilda savu specifisku funkciju. Pirmais – iekšējais intermetalīdu – slānis; otrais – vidējais – konglomerātu slānis; trešais – ārējais – slānis ir veidots no nitrīdiem.
- 2) Ir izstrādāts parametru drošuma prognozēšanas matemātiskais modelis detaļām ar daudzslāņu karstumizturīgu pārklājumu, ņemot vērā to īpašības un ekspluatācijas nosacījumus, pamatojoties uz varbūtības metodi. Ir piedāvāts vispārīgs detaļu atteikumu modelis, kurus izraisa aizsargpārklājumu oksidēšanas, kā arī detaļu bezatteikumu darba varbūtības novērtējums pie noteiktām robežām – slāņa (minimālā) robežbiezuma, kas atbilst pieļaujamajam masas pieaugumam.
- 3) Ir izstrādātā jauna vairāku slāņu karstumizturīga nanopārklājuma ražošanas tehnoloģija GTD lāpstiņām ar kondensēšanas un jonu bombardēšanas metodēm uz veikto jonu-plazmas uzputināšanas tehnoloģisko procesu eksperimentālo pētījumu pamata.
- 4) Tika modificēta vakuuma iekārta *NNV-6,6-II* karstumizturīga metālkeramiska vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma NANOKS uzputināšanas īstenošanai viena cikla laikā bez uzputināšanas avotu maiņas. Viena loka iztvaikotāja vietā ir uzstādīts planārs magnetrons un tiek pielietota speciālo ekrānu sistēma.
- 5) Ir izstrādātā un tehnoloģiski īstenota jauna intermetalīdu, konglomerātu un nitrīdu slāņu ar biežumu 500, 622 un 257 nm attiecīgi, iegūšanas metodika uz *TV2-117A* GTD kompresora statora lāpstiņām no titāna sakausējuma *OT4-1* Katrs pārklājuma veids tika izpētīts uz oksidēšanas temperatūras diapazonā no 600° līdz 820°C. Visu pārklājumu veidojošā materiāla struktūra un sastāvs to oksidēšanas procesā laikā tika pētīti elektronmikroskopiski un mikro rentgenspektrāli. Pētījumu gaitā tika noteikts pārklājumu oksidēšanas ātrums minētajā temperatūru diapazonā un aprakstīts oksidēšanas mehānisms.

- 6) Ir izstrādāta augsti efektīva karstumizturīga metālkeramiska vairāku slāņu daudzkomponentu pārklājuma uzputināšanas tehnoloģija uz *Ti-Al-N* bāzes, t.s. NANOKS, titāna sakausējumiem ar kombinēto jonu-plazmas metodi. Tehnoloģija ir pielietota uz GTD kompresora lāpstiņu paraugiem un darba lāpstiņām no titāna sakausējuma *VT1-0* un *OT4-1* attiecīgi. Dotajai tehnoloģijai ir sekojošas priekšrocības: augsta pārklājuma īpašā efektivitāte; ekoloģiskā tīrība, jo visi procesi notiek vakuumā; viss tehnoloģiskais process tiek īstenots vienā izstrādājuma ielādēšanas reizē; nav vajadzīga nekāda papildus pārklājuma virsmas apstrāde; ir iespējama viegla, efektīva pārklājuma struktūras un tā īpašību vadība.
- 7) Ir veikti eksperimentāli pētījumi vairāku slāņu daudzkomponentu pārklājuma NANOKS izveidē un īpašību novērtēšanā. Ir veikta trīs veidu pārklājumu uzputināšana uz lāpstiņu sērijas pēc izstrādātas metodikas pie dažādas pamata slāņu attiecības ar intermetalīdu, konglomerātu un nitrīdu slāņu prioritāti. Pārklājumu struktūra tika izpētīta elektronmikroskopiski un mikro rentgenspektrāli. Uz veikto karstumizturības izmēģinājumu pamata ir optimizēts veidojošo pārklājumu slāņu ķīmiskais sastāvs, struktūras attiecība un biežums.
- 8) Ir izstrādāts *NANOKS* pārklājuma matemātiskais modelis lāpstiņu oksidēšanas procesam kā masas pieauguma funkcija atkarībā no katra strukturētā slāņa uzputināšanas laika atsevišķi. Ir noteikti intermetalīdu (I), konglomerātu (K) un nitrīdu (N) slāņu nozīmes koeficienti:  $\Delta m_i = \Delta m_{wp} - 0,00051I - 0,000327K - 0,000007N$ .
- 9) Ir izveidots vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma NANOKS industriālais prototips GTD kompresora statoram balstoties uz izstrādātā lāpstiņu oksidēšanās procesa matemātiskā modeļa, kā arī ņemot vērā kombinētā jonu-plazmas tehnoloģiskā procesa īpatnības, pārklājuma parametru optimizācijas rezultāti un lāpstiņu ekspluatācijas īpatnības.
- 10) Tika veikti GTD lāpstiņu izmēģinājumi ar iegūto vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājumu uz karstumizturību pie temperatūras 750°C 450 stundu laikā. Iegūtie rezultāti pierādīja augstu izveidotā karstumizturīgā pārklājuma industriālā prototipa efektivitāti – pēc 70 stundu izmēģinājuma masas pieaugums lāpstiņām ar NANOKS pārklājumu samazinājās vairāk nekā 11 reizes, salīdzinot ar lāpstiņām bez pārklājuma.

## DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Promocijas darba rezultātiem ir plašs praktiskais nozīmīgums un pielietojums, jo tā ietvaros tika izstrādāta un tiks patentēta (starptautiskā patenta pieteikums “Mašīnbūves izstrādājumu karstumizturības paaugstināšanas paņēmieni”) jauna un augsti efektīva vairāku slāņu daudzkomponentu jonu-plazmas tehnoloģija ar kombinēto metodi detaļu karstumizturības palielināšanai.

Promocijas darba rezultāti var pārsvarā tikt izmantoti transporta mašīnbūvē, aviobūvē, gāzturbīnu dzinēju detaļu izgatavošanā un remontā. Izstrādātā tehnoloģija karstumizturīgo pārklājumu 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. Darba rezultāti tika eksperimentāli apobēti Latvijas uzņēmumā “*Metalserviss*” karstumizturīgo pārklājumu izveidei rūpnieciskiem metālizstrādājumiem.

## AIZSTĀVĀMĀS TĒZES

Autors šajā darbā aizstāv:

- 1) Izstrādātu vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma fizisko modeli, kas nodrošina GTD kompresora un turbīnas lāpstiņu efektīvu aizsardzību pret augstas temperatūras oksidēšanas gaisa un gāzes vidēs.
- 2) Izstrādātu tehnoloģiju vairāku slāņu daudzkomponentu karstumizturīga pārklājuma NANOKS izveidei ar mainīgu struktūru un sastāvu GTD kompresora lāpstiņām no titāna un titānalumīnija sakausējumiem, izmantojot kombinēto jonu-plazmas metodi KJONBOMU – kondensēšanās un jonu bombardēšanu kopā ar magnetrona uzputināšanas metodi.
- 3) Izstrādātu oksidēšanās procesa matemātisku modeli GTD kompresora un turbīnas lāpstiņām ar vairāku slāņu daudzkomponentu karstumizturīga pārklājumu NANOKS, kā masas pieauguma funkciju no katra struktūru veidojošā slāņa uzputināšanas laika atsevišķi.
- 4) Izstrādātu vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājuma industriālo prototipu GTD kompresora statora lāpstiņām, ņemot vērā ekspluatācijas īpatnības, kā arī pārklājuma parametru optimizācijas rezultātus (ķīmisko sastāvu, struktūru attiecību un komponentu slāņu biezumu).

- 5) Izveidoto vairāku slāņu daudzkomponentu nanopārklājumu ilgstošas karstumizturības uz GTD kompresora paraugiem un lāpstīnām pētījumu rezultātus.
- 6) Izveidoto nanopārklājumu mikrostrukturās elektronmikroskopisko un mikro rentgenspektrālo komplekso pētījumu rezultātus.

## PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

### **Par darba rezultātiem ziņots 17 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs:**

1. 17th International Conference „Transport Means' 2013”, 24.-25.oktobris, 2013., Kaunas University of Technology, Kauņa, Lietuva.
2. Starptautiskās konferences "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.
3. 2nd International Nanotechnology Conference NanoIsrael 2010, 8.-9.novembris, 2010., Telaviva, Izraela.
4. International Convention AES-ATEMA'2010: Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, 19.-23.jūnijs, 2010., Briksena, Itālija.
5. 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials – NANOSMAT 5, 19.-21.oktobris, 2010., Reimsa, Francija.
6. 2nd International Specialized Symposium “Space & Global Security of Humanity” (SGS 2010), 5.-9.jūlijs, 2010., Rīga, Latvija.
7. 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.
8. 1st International EJC-PISE Workshop “Plasma Surface Engineering – Protective and Decorative Coatings”, 9.-10.jūnijs, 2009., Rīga, Latvija.
9. 7th International Nanotechnology Symposium: New Ideas for Industry “Nanofair’ 2009” 26.-27.maijs, 2009., Drezdēna, Vācija.
10. 3rd International Conference on Nanotechnology and Nanoscience „NanoAfrica 2009”, 1.-4.februāris, 2009., Pretorija, Dienvidāfrikas Republika.
11. Nanotech Northern Europe 2008, 23.-25.septembris, 2008., Kopenhāgena, Dānija.
12. XV International scientific-technical conference, trans&MOTAUTO'08, 18.-20.septembris, 2008., Sozopola, Bulgārija.

13. 2nd international conference on Advanced Nano Materials, Advanced Nano Materials, 22.-25.jūnijs, 2008., Aveiro, Portugāle.
14. International conference MCM 2008, Mechanics of Composite Materials, 26.-30.maijs, 2008., Rīga, Latvija.
15. 5th International Conference "Metals, Welding&Powder Metallurgy: MET-2007", 13.-14.septembris, 2007., Rīga, Latvija.
16. International Conference on Composites/Nano Engineering ICCE-15, 15.-21.jūlijs, 2007., Haikou, Hainan sala, Ķīna.
17. 9th International Conference „Transport Means' 2005”, 20.-21.oktobris, 2005., Kaunas University of Technology, Kauņa, Lietuva.

**Darba rezultāti publicēti 21 zinātniskos rakstos un ir iesniegti 1 starptautiskais un 1 Latvijas patents:**

- 1) Savkovs K.Heat Resistant Nanostructured Coatings for Gas Turbine Engines.// Proceedings of the 17th International Conference „Transport Means' 2013”, 24.-25.oktobris, 2013., Kaunas University of Technology, Kauņa, Lietuva.165-168pp.
- 2) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Special Intermetal-Ceramic Coatings for Protection and Restoration of Details for Gas-Turbine Engines // Proceedings of the International Conference NanoAfrica 2009, 3rd International Conference on Nanotechnology and Nanoscience „NanoAfrica 2009”, Pretoria, Dienvidāfrikas Republika, 1.-4.februāris, 2009. – 59 p.
- 3) Urbahs A., Savkovs K., Nesterovskis V. High temperature oxide resistant components of perspective high strength intermetalceramic composite coatings. // Proceedings of the 1st International EJC-PISE Workshop in Riga, Rīga, Latvija, 09.–10.jūnijs, 2009.<http://ebookbrowse.com/u/urbahs>
- 4) Urbaha M., Savkovs K., Urbahs A. Development of protective coating for advanced aero engines // Book of abstracts of the 2nd International Symposium “Space & Global Security of Humanity”, Rīga, Latvija, 5.-9.jūlijs, 2010. – 95 p.
- 5) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. High Temperature Oxide Resistant Components of Perspective High Strength Intermetalceramic Composite Coatings // Proceedings of the International Convention AES-ATEMA'2010, “Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications”, Brixen, Italy, 19.-23.jūlijs, 2010. – 77.-81 p.

- 6) Urbaha M., Urbahs A., Savkovs K. Barrier coatings for turbine and compressor blades of powerful gas turbine engines. – In the Book: Abstract of the 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials – NANOSMAT 5, Francija, 2010. – 68 p.
- 7) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. Intermetalceramic nanocomposite coatings: theoretical and experimental investigations. – In the Book: Abstracts of the 2<sup>nd</sup> International Nanotechnology Conference & Exhibition, Telaviva, Izraela, 2010. – 374 p.
- 8) Urbach A., Savkov K., Doroshko S. Heat- and erosion-resistant coatings for compressor blades of powerful gas turbine engines. – In the Book: Abstracts of the 9<sup>th</sup> International Seminar on Quantitative Microscopy (QM) and 5<sup>th</sup> Seminar on Nanoscale Calibration Standards and Methods, Brno, Čehija, 2010. – A07 p.
- 9) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M. High temperature oxide resistant components of perspective high strength intermetalceramic composite coatings // AES Technical Reviews International Journal, Part D: International Journal of Reliability and Safety of Engineering Systems and Structures, IJRSESS, 1(1) 2011, ISSN 1916-5374, 53-57 p. SCOPUS Database, www.info.scopus.com
- 10) Urbahs A., Savkov K. Creation of ionic-plasma coverings for protection and restoration of details for gas-turbine engines. In: Proceedings of 2nd International Scientific and Technical Conference “Aero Engines of the XXI Century”, Moscow, Russia, 6.-9.decembris, 2005., 306-307 p.
- 11) Urbahs A., Savkovs K., Nesterovskis V. Elaboration of multicomponent intermetal- ceramic coatings for the protection and restoration of machine-building products. - In the Book: Proceedings of the XIV International Conference “Mechanics of Composite Materials”, Rīga, Latvija, 2006.
- 12) Urbahs A., Savkovs K, Nesterovskis V., Urbaha M. Creation of ionic-plasma coverings for protection and restoration of details for gas-turbine engines. // World Journal of Engineering, Vol.5 Supplement 2008. – Hebei University of Engineering, ISSN 1708-5284, 2008. – 996-997 p.
- 13) Urbahs A., Savkovs K., Nesterovskis V., Urbaha M. Ionic-plasma coverings for protection and restoration of details for gas-turbine engines. - In the Book: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference "Metals, Welding & Powder Metallurgy" MET-2007, Rīga, Latvija, 13.-14.septembris, 2007., - 36-39 p.

- 14) Urbahs A., Savkovs K., Kurjanovičs I., Zujevs V. Heat resistant coating for titan alloy-based parts of a gas turbine engine // Proceedings of 15th International Conference. Transport Means. 2011., ISSN 1822-296X, Kaunas, Lietuva, 20.-21.oktobris, 2011., - 225-228 p. *SCOPUS Database*, [www.info.scopus.com](http://www.info.scopus.com)
- 15) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M., Kurjanovich I. Nanostructured intermetal-ceramic coatings for the gas turbine engines blades // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Springer science and business media – NATO science for peace and security series, NATO ARW CRB.nukr.arw 984333, Nanodevices and Nanomaterials for Ecological Security, Rīga, Latvija, 2011. – 23 p.
- 16) Urbahs A., Savkovs K. Heat- and erosion-resistant nanostructured coatings for the compressor blades of gas turbine engines// Proceedings of International Conference “Nanomechanical Testing in Materials Research and Development”, Lanzarote, Spain, 09.-14.oktobris, 2011., - 31 p.
- 17) Savkovs K., Doroshko S., Urbaha M. Gas turbine aero engine compressor blade erosion and heat resistant coatings. – In Book: Transport Means, ISSN 1822-296X, 2011., 274-278 p. *SCOPUS Database*, [www.info.scopus.com](http://www.info.scopus.com)
- 18) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M., Kurjanovich I. Nanostructured Intermetal-Ceramic Coatings for Blades of Gas Turbine Engines // NATO SCIENCE FOR PEACE AND SECURITY SERIES, Series B: Physics and Biophysics, 2012, Nanodevices and Nanomaterials for Ecological Security, Part 2, Chapter 28, 307-314 p., Springer Science, Thomson
- 19) Urbahs, A., Savkovs, K., Urbaha, M., Kurjanovičs, I. Nanostructured intermetal-ceramic coatings for blades of gas turbine engines. 2012. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, 307-314 pp.
- 20) Urbahs A., Savkovs K., Nesterovskis V., Urbaha M. Inovatīvo vakuumpārklājumu efektivitātes novērtējums gāzturbīnu spēka iekārtu detaļu aizsardzībai no augstas temperatūras gāzes korozijas.- In the Book: Proceedings of the VIII International Conference “Maritime Transport and Infrastructure”, Rīga, Latvija, 2006., - 223-225 p.
- 21) Martinovs, A., Timmerberg, J., Savkovs, K., Urbahs, A., Beckmann, P. A method for determination of specific electrical resistance of steel and nano-coating sputtered on it. In: *The 8th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”*, Rēzekne, Latvija, 20.-22.jūnijs, 2011., vol.2, – 118-124 p. [http://zdb.ru.lv/conferences/3/VTR8\\_II\\_118.pdf](http://zdb.ru.lv/conferences/3/VTR8_II_118.pdf)

- 22) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M., Rudzītis J. Method for increasing heat resistance of metallic articles. Eiropas patenta pieteikuma numurs: EP13188508.9., iesniegšanas datums: 14.10.2013.
- 23) Urbahs A., Savkovs K., Urbaha M., Rudzītis J. Metālisko izstrādājumu karstumizturības paaugstināšanas paņēmieni. Latvijas patenta pieteikuma numurs: P-13-153, iesniegšanas datums: 14.10.2013.

**Promocijas darba rezultāti tika izmantoti 5 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.g.;
4. LZP sadarbības projekts Nr. 10.0009 “Rūpniecisko izstrādājumu daudzkomponentu nanostrukturēto aizsargājošo pārklājumu izveides tehnoloģiju izstrāde”, sākot ar 2010.g.;
5. ERAF projekts “Industriālās tehnoloģijas prototipa izstrāde daudzkomponentu nanostrukturētu jonu-plazmas nodilumizturīgu pārklājumu iegūšanai”, sākot ar 2010.g.

## PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN SATURS

Promocijas darbs sastāv no ievada, 6 nodaļām, secinājumiem un literatūras saraksta, 67 attēlus, 15 tabulas, kopā 133 lappuses. Literatūras sarakstā ir 68 nosaukumi.



# 1. GĀZTURBĪNU DZINĒJU EFEKTIVITĀTES UN DARBA MŪŽAPALIELINĀŠANAS GALVENĀS PROBLĒMAS

## 1.1. GTD efektivitātes un darba mūža faktoru analīze

Jaunas paaudzes gāzturbīnas dzinēju, kuri patērē ne tik daudz degvielas un ir uzticami un ilgmūžīgi, ražošana ir prioritārs uzdevums aviobūvē. Turklāt kompresoru pēdējās pakāpēs gaisa darba temperatūras sasniedz 500°C un pat vairāk. Pakāpeniski aug arī gāzu temperatūra visos turbīnas griezumos ar tendenci sasniegt līmeni 1 900°C. Augsta temperatūra ir galvenā problēma visa veida GTD, kuru konstrukcijā ir dažādas konstruktīvas shēmas, tehnoloģijas un materiāli, droša un efektīva darba nodrošināšanai.

## 1.2. GTD efektivitātes un darba mūža paaugstināšanas mūsdienīgās metodes

Galvenie tehniskie risinājumi, kas tiek pielietoti, lai palielinātu gāzu temperatūru, paaugstinās spiešanas pakāpi, turbīnas ieejā un kompresoru pēdējās pakāpēs, ir:

- 1) Jaunu karstumizturīgu materiālu pielietojums.
- 2) Speciālu aizsargpārklājumu izveide.
- 3) Jaunu gaisa dzesēšanas sistēmu izveide.
- 4) Jaunas ražošanas tehnoloģijas izveide dzinēja karstās trakta ražošanā.

GTD konstrukcijā tiek pielietoti dažādi materiāli un ražošanas tehnoloģijas – alumīnija un titāna sakausējumi, dažāda sastāva un pielietojuma tērauds, niķeļa un kobalta supersakausējumi, kā arī grūti kūstoši metāli, platīna sakausējumi un dažādi

### Speciālu materiālu pielietojums

Viena no moderno materiālu grupām kas ir GTD interešu lokā, ir titāna sakausējumi uz  $\gamma$ -TiAl un  $\alpha 2$ -Ti<sub>3</sub>Al intermetālīdu bāzes. Atkarībā no struktūras stāvokļa pēc īpatnējas stiprības  $\gamma$ -TiAl sakausējumi temperatūras diapazonā 600-850°C var pārsniegt visus tradicionālos konstrukcijas materiālus. Šie sakausējumi var tikt pielietoti zemspiediena turbīnu un augstspiediena kompresoru pēdējo pakāpju lāpstiņu ražošanā. Taču pie temperatūrām augstākām par 720-750°C  $\gamma$ -TiAl sakausējumu tehnoloģiskums un karstumizturība nav tik augsti. Tādēļ tiek strādāts pie jaunām jauktam titāna sakausējuma struktūras kombinācijām un speciāliem pārklājumiem karstumizturības paaugstināšanai.

Augstas temperatūras aizsargpārklājums – ir metālkeramisks vai kombinēts aizsargslānis, kas spēj palēnināt vai novērst pamatmateriāla tiešu reakciju ar potenciāli agresīvu ārējo vidi. Pārklājumus nevar vienkārši apskatīt kā inertas barjeras. To aizsargīpašības tiek nodrošinātas pārsvarā uz materiālu iedarbības rēķina kā ar skābekli no ārējas vides, tā arī ar pamata materiālu. Pēc savas būtības pārklājumi ir tādu elementu, kā alumīnijs, hroms, silīcijs, piegādes rezervuārs jaunu pārklājumu pastāvīgai veidošanai termocikliskuma un mehāniskas sagrāves laikā noslāņojošos oksīdu vietā. Tādā veidā pēc aizsargmehānisma būtības pārklājuma darba mūžs tiek noteikts pēc tā spējas veidot, saglabāt un nepieciešamības gadījumā atjaunot vajadzīga sastāva oksīdu aizsargkārtu.

Pārsvarā pārklājumu biezums ir 30-80 μm, kas apgrūtina to pielietošanu plānām lāpstiņām bez aerodinamiskā profila maiņas un izraisa augstus termiskus spriegumus ekspluatācijas laikā.

### **Aizsargpārklājumi**

Galvenās izplatītākas karstumizturīgu pārklājumu iegūšanas tehnoloģiskas metodes:

- 1) Difūzijas piesātinājums (ķīmiski-termiskā apstrāde);
- 2) Plazmas uzputināšana;
- 3) Detonēšanas uzklāšana;
- 4) Vakuuma metodes (elektriskā loka metode, jonu uzputināšana, metāliskās plazmas metode, kondensēšanās pie jonu bombardēšanas metode, jonu implantācija).

### **Difūzijas piesātinājums**

Metode balstās uz ķīmisko elementu atomu satveršanu un pārvešanu no piesātinātas kārtas uz aizsargājamas detaļas dziļumu. Tiek izmantoti vairāki paņēmieni, kas balstās uz pārklājumu izveidošanos no tādiem elementiem kā *Al*, *Cr*, *Si* gan monopārklājumu gadījumā, gan arī savstarpējā kombinācijā, kā arī tiek izmantoti tādi elementi kā *Ti*, *Zr*, *B*, *Fe*. Difūzijas piesātinājums ļauj iegūt pietiekoša biezuma pārklājumus, kuriem ir laba sasaiste ar pamatmateriālu. Kā metodes trūkumus var minēt augstu piesātinājuma temperatūru, kas daudzu materiālu gadījumā sasniedz 1 000-1 100°C.

### **Plazmas uzputināšana**

Pārklājuma uzputināšanas procesā laikā materiāls tiek ievadīts zemas temperatūras ( $10^3$ - $10^5$ °C) plazmā pulvera, stieples vai stieņu veidā.

GTD detaļām pārsvarā pielieto kušņu karstumizturīgus plazmas pārklājumus *GT-29* (*Co-29Cr-6Al-1Y*), *SS-14* (*Ni-17Cr-4,5Si-4B*), *S-57* (*Co-25Cr-10Ni-5Ta-3Al-0,5Y*) tipa.

Minētos pārklājumus pielieto virzošajām lāpstiņām, sprauslām un citām stacionārām detaļām. Plazmas pārklājumu galvenās problēmas ir porainība, zems adhēzijas lietderīgums, oksīdu ieslēgumi, veicot uzputināšanu gaisā. Kā arī ar plazmas tehnoloģiju nav iespējams veidot blīvus plānus pārklājumus ar biezumu līdz 10 μm.

### **Detonēšanas uzklāšana**

5-50 μm lielas pulvera daļiņas tiek uzsildītas un paātrinātas līdz lieliem ātrumiem ar speciālu detonatora veida lielgabalu palīdzību, pateicoties īpašiem gāzes maisījumiem ( $2H_2+O_2$ ;  $C_2H_2+2,5O_2+4N_2$  u.c.), kuriem piemīt detonēšanas nosliece. Viena uzputināšanas cikla (šāviena) rezultātā parasti veidojas 5 μm biezs pārklājums. Pārklājumi ar biezumu 40 μm vienmēr būs vairāku slāņu pārklājumi. Daļiņas ir ciešāk un stingrāk saistītas sava starpā un ar pamatu nekā citos gāztermiskos pārklājumos. Porainums šādiem pārklājumiem ir 2-3%. Augstu temperatūru gadījumā pielieto *LCO-17A (Co-25Cr-10Ta-7Al-0,5Y-2C)-10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* un *LCO-19A (Co-30Cr-10Ta-0,5Y-2C)-10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* tipa pārklājumus. Šajos pārklājumos pamata karstumizturīgas fāzes ir alumīnija un hroma oksīdi. Lai iegūtu nepārtrauktu oksīda kārtu uz virsmas, ir nepieciešams veikt papildus atkvēlināšanu pie temperatūras 900°C 4 stundu laikā. Par klasisku detonācijas pārklājumu piemēru uzskata dzinēju “*Pegas*”, kas tiek pielietots vertikālās pacelšanās lidmašīnām, kuru resurss tika palielināts līdz 1 000 stundām. Kā metodes trūkumus var minēt relatīvi lielas iekārtas izmaksas, atsevišķu skaņas izolācijas telpu ieviešanas nepieciešamību, neiespējamību iegūt nanopārklājumus.

### **Vakuuma metodes**

Vakuuma pārklāšanas metodēm tiek pievērsta arvien lielāka uzmanība pēdējo gadu laikā un tās tiek aizvien vairāk pielietotas dažādas nozīmes pārklājumu izveidē, tai skaitā arī karstumizturības paaugstināšanai.

### **Elektriskā loka metode**

Par vienu no pašām atstrādātākajām karsēšanas metodēm pārklājumu iegūšanai vakuumā var uzskatīt izgarojamā materiāla uzsildīšanu ar katodu bombardēšanas palīdzību. Izplatītākie pārklājumi ir *MCrAlY* tipa, kur M ir *Co*, *Ni*, *Fe*. *CoCrAlY* tipa pārklājumu pielietojums ir plaši izplatīts aviācijas turbīnu *JT8D* darba lāpstiņu aizsardzībai, kuru ekspluatācija notiek sulfīda oksīdu korozijas vidē, ļaujot palielināt resursu 5 reizes salīdzinājumā ar alitētām lāpstiņām un 2,5 reizes salīdzinājumā ar *AIRh* pārklātām lāpstiņām.

### **Jonu uzputināšanas metode**

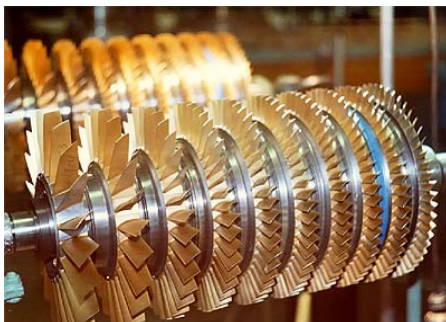
Viena no visstraujāk attīstošākajām pārklājumu iegūšanas metodēm mūsdienās ir jonu uzputināšana. Metodes būtība ir cietas virsmas bombardēšana ar pozitīviem joniem un uzputināto daļiņu nosēšanas uz detaļas virsmas. Izdala četras pamata un kopā pielietojamus jonu uzputināšanas pamatmetodes – diožu, triožu, magnetronu un jonu lielgabala uzputināšana.

Liels uzputināšanas ātrums tiek sasniegts ar jonu strāvas blīvuma palielināšanu un plazmas lokalizāciju pie detaļas virsmas ar stipra šķērslauka palīdzību. Magnetronu sistēmas ļauj iegūt pārklājumus praktiski no jebkādiem materiāliem un sakausējumiem bez iejaukšanās stehiometriskajā sastāvā. Galvenās metodes priekšrocības ir dažu elementu augsts uzputināšanas ātrums (piem., zelts, varš, niķeļa-hroma sakausējums u.c.), pilienu fāzes trūkums, iegūto pārklājumu liels blīvums pat pie neliela biezuma. Pielietojot vienlaicīgi vairākus avotus, ir iespējams veidot daudzkomponentu pārklājumus. Īpaši perspektīvi karstumizturīgie pārklājumi alumotitānīdu sakausējumiem ir sekojoši magnetronu pārklājumu tipi – *Ti-50Al-10Cr*, *CoCrAlY-Pt*, *Ti-48Al-7Cr-2Ag*, *PtAl*, *Ti-55Al-15Cr-0,4Hf* (at.%).

### **Metāliskas plazmas kondensēšanās pie jonu bombardēšanas metode**

Dotā metode balstās uz plazmu iekārtu izmantošanu, kas pielieto katodu plankumu ģenerētu plazmu. Katodu plankumā notiek sprādziena iztvaikošana, kas noved pie uzputināšanas daļiņu plūsmas veidošanas, kuras, savukārt, ietver sevī neitrālus atomus, jonus un pilienus. Pilienu klātbūtne un mazais materiāla izmantošanas koeficients ir šīs metodes pamattrūkumi. Toties tādas priekšrocības kā laba iztvaikošanas un nosēdināšanas procesu vadāmība, jonu bombardēšanas efekta izmantošana, ļauj šai metodei ieņemt ievērojamu vietu citu metožu vidū. Jonu bombardēšana ļauj pārklājuma veidošanas brīdī veikt vairākas funkcijas – aktivizēt, attīrīt un karsēt detaļas virsmu, lai nodrošinātu pietiekamu adhēziju un optimālu temperatūru pārklājuma kondensēšanai pirms uzputināšanas.

Elektriskā loka uzputināšanai izmanto dažādus sakausējumus – *SDP-2(Ni-Cr-Al-Y)*, *BVSDP-16*. 20.gs. 90-to gadu sākumā Rīgas Aviācijas Institūta laboratorija profesora Jurija Skažutina (*Юрий Скажутин*) vadībā, sadarbojoties ar rūpnīcas *404CA* darbiniekiem, izstrādāja un ieviesa ražošanā GTD *TV2-117A* kompresora rotora (1.1.att.) un statora lāpstiņu atjaunošanas tehnoloģiju uz divu komponentu *Ti-N* vakuuma jonu-plazmas pārklājumu bāzes.



1.1.att. GTD *TV2-117A* kompresora rotors ar jonu-plazmas pārklājumu  
(2011.g., *Ural Works of Civil Aviation*)

### **Jonu implantācija**

Pēdējā laikā arvien plašāk pielieto jonu-plazmas implantācijas metodi – jonu iespiešanu. Metode tiek īstenota, veicot materiāla virsmas struktūras izmaiņas ar legēta materiāla jonu, kuru ātrums ir attīstīts līdz augstai kinētiskai enerģijai, iedzīšanu kristāliskajā režģī. GTD lāpstiņām jonu implantācija tiek pielietota pārsvarā kā papildmetode, kas uzlabo virskārtas un starpslāņa struktūru un īpašības.

### **Apstrāde ar lāzeru**

Pārklājumu veidošanā lāzera apstrāde var tikt pielietota arī kā siltuma avots, lai iztvaicētu uzsmidzināšanas materiālu, kā arī turpmākai dažāda veida uzputināto pārklājumu apstrādei struktūras un īpašību uzlabošanai.

## **2. GTD KARSTĀ TRAKTA METĀLKERAMISKĀ NANOPĀRKLĀJUMA KONCEPCIJAS IZSTRĀDE**

### **2.1. Pārklājuma struktūras raksturojums**

GTD turbīnas un kompresora lāpstiņu efektīvas aizsardzības pārklājuma struktūras noteikšanas pamatā ir plānotā pārklājuma slāņu skaits un katra slāņa ķīmiskais sastāvs. Pārklājumi var būt monokomponenti un monostrukturēti vai arī daudzkomponenti un daudzstrukturēti, t.i. saturēt vairākus dažādus elementus un komponentus.

Kā karstumizturīgi materiāli var tikt intermetalīdi, oksīdi, nitrīdi, silīcīdi, karbīdi, borīdi uz alumīnija, hroma, silīcija, titāna un citu metālu pamata.

RTU Aeronautikas institūta vakuuma nanotehnoloģiju laboratorijā pētījumu pamatvirziens ir pārklājumi uz titāna, alumīnija un slāpekļa bāzes. Šo elementu izmantošanas iemesli ir sekojoši – alumīnijs ir viens no dažādu komplekso pielietojamo pārklājumu pamata elementiem, kuri tiek gan uzputināti, gan difūzijas piesātināt. Alumīnijam piemīt arī mazs blīvums – 2,8 g/cm<sup>3</sup>, tas viegli veido savienojumus ar virkni ķīmisko elementu. Alumīnija oksīds –  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  savienojums, kas ir izplatīts dažādās ražošanas jomās – kā karstumizturīgs materiāls tīģeļu, termopāru apvalku ar kušanas temperatūru 2 044°C un blīvumu 3,99 g/cm<sup>3</sup> ražošanā. Alumīnija nitrīds –  $\text{AlN}$  – ir sintētisks materiāls ar blīvumu 3,27 g/cm<sup>3</sup> un mikrociētību 12 GPa, kas oksidējas gaisā pie temperatūras lielākas par 900°C.

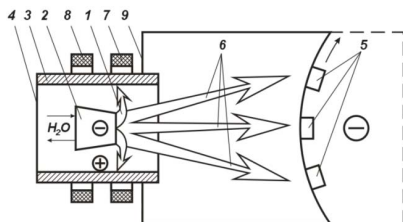
Titāna sakausējumu pamata materiāls ir titāns ar blīvumu 4,507 g/cm<sup>3</sup>. Kušanas temperatūra – 1 668°C, viršanas temperatūra – 3 500°C, vidējais lineārās izplešanās koeficients temperatūras diapazonā no 20°-800°C ir  $10 \times 10^6$ , stiprības robeža – 250-300 MPa, cietība HB – 1000 MPa.

Pie zemām temperatūrām titānam ir augsta korozijas izturība dažādās skābēs un sārmos. Aktīvā titāna oksidēšanās sākas pie temperatūrām lielākām par 600°C – uz virsmas veidojas  $\text{TiO}_2$  oksīdi, skābeklis iekļūst titānā. Temperatūrai paaugstinoties titāns reaģē ar slāpekli, veidojot cietu maisījumu un titāna nitrīdus  $\text{TiN}$  un  $\text{Ti}_3\text{N-Ti}_4\text{N}$ . Vislabāk ir izpētīts un bieži tiek pielietots  $\text{TiN}$  dēļ savas cietības  $H_m$ , kas ir lielāka par 2 000MPa un tam ir labas korozijas īpašības. Pie ļoti augstām kušanas temperatūrām titāna nitrīda karstumizturība ir zema, savukārt, pie temperatūras 700°C oksidēšana ir pietiekoši spēcīga. Kā karstumizturīgu konstrukcijas materiālu plaši pielieto titāna intermetālīdus ar alumīniju  $\gamma$  ( $\text{TiAl}$ ) un  $\alpha 2$  ( $\text{Ti}_3\text{Al}$ ).

## **2.2. Eksperimentālie pētījumi karstumizturīga intermetālkeramiska pārklājuma IMCER un modificēta pārklājuma DIALAT izveidē uz nikela un titāna bāzes GTD lāpstīņu ar kondensācijas un jonu bombardēšanas metodi**

RTU Aeronautikas institūta vakuuma tehnoloģiju laboratorijās tika veikta ievērojama pētījumu virkne ar viena slāņa un daudzslāņu pārklājumu uz  $\text{Ti-Al-N}$  bāzes pielietojumu, izmantojot titāna un alumīnija katodu loka iztvaikošanu slāpekļa un argona atmosfērā uz GTD lāpstīnām no dažādiem materiāliem – siltumizturīgiem tēraudiem, titāna un niķeļa sakausējumiem.

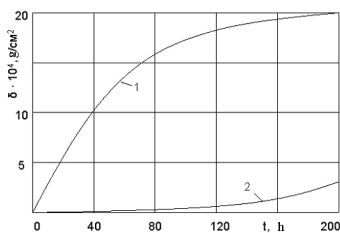
Iegūto pārklājumu pētījumi, kā oksidēšanas, tā arī mākslīgo pelnu korozijas vidē pierādīja savu efektivitāti dažādas temperatūras diapazonā – 760-850°C. Kā viens no pētījuma objektiem tika izmantotas GTD kompresora turbīnas lāpstiņas no niķeļa sakausējuma *EI867A*. Intermetālkeramiskais pārklājums *IMCER* uz alumīnija un titāna pamata tika uzputināts vakuuma iekārtā *NNV-6,6-II* (2.1.att.). Maksimālais pārklājuma biezums sasniedza 40 μm.



2.1.att. Vakuuma uzputināšanas shēma: 1 – plazma, 2 – katods (elektroloka iztvaikotājs), 3 – riņķa (loka) anods, 4 – lielgabals, 5 – apstrādātas detaļas, 6 – uzsmidzināmais materiāls, 7 – fiksējoša magnētiskā spole, 8 – stabilizējoša magnētiskā spole, 9 – vakuuma kamera

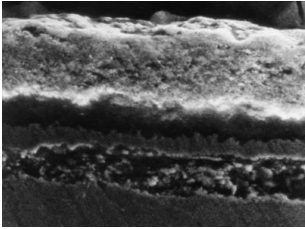
Lāpstiņu karstumizturības izmēģinājumi tika veikti elektrokrāsns gaisa vidē un hlorsērskābes, (kas veidota no suspensijas –  $Na_2SO_4 + NaCl + H_2O$ ), pelnu sakarsētā vidē. Karstumizturība tika vērtētā pēc faktiskā piesvara, kas radies oksidēšanās rezultātā.

Pētījumu rezultāti uzrādīja *IMCER* pārklājuma karstumizturības būtisku palielinājumu salīdzinājumā ar alitēto cinku (2.2att.) – 5-15 reizes, atkarībā no temperatūras iedarbības ilguma.

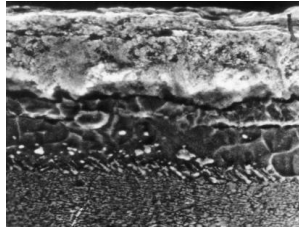


2.2.att. Karstumizturības pētījumu rezultāti krāsns atmosfērā pie temperatūras 950°C:  
1 – alitētā cirkonija pārklājums; 2 – *IMCER* pārklājums

Attēlā 2.3. un 2.4. ir parādīts, ka *IMCER* pārklājumu nav ietekmējis pat ilgstoši augstas temperatūras iedarbība.

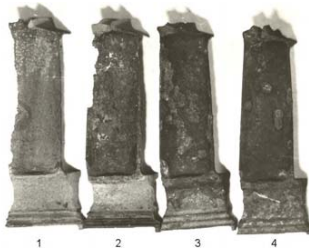


a) 30 stundu laikā



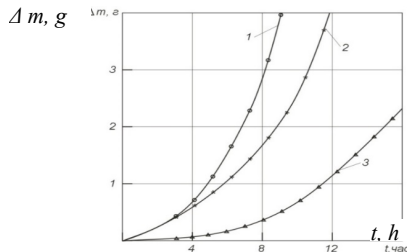
b) 200 stundu laikā

2.3.att. Karstumizturīgā pārklājuma *IMCER* mikrostruktūra pēc karstumizturīgiem pētījumiem pie temperatūras 950°C (palielinājums  $\times 1\,000$ )



2.4.att. Lāpstiņu izskats pēc karstumizturības pārbaudes karstu hlorsēra pelnu vidē:  
 1 – standarta alitēšana; 2 – standarta alitēšana ar atkvēlināšanu 900°C, 2 stundas;  
 3 – cirkonija alitēšana, 4 – intermetāliskais pārklājums *IMCER*.

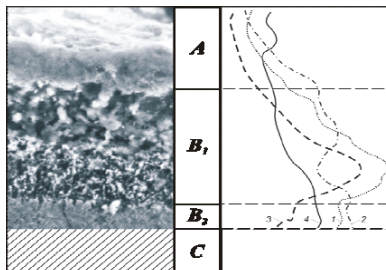
Tika konstatēts, ka intermetāliskais pārklājums *IMCER* atšķiras ar 2-3 reizes lielāku karstumizturību agresīvā vidē salīdzinot ar standarta alitēšanu (2.5.att.).



2.5.att. GTD turbīnas lāpstiņu pārbaudījumu rezultāti uz karstumizturību mākslīgos pelnos 900°C, 18 stundas: 1 – parastā alitēšana; 2 – parastā alitēšana ar atkvēlināšanu 900°C, 2 stundas; 3 – intermetālkeramiskais pārklājums *IMCER* ar atkvēlināšanu 900°C, 2 stundas.

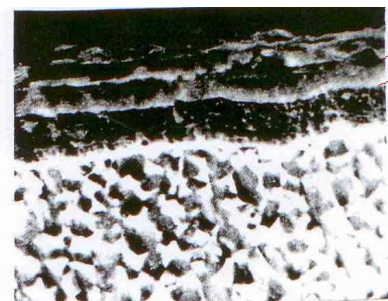


Tika izpēfīta pamatnes pamata elementu (kobalta, volframa, niķeļa, hroma) sadale pārklājumos pēc izmēģinājumiem (2.6.att.). Tika atklāts, ka mikrociētības līknes divas virsotnes pārklājuma šķēlumā ir saistītas ar kobalta un volframa satura palielinājumu šīs vietās.



2.6.att. Sakausējuma *EI867A* pamatnes intermetālkeramiskā pārklājuma pamata elementu sadale pēc karstumizturības izmēģinājumiem 200 stundu laikā: A – keramiskā zona; B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> – difūzijas zonas; C – pamatne; 1, 2, 3, 4 – attiecīgi *Co*, *Ni*, *W*, *Cr* sadale

Vēlāk tika veikts pētījums GTD turbīnas lāpstiņu modificētā pārklājuma *DIALAT* (2.7.att.), kas veidots no *Al* un *Ti*, pielietošanai, ar kondensācijas un jonu bombardēšanas metodi. GTD turbīnas lāpstiņas bija izstrādātas no titāna un siltumizturīgiem sakausējumiem.



2.7.att. Modificētā pārklājuma *DIALAT* struktūra (palielinājums  $\times 1\ 500$ )

Daudzkomponentu pārklājuma *DIALAT* iegūšanai tika izmantota speciālā uzputināšanas programma uz *Al-Ti-N* bāzes. Vienlaicīgi tika izmantoti divi *Al* iztvaikotāji un viens *Ti* iztvaikotājs. Tehnoloģijas izstrādes plānā bija paredzēts sekojošais:

- a) apakšslānis tiek uzputināts ar argona padeves regulēšanu vakuumā;
- b) apakšslānis tiek uzputināts argona un slāpekļa noteiktas attiecības maisījuma, kas tika padots no atsevišķa balona vakuuma līmeņa uzturēšanai, vidē;

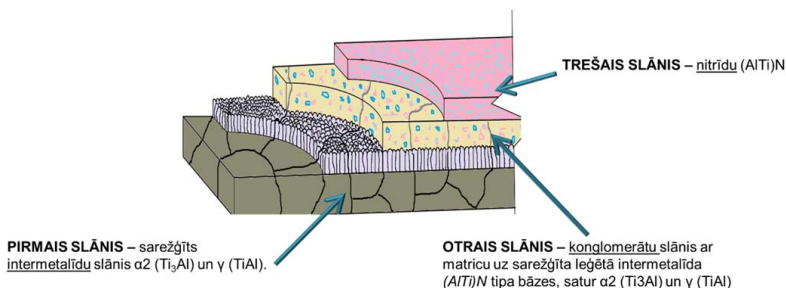
c) ārējais apakšslānis tika uzputināts tūrā slāpekļa retinātā vidē.

Titāna lāpstīņu karstumizturība ar doto pārklājumu pie temperatūras 780°C palielinājās 3.5 reizes.

### 2.3. GTD karstā trakta detaļu karstumizturīga nanopārklājuma fiziskā modeļa izveide

#### Veidojamā pārklājuma struktūra un funkcionālās īpašības

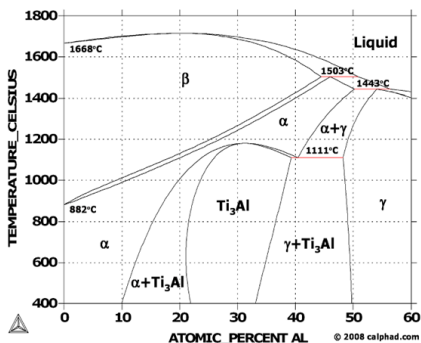
Iegūtie pētījumu rezultāti ļāva izveidot karstumizturīga metālkeramiska NANOKS pārklājuma fizisku modeli GTD karstā trakta detaļām. Sistēmas īpatnības ir trīs slāņu kompozīcijas pielietojumā, kur katram slānim ir cits fāžu sastāvs un specifiskā mikrostruktūra un katrs slānis veic noteiktas funkcijas pārklājumā (2.8.att.).



2.8.att. NANOKS pārklājuma struktūras shēma

Pirmais slānis ir sarežģīts intermetalīdu slānis, kas satur  $\alpha_2(Ti_3Al)$  un  $\gamma(TiAl)$ . Šis slānis var saturēt līdz pat 60% alumīnija, turklāt saglabājot intermetalīdu pamata struktūru. Diemžēl intermetalīdu karstumizturība pie temperatūrām lielākām par 700°C ir ierobežota un tāpēc šī pārklājuma izmantošana bez papildus aizsargkārtas nav efektīva.

Otrais, vidējais slānis ir galvenais slānis un tas nosaka pārklājuma biezumu un karstumizturības īpašības. Šis slānis ir konglomerātu slānis ar matricu uz sarežģīta leģētā intermetalīda ( $AlTi$ )N tipa bāzes un satur  $\alpha_2$  ( $Ti_3Al$ ) un  $\gamma$  ( $TiAl$ ) (2.9.att.), kurā ietilpst titāna un alumīnija nitrīdi. Šajā slānī keramikas vietā pielieto nitrīdus, kuri plastiskākā matricā veido noturīgu pretizsūkņšanās struktūru, kas izskaidrojams ar nitrīdu samērā augsto noturību kontaktā ar alumīniju un titānu.



2.9. att. *Ti-Al* stāvokļa diagramma

Sarežģītajam alumīnija un titāna nitrīdam (*AlTi*)*N*, kura pamatā ir alumīnija nitrīda kristāliskais režģis, ir laba karstumizturība pie temperatūrām ap 800°C. Oksidēšanas laikā uz tā virsmas veidojas noturīgs alumīnija oksīds  $Al_2O_3$ . Konglomerātu struktūra ir efektīvs nanostrukturēts kompozītmateriāls, kas satur matricu un stiprinātāju. Plastiskāka matrica no intermetalīdiem nodrošina pieņemamu plastiskumu un iekšējo spriegumu relaksāciju termociklēšanā. Divu un vairāku kristālisku režģu apvienojums slānī kavē viņu kopējo izaugsmi.

Trešais slānis ir nitrīdu slānis, kas sastāv no kompleksā nitrīda (*AlTi*)*N* ar kristālisku režģi uz alumīnija nitrīda bāzes un pilda papildus aizsargpārklājuma funkcijas, kas uzlabo konglomerāta un lāpstiņu noturību kopumā uz virsmas radušā alumīnija oksīda, kas atjaunojas to bojājot un tādā veidā uztur pārklājuma aizsardzības īpašības ekspluatācijas laikā, rēķina. Nitrīdu slāņa biezums stipras noslāņošanas dēļ ir ierobežots ar dažiem mikroniem, un tiek uzskatīts, ka pārklājuma pamatdaļai būs konglomerātu un intermetalīdu struktūra.

### Karstumizturīga fiziskā modeļa izveides faktoru analīze

GTD karstā trakta detaļu karstumizturīga nanopārklājuma fiziska modeļa izveidē ir nepieciešams ņemt vērā virkni konstruktīvu, tehnoloģisku, materiālzinību, ekspluatācijas faktoru.

### Konstrukcijas īpatnības

Par pētījuma objektu tika izvēlētas helikoptera dzinēja *TV2-117A* kompresora statora (2.10.att.) lāpstiņas no titāna sakausējuma *OT4-1*. Kompresora caurplūdes daļa no pirmās pakāpes līdz pēdējai sašaurinās visiem gāzturbīnas dzinējiem. Kompresora statora lāpstiņas pēdējās pakāpēs ir ļoti plānas – daudziem dzinējiem maksimālais profila biezums ir mazāk

nekā 1 mm. Jebkura lāpstiņas profila ģeometrijas izmaiņa uz pārklājumu uzklāšanas rēķina izmaina arī apteces režīmus. Izmainās arī kopējais dzinēja gaisa patēriņš un kompresora saspiešanas pakāpe. Tas viss ietekmē dzinēja degvielas patēriņu un lietderības koeficientu kopumā. Profila relatīvais biežums parasti tiek mērīts procentos, un tā izmaiņa par 1% jau ir jauns profils ar citām aerodinamiskām īpašībām. Šo iemeslu dēļ pārklājumam, īpaši remontpārklājumam, kas tiek uzklāts uz jau gatavām lāpstiņām bez speciālā ģeometrijas aprēķina, ir jābūt lāpstiņas biežuma 1% robežās. Tādā veidā pie lāpstiņu biežuma 1 mm, pārklājuma biežumam nav jāpārsniedz 10  $\mu\text{m}$  no abām pusēm vai 5  $\mu\text{m}$  uz katru pusi. Tā ir atšķirība no vairuma citiem lāpstiņu pārklājumiem, kuru biežums var būt mikronu desmiti vai simti. Tik smalkam pārklājumam ir jābūt ļoti blīvam un vienmērīgam pa visu kontūru.

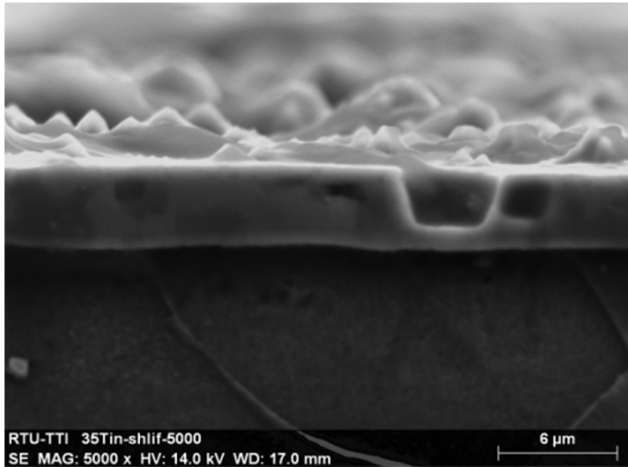


2.10.att. GTD *TB2-117A* kompresora stators

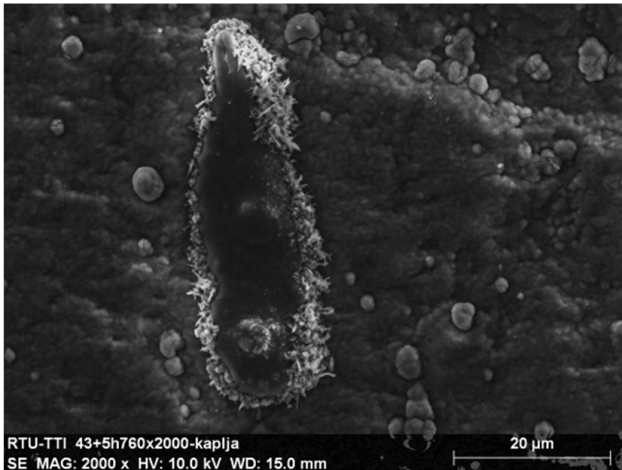
### **Materiālzinību īpatnības**

Ir nepieciešams, lai formējošā pārklājuma struktūra saturētu minimālu pilienu fāzi jonu-plazmas kondensācijas uzsmidzināšanas procesā (2.11., 2.12.att.). Zemspiediena loka jebkuru metālu iztvaikošanu pavada dažādu izmēru liela daudzuma pilienu veidošanās.

Daži pilieni, kuriem ir vāja saķere ar pārklājuma pamata daļu, var izkrist no tā struktūras un veidot ievērojamus defektus – poras (2.11.att.). Tā rezultātā parādās zemas karstumizturības lokālā zona. Maksimālais  $A_l$  un  $T_i$  pilienu izmērs ir 0.1-100  $\mu\text{m}$  un 0.2-15  $\mu\text{m}$  attiecīgi. Alumīnija jonu mazā masa kopā ar mazu jonizāciju kavē iegūt tīru uzsmidzināšanu, un noved pie uzsmidzināšanas laika pieauguma vai arī veicina praktiski neiespējami uzsildīt detaļas ar jonu bombardēšanu bez materiāla nosēšanās uz tā virsmas.



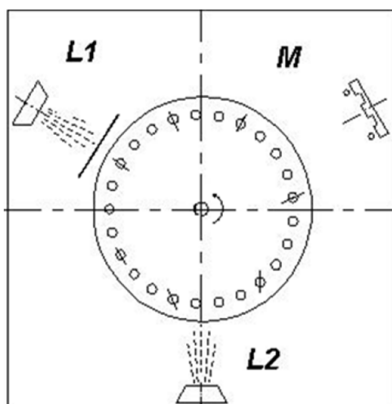
2.11.att. Pārklājuma defekts liela piliena izkrišanas dēļ (palielinājums  $\times 5\ 000$ )



2.12.att. Titāna oksīda adatas veida veidošanās liela piliena malās (palielinājums  $\times 2\ 000$ )

### Tehnoloģiskās īpatnības

Lai izvairītos no pilienu veidošanās ietekmes uz veidojamā materiāla pārklājumu, bija nepieciešama vakuuma iekārtas *HHV-6,6-II* ievērojama modernizācija. Modernizētai iekārtai uzputināšanas *HHV-6,6-II* (2.13.att.) ir trīs uzputināma materiāla avoti – divi elektroloka iztvaikotāji un viens pastāvīgas strāvas planārs magnetronu izsmidzinātājs.



2.13.att. Uzputināšanas shēma

Titāns tiek uzputināts ar elektrisko loku, bet alumīnijs – magnetrona devējā.

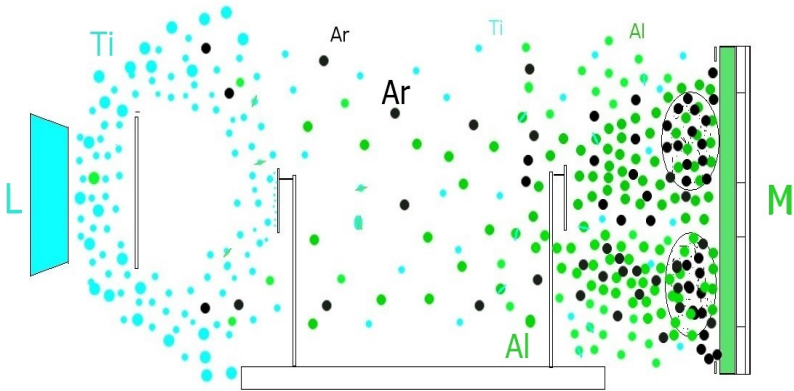
Pirmais loka iztvaikotājs – **L1** – ir uzputināma materiāla (titāna) un pirmatnējais jonu bombardēšanas avots. Loka avota iztvaikotāja minimālais strāvas stiprums ir 45 A. Pirms loka iztvaikotāja tiek uzstādīts speciālais centrālais ekrāns, lai nodrošinātu uzdoto alumīnija un titāna attiecību un mazinātu pilienu fāzi pārklājumā.

Otrais loka (titāna) iztvaikotājs – **L2** – tiek pielietots bez papildus ekrāna un tikai lāpstiņu attīrīšanai un uzkaršēšanai pirms uzputināšanas. Pastāvīgas strāvas magnetrons – **M** – planārs magnetrons “*Magnetrons-2*”. Gāzes padeve kamerā tiek īstenota atsevišķi. Argons tiek padots sprauslā starp katodu un anodu un kalpo alumīnija uzputināšanai un bāzes spiediena regulēšanai kamerā. Gāze tiek padota caur pieteces iekārtu *SVA-2* ar manuālo gāzes plūsmas regulēšanu. Slāpekļis tiek atsevišķi padots divas vietās kamerā caur elektromagnētisku pieteces iekārtu, kurai var automātiski regulēt gāzes plūsmu ar vadību.

## **Nanostrukturētā pārklājuma atsevišķu slāņu uzputināšanas tehnoloģijas īstenošanas programma**

### **Intermetalīdu pārklājums**

Intermetalīdu pārklājuma ar uzdotu ķīmisku sastāvu īstenošanai tiek pielietota shēma (2.14.att.).



2.14.att. Intermetalīdu pārklājuma iegūšanas principiālā shēma.

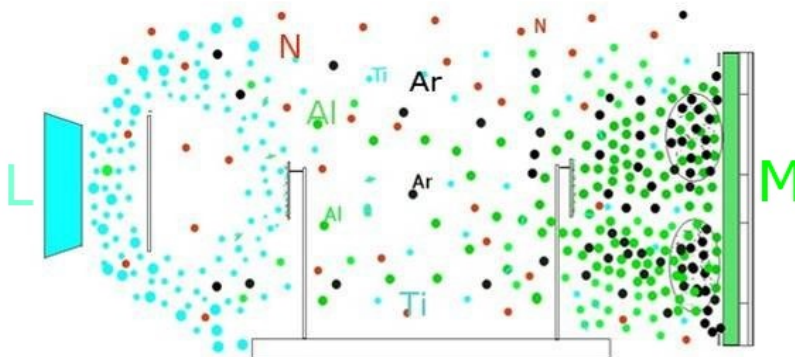
(Ar-argona atomi, Ti-titāna atomi, Al-alumīnija atomi, L-loka iztvaikotais, M-manetrons)

Loka iztvaikotāja strāva 50 A uztur nepieciešamo titāna daudzumu uz lāpstiņu virsmas. Spoles stabilizējošā strāva 0,7 A nodrošina titāna katoda stabilu darbu un vienmērīgu iztvaikošanos. Fokusējošas spoles strāva 0,5 A paātrina titāna plazmas plūsmu virzienā uz detaļām, paaugstina tā blīvumu centrālā iztvaikotāja daļā un pietiekoši atdala pilienu fāzi. Magnetrona strāva 7 A uztur uzputināma alumīnija daudzumu. Magnetrona spriegums 400 V tiek uzturēts automātiski. Argona spiediens ( $6,10^{-4}$  mmHg) nodrošina pietiekoši lielu alumīnija mērķa izsmidzināšanu.

Ķīmiskā sastāva izlīdzināšana pēc slāņa tiek nodrošināta ar lāpstiņu griešanu ap savu asi un galda griešanos. Šādi lāpstiņas nepārtraukti atradīsies vietās ar dažādu elementu koncentrāciju, un pārklājums veidosies no atsevišķiem titāna un alumīnija atomiem. Maksimāli iespējama detaļu atbalstspriegums 60 V paaugstina uzputināmā materiāla savākšanu bez tā biezuma samazināšanas.

### Konglomerātu pārklājums

Konglomerātu pārklājuma iegūšanai ir nepieciešams nodrošināt vienlaicīgu *Ti* un *Al* intermetalīdu un nitrīdu klātbūtni slānī. Tāpēc uzputināšanas shēma mainās (skat.2.15.att.). Galvenā atšķirība no intermetalīdu uzputināšanas shēmas ir slāpekļa ielaišana uzputināšanas kamerā. Gāze tiek padota no divām pusēm. Izgarotā viela virzoties no katoda uz detaļas virsmu saduras ar gāzes atomiem un joniem.



2.15.att. Konglomerātu pārklājuma iegūšanas principiālā shēma  
(Ar-argona atomi,Ti-titana atomi,Al-alumīnija atomi,N-skapekļa atomi,L-loka iztvakotais,  
M-manetrons)

Argons tiek padots pie magnetrona mērķa daudzumā, kas ir nepieciešams, lai veidotu noteiktā biezuma bufera zonu, kas daļēji liedz iespēju slāpeklim tikt cauri. Uzputināšanas procesa regulēšanas atvieglošanai tiek paaugstināts argona spiediens līdz  $3 \times 10^{-3}$  mmHg. Slāpekļa padeve tiek automātiski regulēta, un parciālais spiediens tiek nodrošināts  $0,4 \times 10^{-3}$  mmHg. Kopējais spiediens kamerā sastāda  $3,4 \times 10^{-3}$  mmHg.

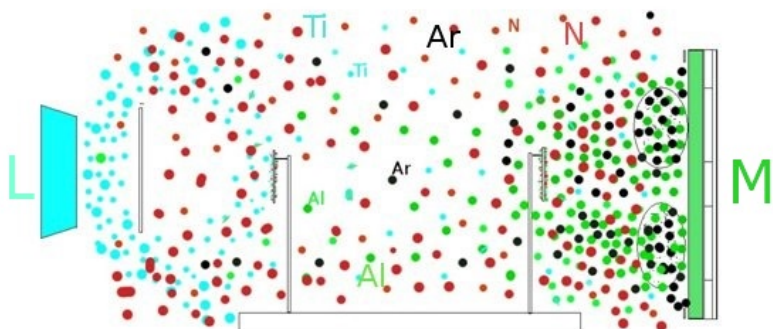
Titāna iztvaikotāja strāva – 50 A. Stabilizējošās spoles strāva – 0,7 A. Fokusējošās spoles strāva – 0,5 A. Magnetrona strāva – 7 A. Magnetrona spriegums – 280 V samazinās katoda ar slāpekli „saindēšanas” efekta dēļ. Detaļu atbalstspriegums – 80 V.

### Nitrīdu pārklājums

Lai izveidotu nitrīdu pārklājumu (2.16.att.) ir nepieciešams, lai uzputinātā materiāla lielākā daļa mijiedarbotos ar slāpekli un veidotu nitrīdu. To var sasniegt, paaugstinot slāpekļa parciālo spiedienu līdz  $1,4 \times 10^{-3}$  mmHg līmenim, pie kura elektronu brīvā ceļa garums bez sadursmes ar slāpekļa atomiem ir mazāks par 3-5 cm. Kopējais spiediens tiek uzturēts  $4,4 \times 10^{-3}$  mmHg.

Titāna iztvaikotāja strāva – 50 A. Stabilizējošās spoles strāva – 0,7 A. Fokusējošās spoles strāva – 0,5 A. Magnetrona strāva – 7 A. Magnetrona spriegums – 280 V samazinās katoda ar slāpekli „saindēšanas” efekta dēļ. Detaļu atbalstspriegums – 80 V.





2.16.att. Nitrīdu pārklājuma iegūšanas principiālā shēma  
(Ar-argona atomi,Ti-titana atomi,Al-aluminiija atomi,N-skapekļa atomi,L-loka iztvakotais,  
M-manetrons)

### 3. DETAĻU AR DAUDZSLĀŅU KARSTUMIZTURĪGIEM PARKLĀJUMIEM PARAMETRISKĀ DROŠUMA PROGNOZĒŠANA,IEVĒROJOT TO FIZIKĀLI MEHĀNISKUS RAKSTUROJUMUS UN EKSPLUATĀCIJAS NOSACĪJUMUS

Promocijas darbā 3.daļā ir izskatīti detaļu ar vairāku slāņu karstumizturīgu pārklājumu atteikumu matemātiskie modeļi, ņemot vērā fizikālās un mehāniskās īpašības un ekspluatācijas nosacījumus

#### 3.1. Atteikumu modeļi detaļām ar aizsargpārklājumiem

Lai tehniskā sistēma un tās elementi būtu darbaspējīgā stāvoklī, sistēmas darba parametriem ir jābūt noteiktās robežās, kuras nosaka sistēmas funkcionalitātes nozīme. GTDz karstā trakta detaļu darbības laikā tiek novērotā detaļu materiāla pakāpeniskā oksidēšanās. Ņemot vērā pārklājuma oksidēšanas lineāro likumu:

$$m_{ox}(t) = m_o(t=0) + I_{ox}t, \quad (3.1)$$

tiek noteikts detaļas bezatteikuma darba laiks pie augstām temperatūrām

$$T = \frac{[m_{ox}] - m_{ox}(t=0)}{I_{ox}} \quad (3.2)$$

kur  $I_{ox}$  – oksidēšanas intensitāte,  $m_o(t=0)$  – oksīda sākuma masa.

Darbā tiek izskatīti dažī GTDz lāpstiņu atteikuma vispārīgie modeļi, kurus izraisa aizsargpārklājumu oksidēšanās, kā arī tiek dots lāpstiņu bezatteikuma darba varbūtības novērtējums pie noteiktām robežām – slāņa (minimālā) robežbiezuma  $[a_{ox}]$ , kas atbilst pieļaujamajam masas pieaugumam  $[m_{ox}]$ .

$$P(t) = \Phi \left\{ \frac{M[m_{ox}(t=0)] + I_{ox}t - [m_{ox}]}{\sqrt{D[m_{ox}(t=0)]}} \right\} \quad (3.3)$$

šeit  $P(t)$  – varbūtība, ka ar laiku  $t$  plāvas masas pieauguma realizācija sasniegs robežlielumu  $[m_{ox}]$ ;  $\Phi(m_{ox})$  – Laplasa funkcija tiek noteikta:

$$\Phi(m_{ox}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (3.4)$$

Laplasa funkcija tiek attēlota tabulas veidā, kas ļauj salīdzinoši viegli noteikt bezatteikuma darba varbūtību GTDz lāpstiņām ar pārklājumu.

### 3.2. Detaļu ar karstumizturīgiem pārklājumiem parametriskā drošuma prognozēšana

Tiek pieņemts, ka pārklājuma virsma nav viendabīga, un tās biezums un oksidēšanas ātrums ir gadījuma lielumi pie sadalījuma likumiem  $f(v_{ox})$  un  $\mu(a)$ .

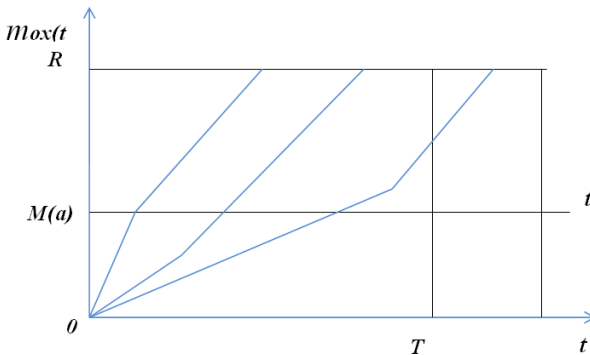


Fig. 3.1. Atteikumu modelis detaļām ar pārklājumu mainīga biezumā un mainīgu oksidēšanās likmi

Varbūtības blīvums pakāpeniska parametru atteikuma gadījumā ir sekojošs:

$$q(t) = \int_0^{\infty} \frac{a}{t - \frac{a}{V_{ox.pam}}} f \left( \frac{a}{t - \frac{a}{V_{ox.pam}}} \right) \mu(a) da, \quad t > \gamma. \quad (3.5)$$

kur  $R = [m_{ox}(t)]$  – robežoksidēšanās (pieļaujama oksīda masas pieaugums);  $V_{ox.pam}$  - detaļas pamatmateriāla oksidēšanās ātrums.

Iegūtās izteiksmes ļauj atrast bezatteikuma darba varbūtību detaļām ar vairāku slāņu, mainīga biezuma un mainīga nodiluma ātruma pārklājumu.

Kopumā iepriekš minētās analītiskās atkarības ļauj novērtēt bezatteikumu darba varbūtību detaļām ar vairāku slāņu pārklājumu, kas tiek ekspluatētas augstas temperatūras apstākļos, atrast optimālo pārklājuma biezuma vērtību un prognozēt detaļas resursu kopumā.

#### 4. VAIRĀKU SLĀŅU NANOPĀRKLĀJUMA UZ *Ti-Al-N* BĀZES MONOSLĀŅU OKSIDĒŠANĀS NOVĒRTĒJUMS

Titāna sakausējumu ar nanostrukturētiem pārklājumiem uz *Ti-Al-N* bāzes karstumizturības līmeņa paaugstināšanas iepriekšējai noteikšanai ir nepieciešams izpētīt karstumizturības īpašības atsevišķu slāņu un to kombināciju dažādās attiecībās. Par pētījuma objektu tika izvēlēts tehniskais titāns ar alumīnija saturu apmēram 2% un mangāna saturu apmēram 1,8% – tuvs analogs ir sakausējums *OT-4*.



4.1.att. Modernizētas iekārtas *NNV-6, 6-II* uzputināšanas kamera

Tika veikta pārklājumu iegūšanas eksperimentu sērija. Visi pārklājumi tika uzputināti modernizētā iekārtā *NNV-6, 6-II* pie sekojošas uzputināšanas shēmas (4.1.att.):

Tika uzputinātas trīs pārklājuma paraugu partijas:

75 – intermetalīdu pārklājums

76 – konglomerātu pārklājums

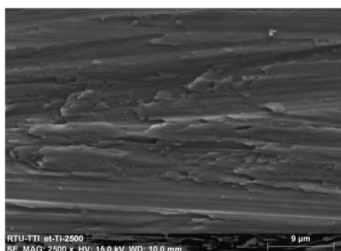
77 – nitrīdu pārklājums

Pārklājuma ķīmiskais sastāvs un mikrostruktūra tika noteikti ar rastra elektronmikroskopa *HITACHI-S3000N* rentgena energodispersijas spektrometra *BRUKER* palīdzību pie palielinošā sprieguma 8,6 kV.

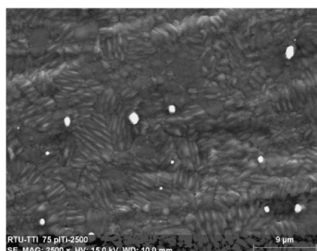
Tabula 4.1.

Pārklājumu sērijas 75-76-77 uzputināšanas parametri

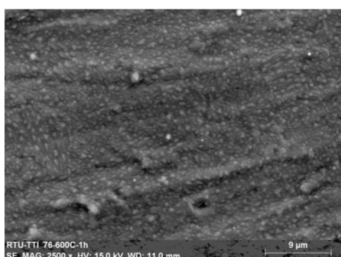
	Iztvaikotāja strāva $J_1, A$	Magnetrona strāva $J_m, A$	Magnetrona spriegums $U_m, V$	Argona spiediens uzputināšanas kamerā. $P_{Ar}, mmHg$	Slāpekļspiediens uzputināšanas kamerā $P_N, mmHg$	Detaju atbalstspriegums $U_{bas-}, V$	Uzputināšanas laiks min
75	50	7	350	$6 \times 10^{-4}$	-	60	40
76	50	7	280	$3 \times 10^{-3}$	$0,2 \times 10^{-3}$	60	40
77	50	7	220	$3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	60	40



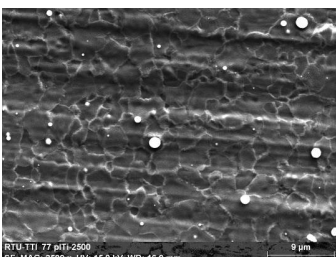
a) Kontrolparaugs (palielinājums  $\times 2\ 500$ )



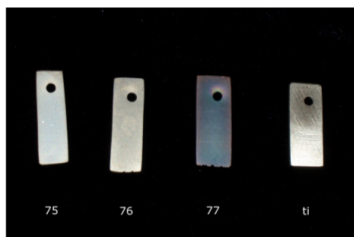
b) Pārklājums 75. (palielinājums  $\times 2\ 500$ )



c) Pārklājums 76. (palielinājums  $\times 2\ 500$ )

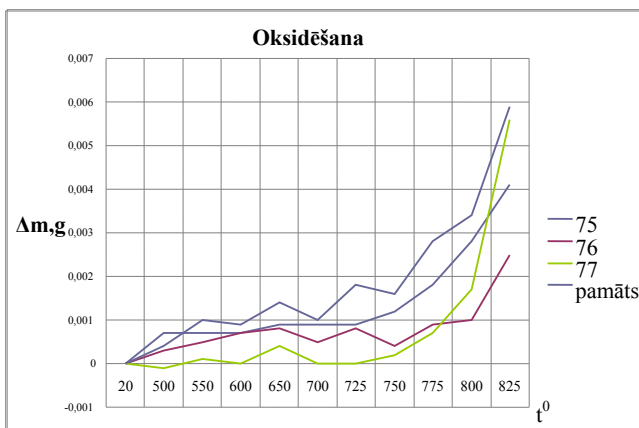


d) Pārklājums 77. (palielinājums  $\times 2\ 500$ )



e)

4.2.att. Izejas paraugi pirms oksidēšanās izmēģinājumiem



4.3.att. Paraugu svara pieaugums oksidēšanās izmēģinājumu gaitā



a) pie 600°C

b) pie 775°C

c) pie 825°C

4.4.att. Pārklājumu 75, 76 un 77 virsmas topogrāfijas izmaiņas oksidēšanās izmēģinājumu gaitā

### Secinājumi

Balstoties uz veiktajiem eksperimentiem, var veikt sekojošus secinājumus:

- 1) Promocijas darbā pētītie dažādā sastāva monopārklājumi var tikt veiksmīgi izmantoti titānu sakausējumu aizsardzībai no oksidēšanās. Vairāku slāņu pārklājumā viņu relatīva izturība pēc pārklājuma intensitātes koeficienta veiktajos

- izmēģinājumos pie temperatūras 750°C līdz intensīvas oksidēšanās rašanās mirklīm veido 1,33 intermetalīdu slānim, 4 konglomerātu slānim un 8 nitrīdu slānim.
- 2) Visu monoslāņu ar biezumu līdz 0,6 μm pie temperatūrām lielākām par 800°C ilgstoša izturība nav pietiekoša, jo sākot no 775°C sākas paātrināts masas pieaugums. Sākotnējo izmēģinājumu maksimālas temperatūras nevar pārsniegt 750°C.
  - 3) Maksimāli stabils ir konglomerātu pārklājums, kuram ir arī jāveido vairāku slāņu pārklājuma pamats. Kaut gan nitrīdu pārklājumam ir visaugstākais efektivitātes koeficients pie temperatūras 750°C, tas nevar būt par pamatu, jo nitrīdām kā tīrai keramikai nav pietiekoši lielas plastiskuma rezerves pie augstas elastības moduļa.
  - 4) Nitrīdu pārklājumam ir laba izturība pret oksidēšanos, pat ar ļoti plānu slāni, bet šim pārklājumam ir nepieciešama starppārklājuma barjera, kas izmaina smalkgraudainības nosēšanās sākotnējo struktūru un palielina nitrīda slāņa izturību skābekļa iekļūšanai zem titāna slāņa.
  - 5) Intermetalīdu pārklājumam piemīt pietiekoša izturība pie temperatūrām līdz 650°C. Tas var tikt izmantots kā starpslānis, kas veicina specifiska mikroreljefa veidošanos uz virsmas un tiek izmantots difūzijas saitei starp slāņiem.
  - 6) Intermetalīdu un konglomerātu pārklājumi satur pietiekoši lielu alumīnija daudzumu – apmēram 70%. Šī alumīnija koncentrācija ir pietiekoša, lai ilgstošu laiku saglabātu intermetalīda struktūru abos pārklājumos alumīnija ekspluatācijas gaitā.

## **5. INTERMETALĪDU, KONGLOMERĀTU UN NITRĪDU MONOSLĀŅU ATTIECĪBAS NOTEIKŠANA VAIRĀKU SLĀŅU KARSTUMIZTURĪGA METĀLKERAMISKAJAM PĀRKLĀJUMAM UZ *TI-AL-N* SISTĒMAS BĀZES**

### **5.1. Pētāmie pārklājumi**

Ir nepieciešams noskaidrot, cik biežam ir jābūt vairāku kārtu pārklājuma katram slānim – intermetalīdu, konglomerātu un nitrīdu. Tika veikta 85., 86., 87. Pārklājumu uzputināšanas eksperimentu sērija, kur tika pielietoti katra atsevišķa slāņa uzputināšanas režīmi atbilstoši 75., 76., 77. Pārklājumu tehnoloģijai (Tabula 5.1.). Visu sēriju uzputināšana tika veikta pie vienādiem tehnoloģijas parametriem. Tika mainīts tikai uzputināšanas laiks katram no slāņiem atkarībā no prioritātes. Bez papildus optiskā palielinājuma var konstatēt, ka visu slāņu pārklājums ir līdzens ar rozā – dzeltenīgu nedaudz lillā iekrāšu vidējā daļā.

Mikrocietība  $H_{20}$

Pārklājums 85-  $H_{20} = 3750\text{MPa}$ ,

Pārklājums 86-  $H_{20} = 6290\text{MPa}$ ,

Pārklājums 87-  $H_{20} = 5320\text{MPa}$ .

Tabula 5.1.

Pārklājumu 85-86-87 slāņu uzputināšanas laiks

	Intermetalīdu slāņa uzputināšanas laiks, min	Konglomerātu slāņa uzputināšanas laiks, min	Nitrīdu slāņa uzputināšanas laiks, min
85	10	40	60
86	10	60	40
87	30	40	40

Pēc tabulas 5.1.: 85 – nitrīda slāņa prioritāte

86 – konglomerātu slāņa prioritāte

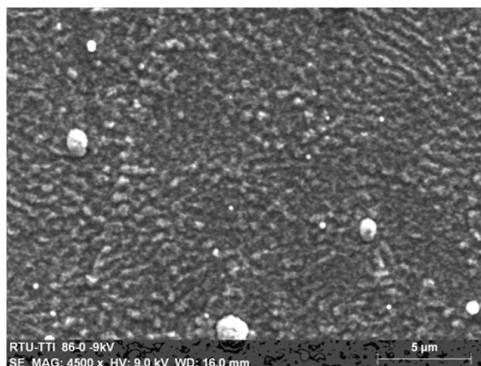
87– intermetalīdu slāņa prioritāte

Tabula 5.2.

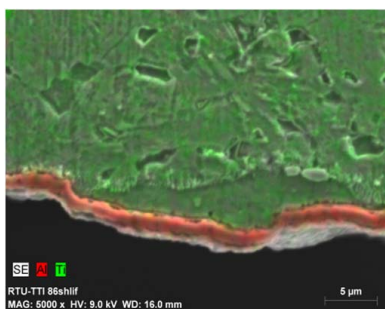
85-86-87 pārklājumu sērijas uzputināšanas režīmi

Slānis	Iztvaiko tāja strāva $J_1$ , A	Magnetrona strāva $J_m$ , A	Magnetrona spriegums $U_m$ , V	Argona spiediens uzputināšanas kamerā. $P_{Ar}$ , mmHg	Slāpekļspiediens uzputināšanas kamerā $P_N$ , mmHg	Detalju atbalstspriegums $U_{bas}$ , V	Uzputināšanas laiks, Pārklājumu 85,86,87 min
1	50	7	350	$7 \times 10^{-4}$	-	60	85- 10 86- 10 87- 30
2	50	7	280	$3 \times 10^{-3}$	$0,2 \times 10^{-3}$	60	85- 40 86- 60 87- 40
3	50	7	230	$3 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	60	85- 60 86- 40 87- 40

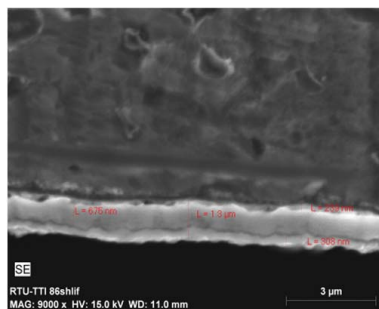
Pārklājumu struktūrai elektronu mikroskopiskā līmenī ir smalki dispersēts vienveidīgs blīvs reljefs (skat.5.1.att.). Nanokristālu izmērs ir no 130 nm 85.paraugam un 86.paraugam līdz 250  $\mu\text{m}$  87.paraugam. Paraugos parādās ne pārāk spilgti izteikta nanokristālu koagulācija lielākajos nenoteiktas formas graudos līdz 1,5  $\mu\text{m}$  lielumā. Pirmatnējais virsmas reljefs pēc slīpēšanas ir tikai nedaudz saskatāms 85.paraugam, bet izlīdzinās ar uzklāto pārklājumu.



5.1.att. 86.pārklājuma virsmas mikrostruktūra (palielinājums  $\times 4\,500$ )



a) (palielinājums  $\times 5\,000$ )



b) (palielinājums  $\times 9\,000$ )

5.2.att. 86.pārklājuma lāpstiņas šķērsgriezums

86.pārklājumu lāpstiņas šķērsgriezumā ir labi saskatāmi visi trīs slāņi. Pārklājuma 50% fluorūdeņražskābes atšķaidītā glicerīnā šķidruma pazeminātā īpaši konglomerātu un nitrīdu slāņiem. Tas liecina par paaugstinātu korozijas noturību pat tādas agresīvas vidēs. Pārklājums ir pietiekoši līdzens un labi atkārtu pamata materiāla makroreljefu. Virsmas mikroreljefu nosaka formēta pārklājuma mikrokristalītu forma un izmēri.

Kopējais vairāku slāņu biezums ir apmēram  $1,3\ \mu\text{m}$ :

- Intermetalīdu slānis –  $0,239\ \mu\text{m}$
- Konglomerātu slānis –  $0,308\ \mu\text{m}$



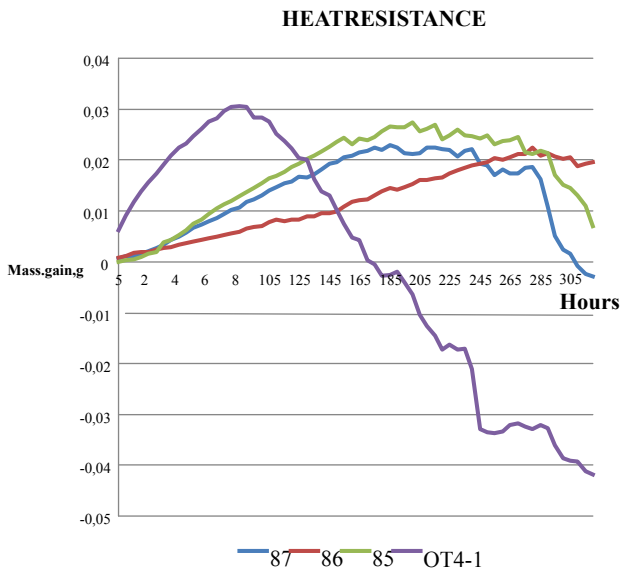
## 5.2. Pārbaude uz ilgstošu karstumizturību

Izmēģinājumu pamata parametri ir sekojoši:

- 1) Temperatūra – 730°C
- 2) Cikla ilgums – 5 stundas
- 3) Kopējais izmēģinājumu laiks – līdz noturīgākā pārklājuma sabrukšanai
- 4) Karstumizturības novērtēšanas parametri – masas pieaugums, pārklājuma struktūras un ķīmiskā sastāva izmaiņa, oksidētas kārtas noslāņošanās
- 5) Atmosfēra – elektrokrāsns oksidēšanās atmosfēra

Pirms katra izmēģinājumu cikla tika veikta nosvēršana, fotografēšana, virsmas stāvokļa novērtējums – krāsas maiņa, noslāņojumu klātbūtne u.tml.

Pēc izmēģinājumu rezultātiem tika konstruēti masas pieauguma grafiki (skat.5.3.att.).



5.3.att. Karstumizturības grafiks

Izmēģinājumi ilga 320 stundas. Pētījumu rezultātā lāpstiņas bez pārklājuma un ar visu veidu pārklājumiem izņemot 86.pārklājumu pārgāja paātrinātas sabrukšanas stadijā ar masas zudumiem. 86.pārklājuma izmēģinājumi tika apstādīnāti, lai veiktu pārklājuma atlikuma iekšējās struktūras kontroli. Karstumizturības grafikā katram pārklājuma un lāpstiņas bez

pārklājuma tiek atzīmēti svarīgie punkti – maksimālā pieauguma masa, kritiskā sabrukuma sākums, pie kura noslāņošanās ir vairāk nekā oksidēšanas. Pēc veiktajiem izmēģinājumiem pārklājumu efektivitāte skaitliskā veidā ir vērtēta pēc laika ( $T_{aB}$ ) – maksimālā pieauguma masas laika un kritiskā sabrukuma sākuma laika attiecības dažādu veida pārklājumu gadījumā salīdzinot iegūto lielumu pret lāpstiņu bez pārklājuma. Šis rādītājs raksturo ilgstošu karstumizturību.

Tabula 5.3.

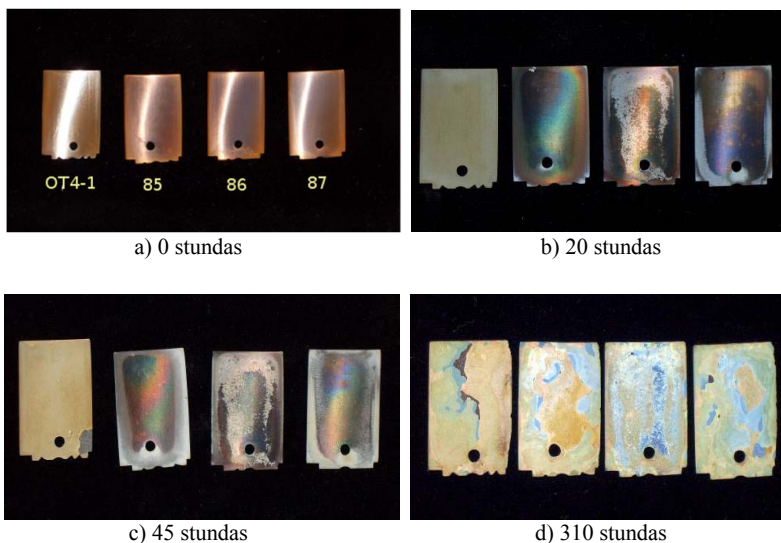
Pārklājumu efektivitāte pēc laika

	85		86		87		OT4-1	
	Maksimālā	Kļūda	Maksimālā	Kļūda	Maksimālā	Kļūda	Maksimālā	Kļūda
Laiks	200	290	280	320	185	285	85	90
Efektivitāte	2,35	3,22	3,29	3,55	2,17	3,16	1	1

Tabula 5.4.

Pārklājumu efektivitāte pēc pieauguma masas

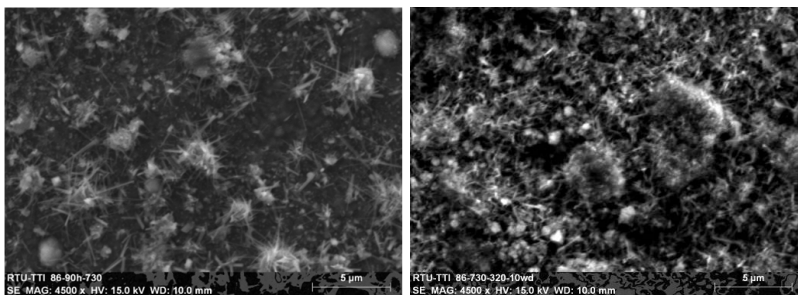
	85	86	87	OT4-1
Masas pieaugums 75 h, [g]	0,0113	0,0052	0,0094	0,0297
Efektivitāte	2,63	5,71	3,15	1



5.4.att. Lāpstiņu ārējā izskata izmaiņas karstumizturības izmēģinājumu gaitā

### 5.3. Virsmas elektromikroskopiskā analīze pēc izmēģinājumiem uz ilgstošu karstumizturību

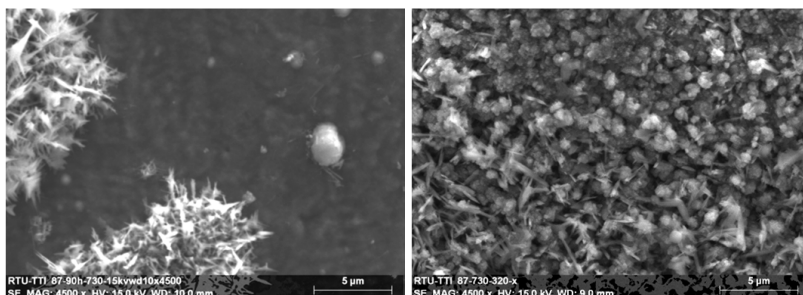
Izpēte tika veikta katram pārklājumam pie 5, 30, 90 un 320 stundas izturēšanas karstumizturības izmēģinājumu gaitā



a) 90 stundas

b) 320 stundas

5.5.att. 86.pārklājuma virsmas mikrostruktūra (palielinājums  $\times 4\ 500$ )



a) 90 stundas

b) 320 stundas

5.6.att. 87.pārklājuma virsmas mikrostruktūra (palielinājums  $\times 4\ 500$ )

85.un 86.pārklājumiem ir visas oksidēšanas procesa attīstības raksturīgās iezīmes – blīvi oksīdi, adatas, lodes formas izaugumi un noslāņojušies oksīdi.

87.pārklājuma mikrostruktūras izmaiņas karstumizturības izmēģinājumos praktiski sakrīt ar 85.un 86.pārklājumu, jo līdzīgi veidojas saliņas adatu veidā, kas ar laiku saplūst vienā heterogēnā struktūrā. Galvenā atšķirība ir novērojama eksperimenta pēdējās stadijās – līdzās adatu fāzei oksīdā ir arī pietiekoši liela skaita akmeņveida fāzes izmērā mazāk nekā 100 µm, kas veido lielākas granulas līdz 1,5 µm šķērsgriezumā.

Lāpstīņai, kurai nav pārklājuma, oksidēšanas procesā uz virsmas nepārtraukti veidojas

adatu formas oksīds ar noslieci uz intensīvu pieaugumu. Turpmākā oksidēšanās procesā oksīda struktūra kļūst ārkārtīgi irdena ar mazu blīvumu, augstu virsmas reakciju un zemu kontaktu ar pamatslāni.

**Secinājumi pēc karstumizturības izmēģinājumiem sakausējuma *OT4-1* lāpstiņām ar 85., 86. un 87.pārklājumiem un sakausējuma *OT4-1* lāpstiņai bez pārklājuma:**

- 1) Visi pārklājumi uzrādīja pozitīvu efektu salīdzinājumā ar lāpstiņu bez pārklājuma ar maksimālu efektivitāti pie 25-30 stundas izturēšanas.
- 2) Vislielākais efekts pēc maksimālā masas pieauguma ir 5,71 un vislielākā stabilitāte un noturība pret oksidēšanos ir 86.pārklājumam ar konglomerāta prioritāti.
- 3) Pie nelielas izturēšanas – līdz 20 stundas – lielāko efektivitāti līdz 15-30 uzrādīja 85.pārklājums ar nitrīda slāņa prioritāti.
- 4) Lāpstiņu ar un bez pārklājuma oksidēšanās procesa intensitāte tiek noteikta pēc dzeltenas krāsas adatas formas fāzes veidošanās ar augstu titāna dioksīda saturu un plānas oksīda kārtas stabilitātes uz alumīnija oksīda pamata, kas aizsargā virsmu no turpmākas skābekļa iekļūšanas materiālā.
- 5) Pārklājuma stabilitāte ir atkarīga no alumīnija un titāna koncentrācijas. Izmēģinājumu gaitā visos pārklājumos šī attiecība kritās. Pie alumīnija koncentrācijas lielākas par 50% pārklājums ir diezgan noturīgs. Pie alumīnija koncentrācijas mazākas par atomāru 20% alumīnijs nav pietiekošs pārklājuma aizsardzībai, un veidojas adatu fāze uz  $TiO_2$  bāzes.
- 6) Oksidēšanās process notiek cikliski. Vispirms pakāpeniski veidojas titāna oksīds ar dažādu alumīnija koncentrāciju. Šī oksīda krāsa ir atkarīga no alumīnija un skābekļa koncentrācijas un krāsa mainās no baltas līdz pelēkas. Oksidēšanās gaitā titāna koncentrācijas paaugstināšanas dēļ oksīda krāsa pakāpeniski iegūst dzeltenu nokrāsu. Tumši dzeltens oksīds noslāņojas un oksidēšanās process atkārtojas.
- 7) Nitrīdu pārklājumam ir laba oksidēšanās noturība – izmēģinājumu gaitā pārklājuma krāsa mainījās vismazāk, bet nepietiekoša slāņa biezuma dēļ tikai apmēram 300 nm (pārklājuma biezums ir salīdzināms ar to veidojošu kristālu izmēru) pārklājums nenodrošina 100% aizsardzību. Notiek pārklājuma lokāla caursite defektu – pilienu, pirmatnējas kristalizācijas dažāda plāksņu apgabalu robežās – vietās. Šajās vietās veidojas oksīdu adatu salas, kas veicina pārklājuma sabrukšanu no iekšpuses. Uz nebojāta nitrīda pārklājuma pakāpeniski izaug plānā oksīdu kārtā ar lielu alumīnija koncentrāciju, kas veido pietiekoši izturīgu

alumīnija oksīda garozu.

- 8) Summārais pārklājuma biezums ir 1,5 μm robežās. Pat tik mazs blīvums nodrošina pietiekoši lielu karstumizturību. Vairāku slāņu pārklājuma aizsardzības īpašību palielināšanai ir nepieciešamas palielināt pārklājuma biezumu.

## **6. OPTIMIZĒTĀ VAIRĀKU SLĀŅU METĀLKERAMISKĀ NANOPĀRKLĀJUMA NANOKS UZ *Ti-AL-N* BĀZES PĒTĪJUMS PĒC UZPUTINĀŠANAS LAIKA**

### **6.1. Katra slāņa biezuma attiecības optimizācija vairāku slāņu pārklājumā**

Kā parādīja karstumizturības pētījumi, kas ir aprakstīti iepriekšējā nodaļā, vislielākā efektivitāte ir pārklājumam ar 86.slānim ar konglomerāta prioritāti. Lai noteiktu katra monoslāņa pārklājuma noturības paaugstināšanas nozīmību, tika nolemts veidot oksidēšanas procesa matemātisko modeli titāna lāpstiņām ar vairāku slāņu pārklājumiem uz *Ti-AL-N* bāzes no sakausējuma *OT4-I*.

Sākotnējā modeļa veidošanā ir pieņemti sekojoši pieļāvumi – slāņu optimizācijas pamata parametrs ir katra slāņa uzputināšanas laiks, par ieejas parametru ir izvēlēta lāpstiņu pieņemamā masa pēc 80 stundas stundām, atkarība starp masas pieaugumu un katra slāņa uzputināšanas laiku izvēlētajā laikā sprīdī pakļaujas lineārai funkcijai.

Lāpstiņu ar vairāku slāņu pārklājumu oksidēšanās modelis (6.1.)

$$\Delta m_i = \Delta m_{wp} - aI - bK - cN \quad (6.1.)$$

, kur  $m_i$  – lāpstiņas ar pārklājumu masas pieaugums;

$\Delta m_{wp}$  – lāpstiņas bez pārklājuma masas pieaugums;

$a$  – intermetalīdu pārklājuma ietekmes koeficients;

$b$  – konglomerātu pārklājuma ietekmes koeficients;

$c$  – nitrīdu pārklājuma ietekmes koeficients;

$I$  – intermetalīdu pārklājuma uzputināšanas ilgums (min);

$K$  – konglomerātu pārklājuma uzputināšanas ilgums (min);

$N$  – nitrīdu pārklājuma uzputināšanas ilgums (min).

Ievietojot visu parametru vērtības formulā 80 izmēģinājuma stundām, kad sākas intensīva slāņa noslāņošanās uz lāpstiņas bez pārklājuma, iegūstam:

$$86.\text{pārklājums} \quad 0,0055 = 0,0305 - a_{10} - b_{60} - c_{40}$$

$$85.\text{pārklājums} \quad 0,0119 = 0,0305 - a_{10} - b_{40} - c_{60}$$

$$87.\text{pārklājums} \quad 0,0101 = 0,0305 - a_{20} - b_{30} - c_{60}$$

Atrisinām šo sistēmu ar trim nezināmajiem ar aizvietošanas metodi. Galējā formula lāpstiņas masas pieaugumam ar pārklājumu uz *Ti-Al-N* bāzes izskatās sekojoši:

$$\Delta m_i = \Delta m_{wp} - 0,000511 - 0,000327K - 0,000007N$$

Veicot pārklājuma optimizāciju bez matemātisko atkarību izmantošanas ir nepieciešams ņemt vērā katra pārklājuma nogulsnešanas īpatnības. Tas it īpaši attiecas uz pārklājumiem ar biežumu tuvu kritiskajam, t.i. minimālajam biežumam, kas nodrošina blīva pārklājuma veidošanos. Kritisko lielumu nosaka pārklājuma nanokristāli, kurus, savukārt, nosaka uzputināšanas veids, tā ātrums, temperatūras režīms un iekārtas konstrukcija. Minimāli biezas kārtas iegūšanai ir nepieciešams, lai visi sākotnējo nanoslāņu kondensēšanas defekti tiktu pārklāti ar nākamajiem nogulsnešanas atomiem.

Tā, piemēram, nitrīdu pārklājumam pie mikrokristālu izmēra apmēram 200 nm kritiskais lielums ir aptuveni 1,5-2 lielāks, t.i. – 400 nm. Tāpēc veicot tehnoloģiskā režīma optimizāciju tika izlemts uzturēt nitrīda slāņa biežumu ne mazāk par kritisko (400 nm) augstās oksidēšanās noturības un uz tās virsmas noturīgā oksīda veidošanās uz alumīnija oksīda bāzes dēļ.

Optimizācijas rezultātā tika noteikta sekojoša laika attiecība:

Intermetalīdu slāņa uzputināšanas laiks – 20 min

Konglomerātu slāņa uzputināšanas laiks – 70 min

Nitrīdu slāņa uzputināšanas laiks – 70 min

## **6.2. Optimizētā NANOKS pārklājuma uzputināšana un struktūras analīze**

Lai veiktu pārklājuma uzputināšanu, par pamatu tika ņemta tehnoloģija un shēma, kura tika piemērota 85., 86. un 87.pārklājuma režīmos ar precizētiem datiem pēc katra slāņa uzputināšanas laika uz helikoptera GTD *TV2-117A* kompresora statora lāpstiņām no titāna

sakausējuma OT4-1. 110.pārklājums ir gluds, krāsa rozīgi dzeltena ar vieglu violetu nokrāsu vidējā daļā. Virsmas mikrocietība ir  $H_{10} = 688 \text{ kgf/mm}^2$ . Raupjums  $Ra = 0,38 \text{ } \mu\text{m}$ . Kopējais 110.pārklājuma biezums ir 2,3  $\mu\text{m}$ .

Intermetalīdu slāņa biezums – 879 nm

Konglomerātu slāņa biezums – 990 nm

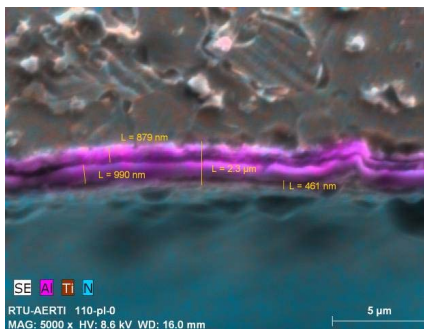
Nitrīdu slāņa biezums – 461 nm

Visi procesa dati doti tabulā 6.1.

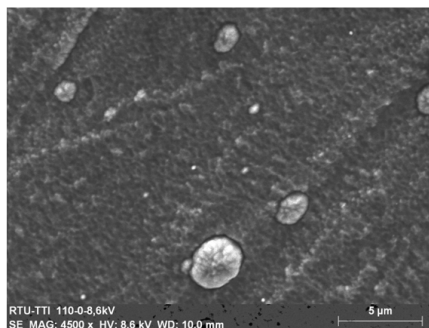
Tabula 6.1.

NANOKS 110.pārklājuma uzputināšanas parametri

Izvaikotā āža strāva $J_1$ , [A]	Magnetrona strāva $J_m$ , [A]	Magnetrona spriegums $U_m$ , [V]	Argona spiediens uzputināšanas kamerā. $P_{Ar}$ , [mmHg]	Slāpekļa spiediens uzputināšanas kamerā $P_N$ , [mmHg]	Detaju atbalstspriegums $U_{bas}$ , [V]	Uzputināšanas laiks [min]
50	7	350	$7 \times 10^{-4}$	-	60	20
50	7	280	$3 \times 10^{-3}$	$0,2 \times 10^{-3}$	60	70
50	7	230	$3 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	60	70



6.1.att. 110.pārklājuma lāpstiņas šķērsgriezums (palielinājums  $\times 5\ 000$ )



6.2.att. 110.pārklājuma lāpstiņas mikrostruktūra (palielinājums  $\times 4\ 500$ )

Pārklājuma struktūra ir ārkārtīgi smalkgraudaina, vienmērīga ar mikrokristālu izmēru 200 nm (6.1., 6.2.att.).

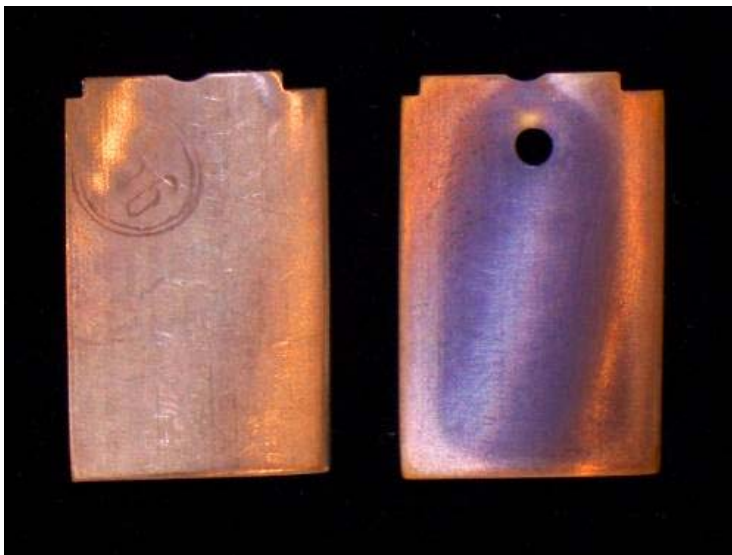
### 6.3. Optimizētā metālkeramiskā NANOKS pārklājuma izmēģinājumi uz ilgstošu karstumizturību

Optimizētā metālkeramiskā 110.pārklājuma karstumizturības noteikšanai tika veikts izmēģinājums pie tādiem pašiem tehniskajiem nosacījumiem, kā 85., 86. un 87. pārklājumu sērijai

Izturēšanas temperatūra – 730°C

Karsēšanas cikla laiks – 5 stundas karsēšana krāsnī un atdzesēšana gaisā

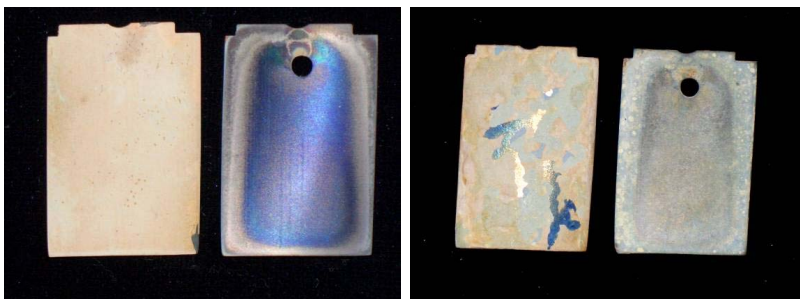
Noslēguma posms – pie kritiskās noslāņošanas vai pēc 450 izturēšanas stundām



6.3.att. Lāpstiņas pirms karstumizturības izmēģinājumiem

Lāpstiņu karstumizturības izmēģinājumi noritēja bez straujām 110.pārklājuma masas svārstībām. Vienmērīgs masas pieaugums notika visos apgabalos. Pētījumi tika pārtraukti stabilas oksidēšanās fāzē, nesasniedzot kritisko noslāņošanās fāzi. Virsmas ārējā izskata un sastāva salīdzināšanai tika veikta energodispersā mikro rentgenspektrālā analīze, kuras rezultāti ir atspoguļoti 6.4., 6.5.att.



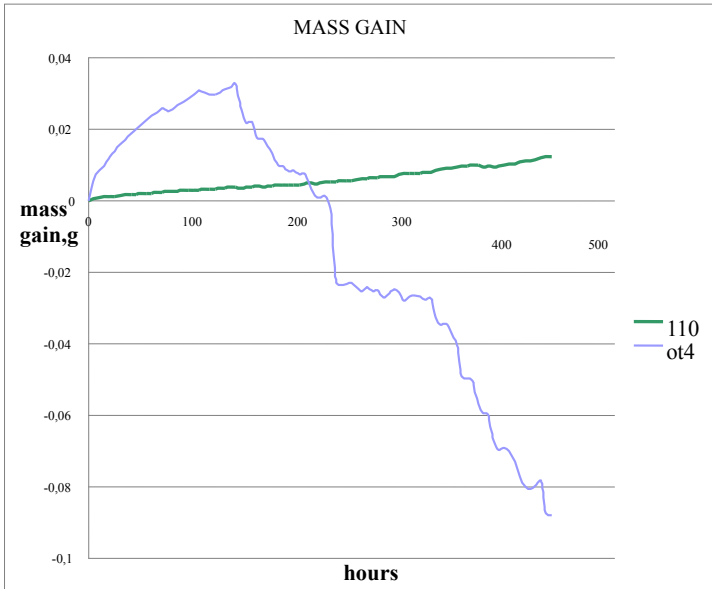


a) 70 stundas

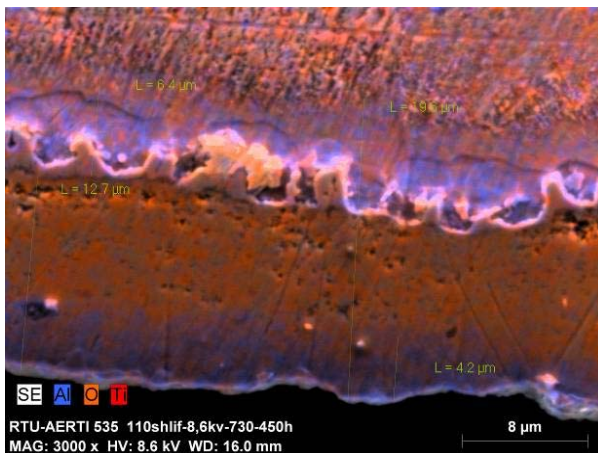
b) 410 stundas

6.4.att. Lāpstiņu ārēja izskata izmaiņas karstumizturības izmēģinājumu laikā

110.pārklājuma efektivitāte pēc ekspluatācijas laika līdz kritiskajai noslāņošanās fāzei ir 3,21, pieņemot, par izmēģinājumu beigām mirkli, kad sākas kritiskās noslāņošanās fāze, bet par izturēšanas laiku – masas samazināšanās sākumu ar vērtību 5,21. Pārklājuma efektivitāte pēc maksimālas masas pieauguma, kura tika noteikta pēc 70 izmēģinājuma stundām, ir 11,21. Rezultātā sanāk, ka optimizētais pārklājums ar biezumu 2,3  $\mu\text{m}$ , kas ir tikai par 1  $\mu\text{m}$  lielāks nekā 86.pārklājums, parādīja savu karstumizturības palielinājumu pēc masas pieauguma gandrīz 2 reizes, nesasniedzot pilnīgu sabrukšanas vai noslāņošanās fāzi.



6.5.att. NANOKS 110.pārklājuma lāpstiņas karstumizturība 450 stundas pie temperatūras 730°C



6.6.att. 110.pārklājuma lāpstiņa pēc 450 stundas pie temperatūras 730°C (palielinājums  $\times 3\ 000$ )

Metalografiskā analīze parāda, ka pēc karstumizturības izmēģinājumiem pie temperatūras 730°C 450 stundas laikā, pārklājums lielākoties saglabā savu struktūru, kurā joprojām ir arī starpzona ar paaugstinātu alumīnija koncentrāciju. Šī zona ierobežo titāna difūziju no lāpstiņas pamatmateriāla, kas veidojas uz virsmas oksīda, kas, savukārt, saglabā alumīnija paaugstinātu koncentrāciju un pietiekoši blīvu oksīda struktūru bez titāna oksīdu porainās un adatu fāzes veidošanas.

### **Secinājumi pēc optimizētā vairāku slāņu metālkeramiskā nanopārklājuma NANOKS uz *Ti-Al-N* bāzes pētījums pēc uzputināšanas laika**

- 1) Ir izstrādāts *NANOKS* pārklājuma matemātiskais modelis lāpstiņu oksidēšanas procesam kā masas pieauguma funkcija atkarībā no katra strukturētā slāņa uzputināšanas laika atsevišķi. Ir noteikti intermetalīdu (I), konglomerātu (K) un nitrīdu (N) slāņu nozīmes koeficienti:  $\Delta m_i = \Delta m_{wp} - 0,00051I - 0,000327K - 0,000007N$ .
- 2) Tika veikti GTD lāpstiņu izmēģinājumi ar iegūto vairāku slāņu optimizēto daudzkomponentu nanopārklājumu uz karstumizturību pie temperatūras 750°C 450 stundu laikā. Iegūtie rezultāti pierādīja augstu izveidotā karstumizturīgā pārklājuma efektivitāti – pēc 70 stundu izmēģinājuma masas pieaugums lāpstiņām ar NANOKS pārklājumu samazinājās vairāk nekā 11 reizes, salīdzinot ar lāpstiņām bez pārklājuma.

**Konstantīns SAVKOVŠ**

**GĀZTURBĪNU DZINĒJU KARSTĀ TRAKTA DETAĻU  
METĀLKERAMISKO NANOPĀRKLĀJUMU IZSTRĀDE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

---

Parakstīts iespiešanai 2014.05.02. Reģ. apl. Nr. 2-0282.  
Formāts 60x84/16. Ofseta papīrs. Ofseta papīrs. 3,25 iesp.l.,  
2,32 uzsk.izd.l. Metiens 30 eks. Pasūt. Nr. 6.  
Iespiests RTU tipogrāfijā, Rīga LV-1658, Kaļķu ielā 1.