



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

Gatis MUIŽNIEKS

Doktora studiju programmas „Ražošanas tehnoloģija”

virziena „Aparātu inženierija” doktorants

SKRŪVES TIPA KOMPRESORU ROTORU KONTAKTVIRSMU NODILUMIZTURĪBAS PALIELINĀŠANAS IZPĒTE

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
Ē. GERIŅŠ

Rīga 2013

UDK 621.515.4(043.2)
Mu 178 s

Muižnieks G. Skrūves tipa kompresoru rotoru kontaktvirsmu nodilumizturības palielināšanas izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. - R.:RTU, 2013. – 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI padomes 2012.gada 20. decembra lēmumu, protokols Nr. 6/12

Pateicība

RTU Mašīnbūves tehnoloģijas institūtam
RTU Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūtam
RTU Dzelzceļa transporta institūtam
RTU Aeronautikas institūtam

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projekta atbalstu „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un Mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6k, 405. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Viktors Mironovs
Rīgas Tehniskā universitāte

Professor, Dr.sc.ing. Jūri Olt
Estonian University of Life Sciences

Profesors, Dr.sc.ing. Juris Krizbergs
Rīgas Tehniskā universitāte

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.

Gatis Muižnieks(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, piecas nodaļas, darba secinājumus, pielikumu, izmantoto informācijas avotu sarakstu, kopsavilkumu 97 ilustrācijas un 35 tabulas, kopā 123 lappuses. Izmantoto literatūras avotu sarakstā ir 74 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	6
Tēmas aktualitāte	6
Darba mērķis	6
Darba uzdevumi	6
Pētījuma metodes	7
Zinātniskā novitāte	7
Pētījuma rezultāti	7
Praktiskais pielietojums	7
Autors aizstāv šajā darbā	7
Darba aprobācija – tēzes, ziņojumi un publikācijas	7
Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts	9
IEVADS	10
1. SKRŪVES TIPĀ KOMPRESORU KONSTRUKCIJU UN ROTORU DARBA VIRSMU ANALĪZE	10
1.1. Kompresori un to pielietojums	11
1.2. Skrūves tipa kompresoru konstrukciju īpatnības un priekšrocības	11
1.3. Kompresoru rotoru kontakta virsmas un aktuālie pētījumi	11
2. SKRŪVES TIPĀ KOMPRESORU DARBĪBAS ATTEIKUMU ANALĪZE	12
2.1. Atjaunojamie atteikumi	12
2.2. Neatjaunojamie atteikumi	13
2.3. Secinājumi	13
3. SKRŪVES TIPĀ KOMPRESORA CE55RW ROTORU MATERIĀLA ANALĪZE	13
3.1. Rotoru materiālu ķīmiskā analīze	13
3.2. Rotoru materiālu mehānisko īpašību analīze	13
3.3. Rotoru materiālu makro un mikrostruktūras analīze	14
3.4. Secinājumi	14
4. KOMPRESORU ROTORU IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJU ANALĪZE UN KALPOŠANAS ILGUMA PALIELINĀŠANAS IESPĒJU IZPĒTE	15
4.1. Rotoru izgatavošanas tehnoloģiju analīze	15
4.2. Materiālu izvēles analīze	17
4.3. Rotoru nominālā profila atjaunošanas iespēju analīze	17
4.4. Matemātisko izteiksmju izveide rotoru profila līknes modelēšanai	17
4.5. Instrumenta projektēšanas metodika	19
4.6. Secinājumi	19
5. SKRŪVES TIPĀ KOMPRESORU DEFINĒTĀS RAŽĪBAS NODROŠINĀŠANA AR VAKUUMĀ VEIDOTIEM PĀRKLĀJUMIEM	20
5.1. Vakuumā veidotu pārklājumu uzklāšanas tehnoloģijas	20
5.2. Eksperimenta datu apstrādes plānošana	21
5.3. Paraugu izgatavošanas metodika	21
5.4. Raksturojošo parametru izmaiņu analīze skrūves tipa rotoriem, kas uzlaboti ar dažādiem pārklājumiem, izmantojot vakuuma tehnoloģijas	21

5.4.1. Veidotā pārklājuma slāņa biezuma noteikšana	21
5.4.2. Pārklājumu mikrociētības izmaiņu analīze	22
5.4.3. Pārklājumu berzes koeficienta izmaiņu analīze	25
5.4.4. Pārklājumu virsmas kvalitātes novērtēšana ar kontakta tipa profilometru	27
5.4.5. Pārklājumu virsmas kvalitātes novērtēšana ar AFM	27
5.5. Pārklāto rotoru kontakta virsmu darba spēju prognozēšanas metodika	29
5.6. Secinājumi	31
DARBA SECINĀJUMI	33
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI	34

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Aizvien biežāk mūsdienu iekārtas ne tikai mašīnbūvē, bet arī jebkurā citā ražošanas nozarēs tiek darbinātas ar saspiestu gaisu. Līdz ar to ļoti svarīgu lomu kopumā ieņem saspiesta gaisa pielietošana. Pieaugot ražošanas apjomiem, arvien biežāk izmanto tehnoloģiski modernākās, ekonomiskākās un drošākās kompresoru mašīnas – tai skaitā eļļas plūsmas skrūves tipa kompresorus.

Ilgstošas sadarbības rezultātā ar kompresoru ražotni SIA „Fonons” Latvijā, kas ražo un apkalpo GHH firmas eļļas plūsmas skrūves tipa kompresorus Baltijas valstīs, tika atklātas kompresoru konstrukcijas nepilnības, kas izsauc kompresoru darbības traucējumus. Tās novērojamas kompresoriem, kas tiek darbināti nepiemērotās darba vidēs. Pie nosacījuma, ja šos kompresorus lietotu atbilstoši to tehniskajām prasībām, iekārtas darbība ir nevainojama. Tomēr realitātē viss ir pavisam citādāk. Uzņēmuma „Fonons” ilggadējās darbības rezultātā veidotie statistiskie dati uzrāda, ka 15% patērētāju neievēro ekspluatācijas nosacījumus, kā rezultātā rodas dažādi kompresoru darbības traucējumi, kas ir pat neatgriezeniski. Biežāk sastopamie kompresoru traucējumi ir galveno detaļu – berzes mezglu (rotoru) – nodilums, kā arī kompresoru uzdotās ražības samazināšanās, noplūžu palielināšanās, kas savukārt samazina darbības efektivitāti. Šāda veida problēmas ir aktuālas arī citās rūpniecības nozarēs līdzīgu iekārtu darbības procesā. Līdz ar to nepieciešams rast risinājumus šo darbības traucējumu novēršanai. Šobrīd ir maz sastopami pētījumi, kas atspoguļo rotoru izliekto kontaktu virsmu kalpošanas laika palielināšanas iespējas. *Pastiprinātais rotoru kontaktvirsmu izdilums ir kā problēmu ķēdes aizsākums, tāpēc šis promocijas darbs orientēts uz rotoru kontaktvirsmu dilšanas samazināšanas iespēju izpēti.* Pētījumos, kuru mērķis ir uzlabot materiāla fizikāli mehāniskās īpašības, ir sastopami tehnoloģiskie risinājumi, kas saistīti ar pārklājumu uzputināšanu. Dažādu berzes pāru kontakta virsmu īpašību uzlabošanai, kā arī kā aizsargpārklājumu citās ražošanas nozarēs, piemēram, instrumentu ražošanā tiek izmantoti pārklājumi tai skaitā titāna nitrīda (TiN).

Ļoti maz apzināti kompresoru rotoru profilu, definētās ražības atjaunošanas un saglabāšanas iespējas varianti. Jo abrazīvās vielas – piesārņotais gaiss, izdiluma produkti, ekspluatācijas nosacījumi – diezgan būtiski ietekmē rotoru kalpošanas laiku. Šis aspekts būtu ļoti būtisks tiem patērētājiem, kas skrūves tipa kompresorus ekspluatē skarbos darba apstākļos.

Kompresoru ražošanas nozarē nav sastopami pētījumi eļļas plūsmas skrūves tipa rotoru kontakta virsmu nodiluma pētījumiem un to samazināšanas problēmu risinājumiem, izmantojot TiN. Līdz ar to nepieciešams veikt eksperimentus un aprēķinus šādu pārklājumu efektivitātes izvērtēšanai uz eļļas plūsmas rotoru izliektām virsmām, dot informatīvu materiālu gan ražotājiem, gan to pārstāvjiem, kas nodarbojas ar kompresoru apkalpošanas un remontu darbiem. Šo apsvērumu dēļ darbu var uzskatīt par aktuālu.

Darba mērķis

Dotā darba mērķis ir: palielināt eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru asimetrisko rotoru nodilumizturību.

Darba uzdevumi

Mērķa sasniegšanai tiek veikti zemāk minētie uzdevumi:

1. Skrūves tipa kompresoru konstrukciju un rotoru darba virsmu analīze;
2. Eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru atteikumu un rotoru nodiluma izpēte;
3. Rotoru un apstrādes instrumentu ģeometrisku formu matemātiskā modelēšana;
4. Rotoru kontaktvirsmu nodilumizturības palielināšanas tehnoloģiskie risinājumi;
5. Kontakta virsmu apstrādes tehnoloģisko procesu efektivitātes izvērtēšanas kritēriju izstrāde.

Pētījuma metodes

Promocijas darba mērķa un tam izvirzīto uzdevumu sasniegšanai tika izmantota kvantitatīvā pētījuma metode – matemātiski statistiskā. Lai pilnvērtīgi veiktu eksperimentālo sadaļu tika izmantoti: metalurģiskais mikroskops *IM 7000*, profilometri *Tesa – rugosurf 10*, *Talysurf Intra 50*, spektrometrs *WAS PMI-MASTER PRO*, *EQUOTIP* firmas dinamiskais mehānisko īpašību mērītājs, instrumentālais mikroskops *MMN-2*, mikrociētības mērītājs *IIMT-3*, autora izprojektētā un izgatavotā berzes spēka mērīšanas iekārta, atomspēku mikroskops *Solver P47-PRO* u.c.. Uzdevumu risināšanai un rezultātu grafiskai attēlošanai izmantoti datorprogrammu nodrošinājumi: *SolidWorks*, *Microsoft Visio*, zinātnes un inženierijas instrumenta *Turbo Pascal* papildinājumu *Gauss Jordan* no *Quinn-Curtis*, *Microsoft Excel*, *Rugosoft 10-10G*, *NT-MDT Nova*, *Talymap Expert*, *ScopeImage Advance* u.c..

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir:

1. Vienslāņa TiN nodilumizturīgo pārklājumu izmantošana eļļas plūsmas skrūves tipu kompresoru rotoru kontakta virsmu atjaunošanas, uzlabošanas un izgatavošanas procesos.
2. Pētījumi eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru rotoru kontakta virsmu nodilumu samazināšanai ievērojot virsmu 3D īpašības.

Pētījuma rezultāti

1. Matemātiskās izteiksmes skrūves rotoru kontakta virsmu un griezošo instrumentu formveidojošo griezējasmehānisku projektēšanai un izgatavošanai.
2. Skrūves tipa kompresoru rotoru materiālu izvēles pamatojuma kritēriji.
3. Skrūves tipa kompresoru rotoru virsmu eksperimentālā pārklāšana ar nodilumizturīgo TiN pārklājumu un to fizikāli-mehānisko īpašību analīze.
4. Metodika pēc diviem kritērijiem rotoru kontakta virsmu apstrādes tehnoloģijas uzlabojumu efektivitātes novērtēšanai:
 - 4.1. Kritērijs, kas balstīts uz rotoru virsmas kontakta tipu;
 - 4.2. Kritērijs, kas ievēro nodiluma procesa norisi.

Praktiskais pielietojums

Materiālu izvēles pamatnostādņu pielietojums skrūves veida rotoru, kā arī citu mehānismu komplektējošo daļu izgatavošanas tehnoloģijas izstrādē.

Pielietojamā metodika matemātisko izteiksmju izveidē virsmu aprakstīšanai kompresoru rotoru, instrumenta profila, kā arī citu darba virsmu teorētiskai modelēšanai.

Izstrādātie kontaktu virsmu uzlabojumu novērtēšanas kritēriji lietojami kā kontakta tipa izmaiņu, kā arī, nodiluma lieluma izmaiņu prognozēšanā. Jāatzīmē kā šie izstrādātie kritēriji ir lietojami ne tikai rotoru kontakta virsmu pārklājumu, bet arī dažādu citu apstrādes tehnoloģijas uzlabojumu efektivitātes novērtēšanai, kas saistīti ar nodiluma procesu izpēti.

Autors aizstāv šajā darbā

1. Nodilumizturīgo TiN pārklājumu pielietojumu, to izvērtēšanu un rekomendācijas eļļas plūsmas kompresoru rotoru kontakta virsmu mehānisko īpašību uzlabošanai.
2. Rotoru kontakta virsmas apstrādes tehnoloģijas uzlabojumu efektivitātes novērtēšanas kritērijus.

Darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem atzinumiem un rezultātiem sniegti ziņojumi sekojošās konferencēs un semināros:

Tēzes un ziņojumi

1. Muižnieks G., Geriņš Ē. „Skrūves kompresoru mezglu konstrukciju pētījumi”. RTU 48. Starptautiskā Zinātniskā konference, Rīga, Latvija, 2007, 12. oktobris.
2. Muižnieks G., Geriņš Ē., Zvirgzds J. „Skrūves tipa kompresoru rotoru izgatavošanas tehnoloģiju analīze”. Latvijas Universitātes 24. zinātniskā konference, veltīta LU CFI 30 gadu jubilejai, 2008.g. 20.-22. februāris, 63 lpp.
3. Muižnieks G., Geriņš Ē., Zvirgzds J. „Materiāla izvēles nosacījumi skrūves tipa kompresoru rotoru izgatavošanai”. Latvijas Universitātes 24. zinātniskā konference, veltīta LU CFI 30 gadu jubilejai, 2008.g. 20.-22. februāris, 64 lpp.
4. Muiznieks G., Gerins E. “Conditions of Materials Choice in Manufacturing of Pressure Originated Details”. Proceedings of 4th International Conference Mechatronic Systems and Materials, July 14–27, 2008, Bialystok, Poland, p. 127.
5. Muižnieks G., Geriņš Ē. „Skrūves tipa kompresoru rotoru virsmas fizikāli mehānisko īpašību uzlabošanas metožu analīze”. RTU 49. Starptautiskā Zinātniskā konference Rīga, Latvija, 2008, 12. oktobris.
6. Muižnieks G., Geriņš Ē. „Šķidrums plūsmas rotorsūkņu rotoru virsmas fizikāli mehānisko īpašību uzlabošanas metožu analīze”. Latvijas Universitātes 25. zinātniskās konference, veltīta doc. Ludviga Jansona simtgadei 2009.g. 11.-13. februāris, 25 lpp.
7. Muižnieks G., Geriņš Ē. „Skrūves tipa rotoru profila ģeometrisku parametru noteikšanas metode un to izmantošana griezošo instrumentu projektēšanā”. RTU 50. Starptautiskā Zinātniskā konference Rīga, Latvija, 2009, 15. oktobris.
8. Muižnieks G., Geriņš Ē. „Skrūves tipa rotoru kontakta virsmu mehānisko īpašību uzlabošanas iespējas izmantojot nano pārklājumus”. RTU 51. Starptautiskā Zinātniskā konference Rīga, Latvija, 2010, 14. oktobris.
9. Muižnieks G., „Titāna nitrīta pārklājumi”. Seminārs ar komersantiem projekta „Mehānisku elementu virsmas un to iekšējās struktūras nanotehnoloģiskie pētījumi mašīnbūvē” īstenošanas jautājumos „Materiālu virsmu jaunākie pētījumi” RTU Būvniecības fakultāte, Rīga, Āzenes 16/20-213, 2011. gada, 19. maijs.
10. Muižnieks G., Ozoliņš J. „Nanostruktūras pētījumi ar atomspēka mikroskopa palīdzību”. Seminārs ar valsts zinātniskajām institūcijām projekta „Mehānisku elementu virsmas un to iekšējās struktūras nanotehnoloģiskie pētījumi mašīnbūvē” īstenošanas jautājumos „Mašīnzinātnes sasniegumi nanotehnoloģijās” Latvijas Brīvo arodbiedrību savienības namā, Bruņinieku 29/31 Rīga. 2011. gada, 29. septembris.
11. Muižnieks G., Geriņš Ē. „Nano pārklājumu tehnoloģijas izmantošana skrūves tipa rotoru profila atjaunošanai”. RTU 52. Starptautiskā Zinātniskā konference Rīga, Latvija, 2011, 13. oktobris.
12. Muižnieks G., Ozoliņš J. „Atomspēku mikroskopa izmantošana virsmas pētījumos”. Seminārs ar komersantiem projekta „Mehānisku elementu virsmas un to iekšējās struktūras nanotehnoloģiskie pētījumi mašīnbūvē” īstenošanas jautājumos „Nanotehnoloģija un virsmas mehānika” RTU Būvniecības fakultāte, Rīga, Āzenes 16/20-213, 2012. gada, 15. maijs.
13. Muiznieks G., Gerins E., Ozolins J. “Evaluation criteria of technological process”. 53rd International Conference of Riga Technical university dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical institute / RTU Alumni, 10-12th October 2012, Riga, Latvia.

Publikācijas

1. Muiznieks G., Gerins E. “Specific characters of design on screw type compressors”. Proceedings of 6th International Scientific Conference, Engineering for rural development, May 24-25, 2007, Jelgava, Latvia, p. 216-220.

2. Muiznieks G., Gerins E. "Usability of analytical methods in design of instrument profile of screw type compressors". Proceedings of 7th International Scientific Conference, Engineering for rural development, May 29-30, 2008, Jelgava, Latvia, p. 229-235.
3. Muiznieks G., Gerins E. "Conditions of Materials Choice in Manufacturing of Pressure Originated Details". Proceedings of scientific journal „Acta Mechanica et Automatica”, quarterly volume 2 no.4, 2008, Bialystok, Poland, p. 75-80.
4. Muiznieks G., Gerins E. "Analysis of possibilities to improve the surface physical mechanical properties of rotors of screw type pumps". Proceedings CD of 8th International Scientific Conference, Engineering for rural development, May 28-29, 2009, Jelgava, Latvia.
5. Muiznieks G., Gerins E. "Analysis of thermo chemical processing of contact surface of rotor pumps". Proceedings of 11 International Symposium Materials, Methods & Technologies, (MM&T) June 3-7, 2009, Sunny Beach, Bulgaria, International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies Volume 3 part 1, 2009, p. 135-142.
6. Muiznieks G., Geriņš Ē. "Materiālu izvēles nosacījumi mūsdienu mašīnu un aparātu būvē". RTU Zinātniskie raksti, Mašīnzinātne un transports, Jubilejas krājums 6. Sērija, 31. Sējums, RTU, Rīga, 2009, 56-61 lpp.
7. Rudzītis J., Krizbergs J., Odītis I., Torims T., Kumermanis M., Muiznieks G., Strazdina I. "Determination of 3D surface roughness parameters by using cross-section methods". RTU Zinātniskie raksti, Mašīnzinātne un transports, Jubilejas krājums 6. Sērija, 31. Sējums, RTU, Rīga, 2009, 71-74 lpp.
8. Muiznieks G. Ms.sc.ing., Gerins E. professor Dr.sc.ing., Ozolins J. Asoc.prof., Dr.sc.ing. "Analysis of condition changes of rotor compressors contact surfaces". Proceedings of 7th International Conference of DAAAM, Baltic Industrial Engineering, 22-24th April 2010, Tallinn, Estonia, p. 441-445.
9. Muiznieks G., Gerins E., Ozolins J., Muizniece V. "Analysis of providing rotor surface resistance to wear". Abstracts, Proceedings CD of 6th International Conference of Mechatronic systems and materials (MSM), 5-8th July 2010, Opole, Poland, p. 153 (1-8).
10. Muiznieks G., Gerins E., Katasevs A., Ozolins J., Pikurs G. "Evaluation of Coating Material Structure of Screw Type Compressor Rotor Contact Surfaces". Proceedings of The 2012 International Conference of Mechanical Engineering (ICME), 4-6 July 2012, London, U.K., p. 1980-1984.
11. Muiznieks G., Gerins E., Pikurs G., Muizniece V. "Analysis of various parameters what influence wear resistance of screw rotor contact surface". Scientific Works of Riga Technical University, Proceedings of Production Engineering. Riga 2012, p. 96-103.

Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, piecas nodaļas, darba secinājumus, pielikumu, izmantoto informācijas avotu sarakstu, 97 ilustrācijas, 35 tabulas, kopā 123 lappuses. Izmantoto literatūras avotu sarakstu ir 74 nosaukumi.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

IEVADS

Mūsdienu mašīnbūves dinamiskajā laikmetā, kad strauji attīstās dažādu konstrukciju mašīnas un aparāti, kā arī kompleksā ražošanas mehanizācija un automatizācija, liela nozīme tiek pievērsta augstas kvalitātes produkcijas izgatavošanai. Augstā darba efektivitāte, liels rotoru rotācijas ātrums, darbība plašā spiedienu diapazonā, kompakts, zemās izmaksas, ātrā izaugsme un to konstrukciju daudzveidība dod iespēju skrūves tipa kompresorus plaši izmantot dažādos tehnoloģiskos procesos. Arvien biežāk jebkurā ražošanas procesā pieaug saspiestā gaisa izmantošanas apjomi. Tiek meklētas tehnoloģiski modernākas, ekonomiskākas, drošākas un nodilumizturīgākas kompresoru mašīnas, piemēram, skrūves tipa kompresori. Kompresoru mašīnas ir cieši saistītas ar jebkuru ražošanas nozari Latvijā. Skrūves tipa kompresoru izmantošana dažādās rūpniecības nozarēs ir plaši izplatīta, kopš tie sāka aizstāt tradicionālos virzuļa tipa kompresorus. Skrūves tipa kompresoriem piemīt daudz priekšrocību, tomēr ir vēl daudzi to darbības ietekmējošie faktori, kurus nepieciešams izpētīt un nonākt pie racionāliem slēdzieniem, un konstrukcijas, kuras nepieciešams uzlabot, lai panāktu efektīvāku kompresoru darbību.

Kompresoru ekspluatācijas laikā ir sastopami dažādu veidu darbības traucējumi, kas ir pat neatgriezeniski. Biežāk sastopamie kompresoru traucējumi ir galveno detaļu – berzes mezglu – izdilums, kā arī ražības samazināšanās. Šis promocijas darbs tiek orientēts uz eļļas plūsmas skrūves tipa kompresora definētās ražības atjaunošanas un asimetriskā rotoru profila kalpošanas laika palielināšanas iespēju izpētei. Mūsdienu sasniegumi ļauj meklēt tehnoloģiskus risinājumus kvalitatīvākai kompresoru galveno komplektējošo detaļu izgatavošanai.

Darba sekmīgai izpildei tiek izmantoti un pētīti Vācijas rūpnīcas GHH RAND ražoto eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru asimetriskie rotoru. Pētījumi uz šiem rotoriem tika veikti sadarbībā ar kompresoru ražotni Latvijā, SIA „Fonons” un Rīgas Tehnisko universitāti.

1. nodaļa SKRŪVES TIPĀ KOMPRESORU KONSTRUKCIJU UN ROTORU DARBA VIRSMU ANALĪZE

Ilgstošas sadarbības rezultātā ar kompresoru ražotni SIA „Fonons” Latvijā, kas ražo un apkalpo GHH firmas eļļas plūsmas skrūves tipa kompresorus Baltijas valstīs, tika atklātas kompresoru konstrukcijas nepilnības, kas izsauc kompresoru darbības traucējumus. Tās novērojamas kompresoriem, kas tiek darbināti nepiemērotās darba vidēs. Uzņēmuma „Fonons” ilggadējās darbības rezultātā veidotie statistiskie dati uzrāda, ka 15% patērētāju neievēro ekspluatācijas nosacījumus, kā rezultātā rodas dažādu veidu kompresoru darbības traucējumi. Biežāk sastopamie kompresoru traucējumi ir galveno detaļu – berzes mezglu (rotoru) – izdilums, kā arī kompresoru uzdotās ražības samazināšanās, noplūžu palielināšanās, kas savukārt samazina darbības efektivitāti. Šāda veida problēmas ir aktuālas arī citās rūpniecības nozarēs līdzīgu iekārtu darbības procesā. Līdz ar to nepieciešams rast risinājumus šo darbības traucējumu novēršanai. Šobrīd ir maz sastopami pētījumi, kas atspoguļo rotoru izliekto kontaktu virsmu kalpošanas laika palielināšanas iespējas. *Pastiprinātais rotoru kontaktvirsmu izdilums ir kā problēmu ķēdes aizsākums, tāpēc šis promocijas darbs orientēts uz rotoru kontaktvirsmu dilšanas samazināšanas iespēju izpēti.* Pētījumos, kuru mērķis ir uzlabot materiāla fizikāli mehāniskās īpašības, ir sastopami tehnoloģiskie risinājumi, kas saistīti ar pārklājumu uzputināšanu. Dažādu berzes pāru kontakta virsmu īpašību uzlabošanai, kā arī kā aizsargpārklājumu citās ražošanas nozarēs, piemēram, instrumentu ražošanā tiek izmantoti pārklājumi tai skaitā titāna nitrīda (TiN).

1.1. Kompresori un to pielietojums

Dots neliels ieskats skrūves tipa kompresoru attīstībā. Pašreizējā industrijas attīstības pakāpē vieni no populārākajiem gaisa kompresoriem ir skrūves tipa kompresoru mašīnas, kuras cieši saistītas ar jebkuru ražošanas nozari Latvijā. Skrūves tipa kompresori ir vienkārša dizaina rotoru, pozitīvā pārvietojuma mašīnas, kas var darboties pie augstiem rotācijas ātrumiem, pie plaša spiediena diapazona un liela gaisa plūsmas apjoma ar augstu efektivitāti. Turklāt tie ir droši un kompakti. Tie var darboties ar dažādiem darba fluīdiem, kuri var būt gan gāzes, gan sauss tvaiks vai dažādi maisījumi, kuru fāzu izmaiņas notiek tieši kompresorā [22]. Pateicoties to mazajiem izmēriem un lielajai ražībai, tie tiek lietoti daudzās tautsaimniecības un ražošanas nozarēs.

1.2. Skrūves tipa kompresoru konstrukciju īpatnības un priekšrocības

Skrūves kompresori ir vienkārša dizaina rotoru pozitīva pārvietojuma mašīnas. Skrūves tipa kompresoros gaisa padeve ir līdzīga kā virzuļa tipa kompresoriem, kas izdara turp un atpakaļ kustību, bet ar lielāku gaisa padeves frekvenci [8]. Liela vērtība promocijas darbā tiek pievērsta eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoriem. Analizētas to konstrukciju īpatnības, kā arī tiek dots ieskats to darbības principā. Sadaļā tiek arī analizētas eļļas plūsmas kompresoru priekšrocības salīdzinājumā ar citiem kompresoru veidiem [8, 14, 31].

1.3. Kompresoru rotoru kontakta virsmas un aktuālie pētījumi

Šajā sadaļā aplūkotas kompresoru galveno sastāvdaļu īpatnības un prasības to efektīvai darbībai. Skrūves tipa kompresora galvenās komplektējošās sastāvdaļas ir ar īpašu skrūves profilu veidoti rotoru – dzenošais un dzītais. Skrūves tipa kompresoru attīstība ir saistīta ar rotoru izgatavošanas tehnoloģijas pilnveidi. Efektīvai kompresora darbībai ir nepieciešams rotora profils, kuram iekšējā gaisa plūsma kompresorā būtu maksimāli liela, īsa blīvšanās līnija, tajā pašā laikā gaisa noplūdes un iekšējā berze, kas ir saistīta ar relatīvo kustību starp kontaktu virsmām būtu mazāka. Lielāka gaisa plūsma un mazākas noplūdes palielina kompresora tilpuma efektivitāti [24, 25]. Pateicoties modernajiem darba galdiem rotoru izgatavošanas laiks samazinās no vairākām stundām līdz minūtēm un palielina izgatavošanas precizitāti [4]. Tas ļauj ražot rotorus ar mazākām izmēru pielaidēm, tādējādi samazinot iekšējās gaisa noplūdes līdz minimumam, kas ļauj samazināt gabarītus, izmainot skrūves kompresoru efektivitāti lielāku nekā cita tipa kompresoriem [21].

Mūsdienās zinātnieki pētījumus ir veltījuši temperatūras un termodinamikas ietekmei uz rotoru deformācijām, to analīzei izmantojot galīgo elementu metodi [7, 20]. Pētīts tiek spiediena un plūsmas izmaiņas atkarība no rotoru pagrieziena leņķa [6]. Tiek veikta 3D modelēšana - kompresora darbības efektivitātes novērtēšanai [12, 13, 15], kompresoru rotoru profilēšanai [19]. Tiek arī analizēti un veikti kompresoru konstrukcijas un rotoru profilu izmaiņas uzlabojot tā darbības raksturojošos parametrus [10, 17, 18, 22, 23,] u.c.. Citās mašīnbūves nozarēs ir sastopami pētījumi, kas saistīti ar dažādu detaļu (plakanu, cilindrisku virsmu) salāgojuma nodiluma izpēti.

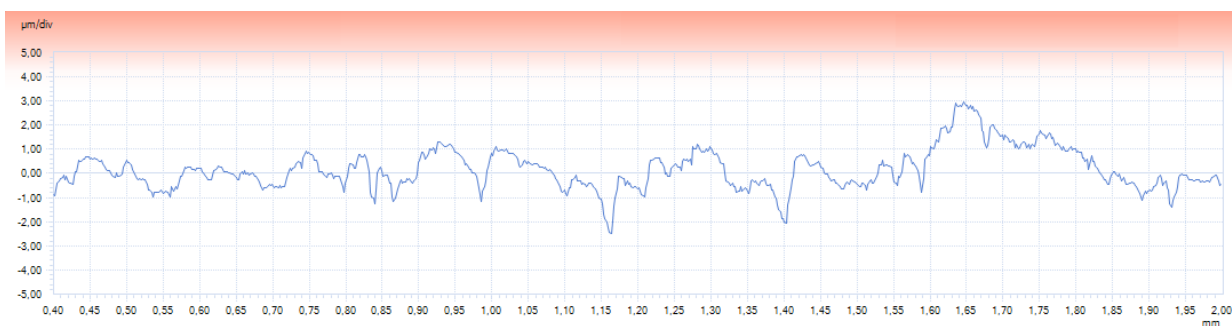
Ļoti maz apzināti kompresoru rotoru profilu, definētās ražības atjaunošanas un saglabāšanas iespējas varianti. Kompresoru ražošanas nozarē nav sastopami pētījumi eļļas plūsmas skrūves tipa rotoru kontakta virsmu nodiluma pētījumiem un to samazināšanas problēmu risinājumiem, izmantojot vienslāņa TiN pārklājumus. Līdz ar to nepieciešams veikt eksperimentus un aprēķinus šādu pārklājumu efektivitātes izvērtēšanai uz eļļas plūsmas rotoru izliktām virsmām, dot informatīvu materiālu gan ražotājiem, gan to pārstāvjiem, kas nodarbojas ar kompresoru apkalpošanas un remontu darbiem.

2. nodaļa SKRŪVES TIPA KOMPRESORU DARBĪBAS ATTEIKUMU ANALĪZE

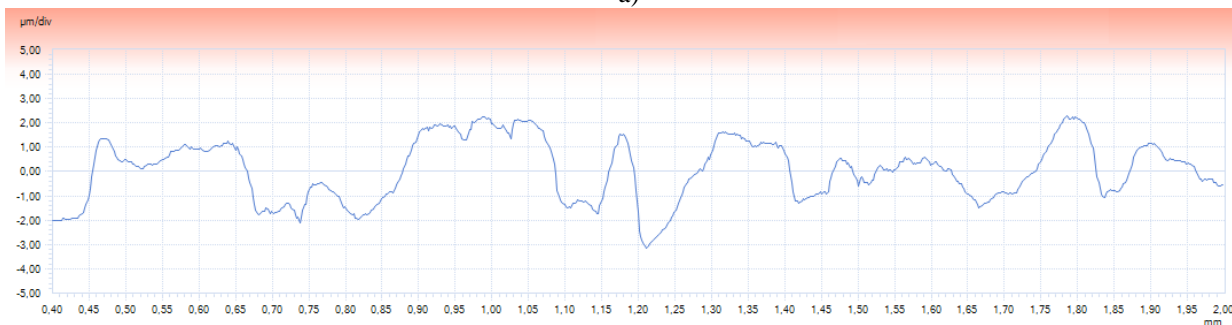
Šīs nodaļas ietvaros, izmantojot kompānijas „Fonons” statistikas datus, tiek analizēti rotoru kompresoru galvenie bojājumu veidi un veikta to sistematizēšana. Eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru darbības laikā līdz ar gaisu tiek iesūkņēta vai iesmidzināta eļļa, kas novērš tiešu rotoru kontaktu. Līdz ko tiek pārtraukta vai traucēta eļļas padeve starp rotoriem, rodas daļējs vai tiešs kontakts, kas izsauc intensīvu rotoru dilšanu. Eļļas padeves traucējumi izsauc ne tikai rotoru, bet arī citu komplektējošo daļu dažādus nodilumu izraisītos bojājumus [16]. Skrūves tipa kompresoru atteikumus, kas radušies nodiluma rezultātā var sistematizēt kā atjaunojamus - kuru remonta tehnoloģijas risinājumi ir ekonomiski izdevīgi, un neatjaunojamus - kuru atjaunošana nav racionāli izdevīga.

2.1. Atjaunojamie atteikumi

Šajā apakšnodaļā tiek analizēti bojājumu izraisītie atjaunojamo atteikumu rašanās cēloņi – abrazīvas vielas, eļļošana, nepiemērotas darba vides apstākļi - un to sekas. Sīkāk tiek analizēti mehāniskie bojājumi, kas ir visbiežāk sastopamie. Ar analītiskiem aprēķiniem, kā arī ar faktiskiem mērījumiem tika pierādīts, ka šie bojājumi ietekmē kompresora darbības efektivitāti. Profilogrammas grafiskais attēlojums dod iespēju savā starpā salīdzināt jaunu rotoru ar dīļu, kas atspoguļota 2.1. attēlā.



a)



b)

2.1. att. Rotoru virsmas profilogrammas

a) jauns rotors, b) lietots rotors

Teorētiski matemātiskā sakarība (2.1.) un teorētiskās ražības Q_T izmaiņu grafiskā līkne (2.2. att.) pierāda mehānisko atteikumu ietekmi uz kompresora darbības efektivitāti [32].

$$Q_T = \frac{\pi}{4} n_1 l (\Omega_1 d_1^2 + i_{21} \Omega_2 d_2^2) \quad (2.1.)$$

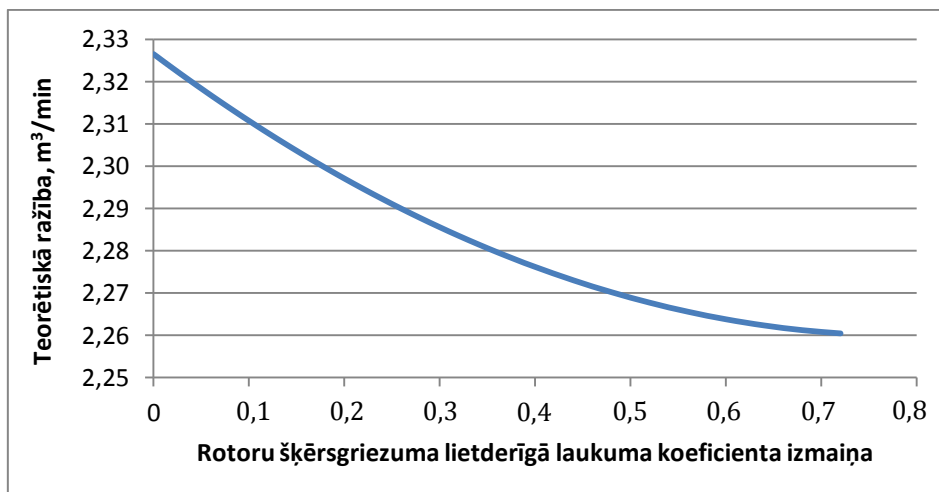
kur: n_1 – dzenošā rotora rotācijas ātrums, (apgr./min);

l – rotoru garums, (m);

Ω_1 un Ω_2 – rotoru šķērsriezuma lietderīgā laukuma koeficients;

d_1 un d_2 – dzenošā un dzītā rotoru ārējie diametri, (m);

i_{21} – rotoru pārnesuma attiecība.



2.2. att. Teorētiskās kompresora ražības ietekme atkarībā no rotoru nodiluma lieluma (informatīva rakstura)

2.2. Neatjaunojamie atteikumi

Tiek analizēti raksturīgāko bojājumu izraisītie neatjaunojamo atteikuma rašanās iemesli un atspoguļoti sastaptie rotoru bojājumi. Viens no aktuālākajiem neremontējamiem skrūves tipa kompresoru rotoru bojājumiem ir liela izmēra svešķermeņu iekļūšana starp rotoriem, kas var izsaukt nopietnus bojājumus – radot plaisas rotoru materiālā (salikts rotors), deformējot to kontakta virsmas vai pat salaužot tos.

2.3. Secinājumi

Nodaļā tika secināts, ka visraksturīgākie atteikumi eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoriem ir saistīti ar nepiemērotiem darba apstākļiem, neregulāru apkopju veikšanu un eļļošanas sistēmu atteikumiem. Tas noved pie ievērojamiem mehāniskiem bojājumiem. Šie bojājumi pazemina kompresoru veiktspējas, samazinot caurplūstošo gaisa daudzumu - ražību un darba efektivitāti. Lai palielinātu un atjaunotu kompresora darba efektivitāti ir jānovērš vai jāminimizē mehānisko atteikumu rašanās cēloņi vai to radītās sekas. Darba virsmu atteikumu novēršanai izvirzīti vairāki risinājumi, piemēram, atjaunot sākotnējo rotoru profila formu, izgatavot rotoru no cita materiāla ar labākām mehāniskām īpašībām vai uzlabot esošo rotoru materiālu.

3. nodaļa SKRŪVES TIPĀ KOMPRESORA CE55RW ROTORU MATERIĀLA ANALĪZE

3.1. Rotoru materiālu ķīmiskā analīze

Tā kā ražotājs informācijas konfidencialitātes dēļ nesniedz skaidrojumu par rotoru izgatavošanā izmantoto materiālu un sagataves materiāla ieguves tehnoloģisko procesu, lai izvēlētos pareizāko risinājumu kompresora ražības atjaunošanai vai darbības efektivitātes saglabāšanai un palielināšanai, ir nepieciešams veikt esošā skrūves tipa kompresora rotoru materiāla sīkāku analīzi. Sadarbībā ar Dzelzceļa transporta institūta materiāla pārbaudes laboratoriju tiek veikta rotoru materiālu ķīmiskā analīze (spektrometrs *WAS PMI-MASTER PRO 13L0114*). Analīzes rezultāti uzrāda, ka tērauda sastāvā tiek iekļauti legējošos elementi. Legējošo elementu daudzums ir nepietiekošs, lai nodrošinātu efektīvu kompresoru darbību mainīgos darba apstākļos. Pēc materiāla ķīmiskās analīzes datiem šo rotoru materiāli ir izgatavoti no kvalitātes oglekļa tērauda C35 EN 10025:02004. Oglekļa saturs robežās no 0,35...0,36%.

3.2. Rotoru materiālu mehānisko īpašību analīze

Lai raksturotu un noteiktu dzītā un dzenošā rotora materiāla atbilstību tika veikta to galveno mehānisko īpašību raksturotāju noteikšana. Izturības robežspriegums un mikrociētība ir galvenie materiālu raksturotāji ar kuru palīdzību var izvērtēt materiāla atbilstību, raksturu un to

nepilnības. Materiāla izturības robežspriegums dažādos rotoru šķērsriezuma punktos dzenošajam rotoram $R_m 412 \text{ N/mm}^2$, dzītajam rotoram $R_m 417 \text{ N/mm}^2$ (*EQUOTIP* dinamiskais portatīvais mērītājs), mikrociētība dzenošajam rotoram $HV 51 \text{ kg/mm}^2$ (mērījumi novietoti vijuma šķērsriezumā no rotora kontakta virsmas uz serdes daļu), dzītajam $HV 60 \text{ kg/mm}^2$ (mērījumi novietoti rievās šķērsriezumā no rotora kontakta virsmas uz serdes daļu) (IIMT-3 mikrociētības mērīšanas iekārta). Rotoru materiālu ciētība tāpat arī izturības robeža nav vienmērīga rotoru dažādos šķērsriezuma punktos.

3.3. Rotoru materiālu makro un mikro struktūras analīze

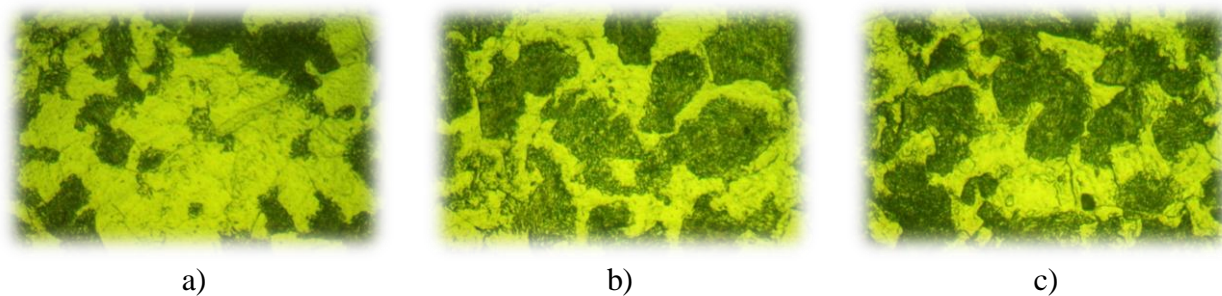
Ar makrostruktūras analīzes palīdzību tiek analizēts sagataves ieguves veids. Tiek veikta rotoru materiālu šķērsriezuma virsmas apstrāde ar Heines reaktīvu. Materiālu ieguves veids un tālākā apstrāde būtiski izmaina materiāla mehānisko īpašību rādītājus. Skrūves tipa kompresora rotoru materiāla apstrādātos makro pieslīpņus ar Heines reaktīvu var aplūkot 3.1. attēlā.



3.1. att. Ar Heines reaktīvu apstrādāto rotoru makropieslīpņi

Ar Heines reaktīvu apstrādātie makro paraugi mums parādīja to, ka skrūves tipa kompresoru rotoru sagataves ir iegūtas atlejojot, jo uz makro paraugiem atklājās lieta materiāla makrostruktūra, kas ir raksturīga ar trim sacietēšanas zonām, kas atzīmētas 3.1. attēlā.

Lai varētu izvērtēt CE55RW rotoru materiālu un rast iemeslus materiāla nevienmērīgumam, materiālu analīzes ietvaros tiek arī veikta rotoru materiāla mikrostruktūras analīze ar optisko metalurģisko mikroskopu IM 7000 dažādos šķērsriezuma punktos. Rezultāti atspoguļoti 3.2. attēlā.



3.2. att. Rotoru materiālu mikrostruktūra ar IM 7000 100x/0,9 palielinājumā
a) serdes daļa, b) virzienā uz virskārtu, c) virskārta

Ar šīs analīzes palīdzību var izvērtēt materiāla mikrostruktūru, tās defektus, struktūras nepilnības un izmaiņas. Materiāla mikrostruktūra ir viens no galvenajiem materiāla raksturojošiem faktoriem, kas ietekmē materiāla mehāniskās īpašības.

3.4. Secinājumi

Veicot skrūves tipa kompresora CE55RW rotoru materiālu analīzi tika secināts:

1) Ķīmiskā analīze parādīja to, ka rotoru izgatavoti no kvalitātes oglekļa tērauda C35 ar mazu oglekļa saturu robežās no 0,35...0,36%;

2) Salīdzinot pēc marku kataloga [34], materiāla mehāniskās īpašības, šīs markas tēraudam ir zemākas, nekā tās tiek uzrādītas;

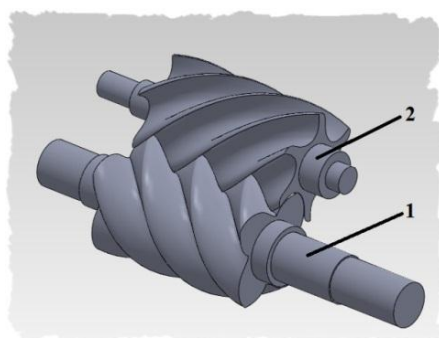
3) Rotoru materiālu struktūras nevienmērīgums ir saistīts ar lieta materiāla kristalizāciju, jo pēc makrostruktūras analīzes rezultātiem tika secināts, ka rotoru sagataves tika iegūtas ar liešanas tehnoloģijas palīdzību. Arī mikrostruktūras analīzes rezultātā tika novērots mikrostruktūras nevienmērīgums, kas liecina, ka materiāla struktūra dažādos šķēsgriezuma punktos veidojusies ar atšķirīgu ātrumu, līdz ar to izmainot struktūru un materiāla mehāniskās īpašības.

Pēc skrūves tipa rotoru materiāla analīzēm var secināt, ka tērauda esošās mehāniskās īpašības nav atbilstošas uzdotajām ekspluatācijas prasībām, līdz ar to rotoru kontakta virsma īsā laika periodā izdilst, samazinot kompresora darbības efektivitāti. Rotoru kalpošanas laika samazināšanās iemesli galvenokārt ir saistīti ar materiāla zemām fizikāli-mehāniskām īpašībām un to struktūras nevienmērīgumu. Rezultātā šo rotoru izgatavošanā nepieciešams izvēlēties materiālu ar augstākām fizikāli-mehāniskām īpašībām vai uzlabot esošo materiālu, lai nodrošinātu efektīvu kompresoru darbību.

4.nodaļa KOMPRESORU ROTORU IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJU ANALĪZE UN KALPOŠANAS ILGUMA PALIELINĀŠANAS IESPĒJU IZPĒTE

4.1. Rotoru izgatavošanas tehnoloģiju analīze

Tā kā viens no rotoru (4.1. att.) atteikumu mazināšanas risinājumiem ir izgatavot jaunu rotoru no cita materiāla ar labākām fizikāli-mehāniskām īpašībām. Nodaļā analizējot sastopamās izliekto virsmu izgatavošanas tehnoloģijas, tiek veidota jauna izgatavošanas tehnoloģija, iekļaujot materiāla uzlabošanas apstrādes procesu, kas paredz rotoru kontakta virsmas uzlabošanu ar nodilumizturīgu pārklājumu abrazīvo vielu iedarbes samazināšanai.



4.1. att. Skrūves tipa kompresora rotoru

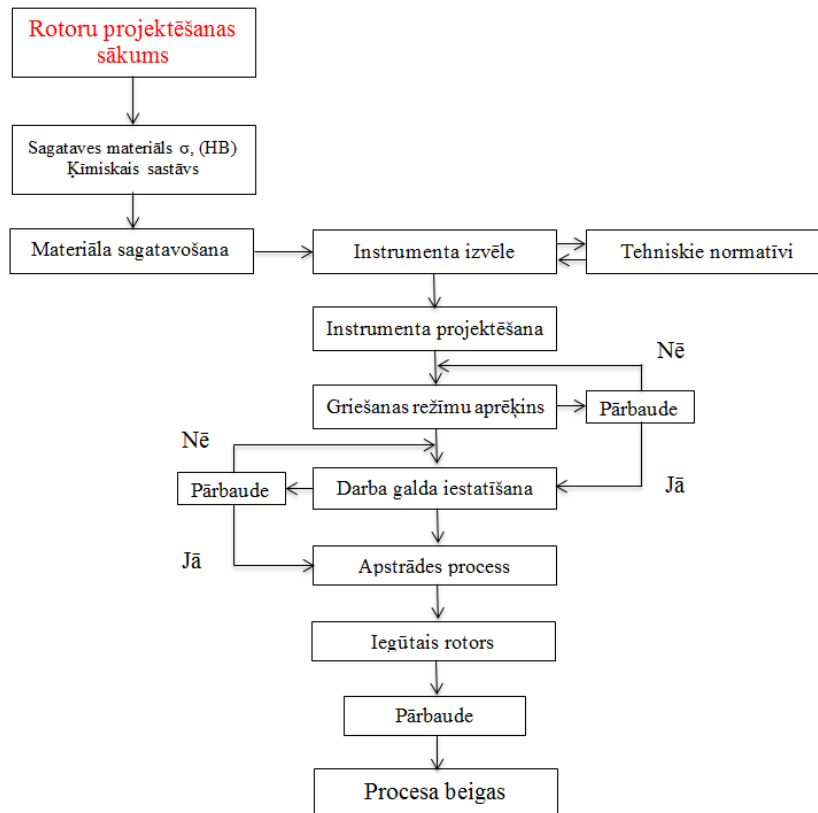
Analīze tiek veikta balstoties uz izstrādātu rotoru izgatavošanas tehnoloģijas algoritmu izstrādi (4.2. att.), sākot no rotoru projektēšanas līdz pat gatavam rotoram.

Izgatavojot rotorus ir jānodrošina nepieciešamie rotoru uzstādītie tehniskie noteikumi. Šo prasību izpildei ir nepieciešams nodrošināt rotoru kontakta virsmas izveidi ar augstu izmēru precizitāti un atbilstoši uzdotām prasībām virsmas topogrāfijas raksturojošos parametrus, piemēram, raupjuma profila vidējo aritmētisko novirzi $Ra\ 0,32\dots 0,63\ \mu m$.

Tā kā pie atteikumu analīzes tika novērots, ka biežāk sastopamākie atteikumi ir saistīti ar virsmas mehāniskiem bojājumiem, līdz ar to vērība tiek pievērsta kontakta virsmas kalpošanas laika palielināšanas iespējām. Tiek savstarpēji salīdzinātas populārākās materiālu nostiprināšanas metodes, piemēram, nostiprināšana ar plastisko deformāciju [1,30], termisko apstrādi [2], ķīmiski termisko apstrādi. Termiski apstrādājot eļļas plūsmas skrūves tipa kompresora rotorus var uzlabot mehāniskās īpašības, nemainot virskārtas ķīmisko sastāvu, kā arī palielināt rotoru virskārtas nodilumizturību. Veicot termisko apstrādi tiek konstatēti zemāk minētie trūkumi:

1) Sakarā ar rotoru sarežģīto profilu nevar vienmērīgi sakarsēt tā virskārtu;

- 2) Nepieciešams rotorus izgatavot no tērauda ar oglekļa saturu, kas nav mazāks par $C > 0,25\%$;
- 3) Nespēj nodrošināt atbilstošus dzesēšanas apstākļus, kā rezultātā rodas rūdīšanas brāķis plaisas, deformācijas;
- 4) Nepieciešams izgatavot sarežģītas formas karsēšanas iekārtas.



4.2. att. Skrūves tipa kompresoru rotoru izgatavošanas tehnoloģijas algoritms

Esošā skrūves tipa kompresoru rotoru ir izgatavoti no tērauda C35. Tā sastāvā oglekļa daudzums ir atbilstošs, lai varētu materiālu pakļaut termiskai apstrādei ar mērķi paaugstināt mehāniskās īpašības. Bez termiskās apstrādes pielietošanas materiālam cietība HV 123-167 kg/mm², maksimālā izturības robežas spriegums R_m 430 N/mm², elastības robežas spriegums R_e 215 N/mm² [34]. Termiski apstrādājot skrūves tipa rotorus tiek iegūts materiāls ar paaugstinātām mehāniskām īpašībām, kuras attēlotas 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Materiālu mehāniskās īpašības pēc termiskās apstrādes [34]

Materiāls	C35	C55	30CrMoV
Rūdīšana	850°C	840°C	880°C
Dzesēšanas vide	Ūdens	Ūdens	Ūdens
Atlaidināšana	500°C	400°C	500°C
Dzesēšanas vide	Gaiss	Gaiss	Gaiss
R_m	660	820	870
R_e	470	590	740
HRC	12	28	31
A	17	10	16

Pēc materiālu uzlabošanas ar termisko apstrādi netiek saglabāta stīga rotoru serdes daļa, līdz ar to liela vērtība tiek pievērsta progresīvām apstrādes tehnoloģijām [2], izstrādājuma virskārtas

nostiprināšanai. Tiek lietoti nostiprinošie pārklājumi. Uz izstrādājuma virskārtas tiek uzklāts materiāla slānis ar daudz labākām mehāniskām īpašībām nekā pamatmateriālam, lai palielinātu cietību, nodilumizturību un samazinātu berzes pretestību, kā arī aizsargātu izstrādājuma kontakta virsmu no agresīvās darba vides. Skrūves tipa kompresoru rotoru kontakta virsma var tikt pārklāta, piemēram, ar TiN, Ti(CN), SiC, Mo₂N, TiAlN un citiem pārklājumiem. Lai palielinātu kontakta virsmas kalpošanas laiku, šo iepriekš pieminēto virskārtas uzlabošanas tehnoloģisko procesu nepieciešams iekļaut jaunu rotoru izgatavošanas procesā.

4.2. Materiālu izvēles analīze

Šajā nodaļā tiek aplūkoti galvenie materiālu izvēles nosacījumi, lai racionāli izvēlētos materiālu, kas atbilst rotoru materiālu uzdotām prasībām. Izvēloties materiālu rotoru izgatavošanai, nepieciešams izvēlēties to ar lielāku cietību, lielāku izturības robežspriegumu, kas samazinās virsmas dilšanas intensitāti. Rezultātā tiek piedāvāts materiāls rotoru izgatavošanai. Tā kā dzelzs sakausējumu klāsts ir ļoti plašs, to pieejamība ir neierobežota, līdz ar to skrūves tipa kompresora CE55RW rotoru izgatavošanai rekomendē izvēlēties materiālu no kvalitātes tēraudu grupas – tērauds C55 vai legēto tēraudu 30CrMoV.

4.3. Rotoru nominālā profila atjaunošanas iespēju analīze

Ekspluatācijas laikā eļļas plūsmas skrūves tipa kompresora galvenās darbīgās daļas – rotoru, tiek pakļauti lieliem rotācijas ātrumiem, mainīgiem un plašiem spiedienu diapazoniem, mainīgām cikliskām slodzēm un dažādām darba vidēm. Mainīgo darba apstākļu rezultātā izmainās rotoru salāgojums, kas izsauc dažādus kompresoru neatgriezeniskus darbības traucējumus. Rotoru izdilums tiek kontrolēts mērot kompresora ražību. Ja kompresora ražība ir samazinājusies par 15 %, rodas nepieciešams atjaunot rotoru salāgojumu - jāveic rotoru profilu un spiediena starptelpu hermētiskuma atjaunošana. Šīs nodaļas ietvaros tiek analizēti vairāki virsmu atjaunošanas risinājumi, sākot no tradicionāliem un beidzot ar progresīviem atjaunošanas paņēmieniem. Racionālākais atjaunošanas paņēmiens tiek izvēlēts pēc vairākiem kritērijiem [3]:

- 1) Nodiluma lielums, veids un raksturs;
- 2) Ekonomiskie apsvērumi;
- 3) Izvēlētā atjaunošanas tehnoloģija;
- 4) Remonta bāzes, izejmateriālu un iekārtu esamība utt..

4.4. Matemātisko izteiksmju izveide rotoru profila līknes modelēšanai

Projektējot skrūves tipa kompresora rotoru profilu ir jāzina un jāņem vērā daudzi kompresora un tā ekspluatācijas parametri, kas ir saistīti ar profila formas izveidi, piemēram, teorētiskā ražība, saspiežamā gāze, darba temperatūra, gaisa mitrums, kompresoru piedziņas veids un pielietošanas sfēra. Rotoru profili tiek veidoti saskaņā ar sazobes teoriju. Skrūves tipa kompresora rotora profilam ir jābūt tādām, lai skrūves kontakta līnija, kas veidojas tuvinot vijumu ar rievu būtu nepārtraukta no iesūkšanas līdz izplūdei [32]. Inženieru darbu risinājumos ir sastopamas dažādas rotoru profila aprēķinu metodikas. Izmantojot analītisko aprēķinu metodiku, ar dažādu matemātisko sakarību palīdzību var aprakstīt precīzi rotoru profilu.

No sazobes teorijas izriet, ka viena rotora profila izcilni var izvēlēties patvaļīgi, bet otru rotora profila iedobumu, ir jāatrod pēc salāgojuma likumiem. Sākot viena rotora profilēšanu profila punktu koordinātes punktiem x_{01} un y_{01} un to pirmiem atvasinājumiem kā $\frac{\partial x_{01}}{\partial t}$ un $\frac{\partial y_{01}}{\partial t}$ vai $\frac{\partial y_{01}}{\partial x_{01}}$ šķērsplaknē ir jābūt zināmiem. Šie profila lielumi var detalizēt vienu vai otru dzenošo, dzīto vai rezultātā abus rotorus kopā. Ja primārā rotora profils tiek definēts kā izciļņu vārpsta pagrieziena leņķis starp rotoru $\Sigma=0$, apvelšanas nosacījumi skrūves rotoru ir noteikti pēc 4.1. sakarības [4].

$$\frac{dy_{01}}{dx_{01}} \left(ky_{01} - \frac{C}{i} \sin\theta \right) + kx_{01} + \frac{C}{i} \cos\theta = 0 \quad (4.1.)$$

kur: $k = 1 - \frac{1}{i}$ – koeficients;

C – rotoru starpasu attālums, (mm);

$i = \frac{p_2}{p_1}$ – pārnese skaitlis (p_1, p_2 – dzenošā rotora vijumu, dzītā rotora rievu skaits);

θ – dzenošā rotora pagrieziena leņķis.

Ja pie rotoru paralēlām asīm pagriezes leņķis $\tau = \frac{\theta}{i}$, apveltā profila koordinātes dzenošajam rotoram šķērsplaknē tiek izskaitļotas pēc 4.2. sakarībām [11].

$$\begin{aligned}x_{02} &= x_{01} \cos k\theta - y_{01} \sin k\theta - C \cos \frac{\theta}{i} \\y_{02} &= x_{01} \sin k\theta + y_{01} \cos k\theta + C \sin \frac{\theta}{i}\end{aligned}\quad (4.2.)$$

Turpmāk sadaļā tiks aplūkota viena no metodikām kā var noteikt rotoru profila koordinātes un izveidot matemātisko modeli esošās rotora virsmas aprakstīšanai. Metodes pamatā tiek izmantota grafiski analītiskā metode, kur ar instrumentālā mikroskopa MMN-2 palīdzību iegūst esošā profila līknes punktu koordinātes. Mērīti tiek dzenošā un dzītā rotora viena izciļņa aksiālais profils, viena soļa ietvaros. Šo punktu izvietojumu telpā pielīdzinām pirmā tuvinājuma līknēm: lineārām, kvadrātiskām u.c.. Izmantojot mazāko kvadrātu metodi aproksimējam izmantojamajam modelim pielāgojuma koeficientus, lai šis modelis labāk atbilstu eksperimentu mērījumu iegūtiem rotoru profila koordinātu punktiem. Matemātiskā modeļa izstrādes metodika ļauj vienkārši aprakstīt jebkuru profila līknes apgabalu, ko var salīdzināt ar teorētisko profila līkni un vienkāršoti projektēt instrumentu griezošo virsmu, ko izmantos rotoru profilu profilēšanā atjaunošanas tehnoloģijā. Funkcionālo sakarību matemātiskā formā pieraksta kā funkciju atbilstoši 4.3. sakarībai [27].

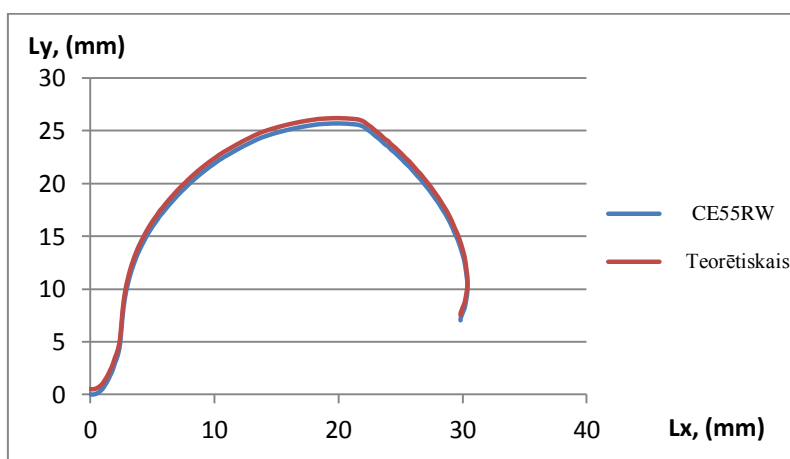
$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.3.)$$

kur: y – funkcija;

x_1, x_2, \dots, x_n – argumenti.

Ar iegūto koordinātu datu palīdzību dzenošā (4.3. att.) rotora profils tiek attēlots grafiski divu plakņu koordinātu sistēmā kopā ar teorētisko līkni.

Pēc rotoru profila līknes koordinātu atrašanās, veido matemātiskās sistēmas, kuras atrisinot iegūst izvēlēta modeļa līkņu apgabalu koeficientus no kuriem veido matemātiskās sakarības, kas matemātiskā formā tiek pierakstīta kā funkcija atbilstoši 4.3. sakarībai.



4.3. att. Dzenošā rotora profila līkne

No koordinātēm iegūtās līknes tiek pielīdzinātas grafiskām sakarībām. Dzenošā rotora profils tika sadalīts četros apgabalos, kur starp šīs līknes koordinātu punktiem x un y tiek meklēta kvadrātiska sakarība 4.4., kur a, b, c , ir patstāvīgi koeficienti nenoteiktības.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.4.)$$

Līknes punkti atrodas uz nenoteiktas parabolas. Sakarības 4.4. parametrus iezvēlās tā, lai mērījuma kļūdas kvadrātu summa būtu vismazākā, kur jāizpildās nosacījumiem: $\frac{\partial u}{\partial a} = 0$; $\frac{\partial u}{\partial b} = 0$; $\frac{\partial u}{\partial c} = 0$. Iegūstot pārveidojumus atvasinājuma funkcijām y ar mainīgiem koeficientiem a, b, c, izveido matemātisku sistēmu, kura atbilst vienādojumu 4.5. sistēmai [29].

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \\ a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i + nc = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (4.5.)$$

Atrisinot vienādojuma sistēmu katram dzenošā rotora profila apgabalam atrod funkcijas 4.4. koeficientus a, b, c un izveido sekojošas matemātiskās sakarības noteiktā intervālā.

Intervāls x (0,000-2,400)

$$y = 1,018x^2 - 0,546x + 0,075$$

Izmantojot mazāko kvadrātu metodi, ir izveidoti eļļas plūsmas skrūves tipa kompresora rotoru apgabalu matemātiskie modeļi, ar kuru palīdzību tiks konstruēti instrumenta profili dzenošā un dzīta rotora profilēšanai pie izgatavošanas vai atjaunošanas procesa.

4.5. Instrumenta projektēšanas metodika

Iepriekšējā nodaļā veikto matemātisko sakarību izstrāde, ļauj izveidot instrumentu rotora profila izgatavošanai. Šajā nodaļā tiek analizētas instrumentu izgatavošanas metodikas. Sīkāk tiek apskatīts instruments, kas darbojas pēc novelšanās principa, kas nodrošina ātru un precīzu apstrādes procesu.

Skrūves tipa kompresora rotoru izgatavošanas instrumentu profila noteikšanai nepieciešams izpildīt šādus nosacījumus:

- 1) Izveidot vienādojumu, kas ļauj viena kustīgā posma uzdotās koordinātes pārvērst citā kustīgā koordinātu sistēmā, kurā meklējams apliecošā instrumenta profils;
- 2) Atrast apliecošo līkņu kopu.

Instrumenta sākuma koordinātes var aprakstīt ar 4.6. sakarībām [33].

$$\begin{aligned} x_0 &= r(\varphi - \sin\varphi) \\ y_0 &= r(1 - \cos\varphi) \end{aligned} \quad (4.6.)$$

kur: r – sākotnējais aploces rādiuss;

φ – rotora pagriezes leņķis no sākotnējā stāvokļa, kas vienāds ar kustīgās, nekustīgās koordinātu sistēmu asu pagriezes leņķi.

Gliemežfrēzes zoba profila vienkāršotai izgatavošanai sarežģīto teorētisko profila līkni aizstāj ar aploces loku. Teorētiskā profila aizvietojušās aploces loka centru O_1 koordinātes x_0 un y_0 var izteikt ar 4.7. vienādojumu, izmantojot analītiskās ģeometrijas sakarības:

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{(x_2^2 + y_2^2)y_1 - (x_1^2 + y_1^2)y_2}{2(x_2y_1 - x_1y_2)} \\ y_0 &= \frac{(x_2^2 + y_2^2)x_1 - (x_1^2 + y_1^2)x_2}{2(x_2y_1 - x_1y_2)} \end{aligned} \quad (4.7.)$$

4.6. Secinājumi

Eļļas plūsmas skrūves tipa kompresora rotoru izgatavošanas analīzes rezultātā tika apskatīti galvenie aspekti, kas ir jāņem vērā, izgatavojot to galvenās sastāvdaļas. Viens no galvenajiem aspektiem ir izvēlēties pareizo izgatavošanas tehnoloģiju un materiālu. Izvēloties

materiālu, kas paredzēti saspiesta gaisa ražošanai līdz 10 Bar lielam spiedienam, ieteicams izgatavot no viengabala tērauda velmējuma. Izvēlēti tika materiāli ar daudz augstākām mehāniskām īpašībām nekā sākotnēji C35 tēraudam un piedāvāts C55 kvalitātes oglekļa konstrukcijas tērauds, un 30CrMoV legētais kvalitātes oglekļa konstrukcijas tērauds ar lielāku siltuma noturību, kas kalpotu rotoriem paaugstinātās temperatūrās.

Izvērtējot kritērijus, kas nosaka atjaunošanas tehnoloģijas piemērotību rotoru lielo 100...2500 μm abrazīvo nodilumu vai bojājuma novēršanai tiek noteikta virsmu atjaunošana uzputinot pārklājumu ar plazmu vai uzkausēšana elektrosārņos.

Mazākā kvadrātu metode ļauj aproksimēt izmantojamajam modelim pielāgojuma koeficientus, lai šis modelis labāk atbilstu eksperimentu mērījumos iegūtiem rotoru profila koordinātu punktiem. Nodaļas ietvaros tika izveidoti profila matemātiskie modeļi, kas atvieglo instrumenta projektēšanu. Precīzākai matemātiskā modeļa izveidei, profila līknes tika sadalītas vairākos apgabalos.

Veicot instrumentu izvēles pamatojuma analīzi, starp instrumentu darbības metodēm – novelšanās un kopēšanas – tika izvēlēts instruments, kas darbojas pēc novelšanās principa.

Analizējot instrumenta projektēšanas metodiku tika iegūtas sakarības ar kuru palīdzību var aprakstīt instrumenta griezošās daļas līkni. Tā kā sarežģītās formas profila izgatavošana un griešanas funkciju nodrošināšana ir apgrūtināta, līdz ar to teorētiskā līkne tika aizstāta ar jaunu aploces loku, kas vienkāršoja teorētisko līkni un atviegloja instrumenta izgatavošanu.

5. nodaļa SKRŪVES TIPA KOMPRESORU DEFINĒTĀS RAŽĪBAS NODROŠINĀŠANA AR VAKUUMĀ VEIDOTIEM PĀRKLĀJUMIEM

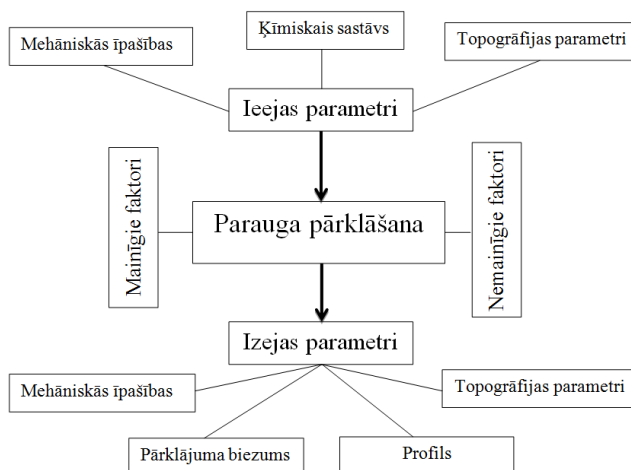
5.1. Vakuumā veidotu pārklājumu uzklāšanas tehnoloģijas

Šajā sadaļā tiek analizētas progresīvo pārklājumu uzklāšanas tehnoloģijas nelielu izdilušanu likvidēšanas vai materiāla virskārtas nostiprināšanas nolūkos:

1) Pārklājumi tiek veidoti ar ķīmiskās reakcijas palīdzību (*Chemical Vapor Deposition - CVD*);

2) Pārklājumi, kas tiek veidoti ar fizikālo procesu palīdzību (*Physical Vapor Deposition - PVD*), procesa laikā iztvaikotais uzklājamais materiāls nogulsnejas uz pamatmateriālu.

Pārklājuma lietderīguma pārbaudei tiek veikta paraugu pārklāšana ar analīzes rezultātā izvēlētu tehnoloģiju – katodu loka izlādes nogulsnešanu.



5.1. att. Skrūves tipa kompresoru kontakta virsmu pārklāšanas blokskāma

Pētāmā materiāla virsma eksperimentālos nolūkos tiek uzlabota ar nodilumizturīgu vienslāņu TiN pārklājumu, kas ir ar labākām mehāniskām īpašībām nekā pamatmateriālam – lielāku cietību, nodilumizturību, samazinātu berzes pretestību. TiN tiek izvēlēts, jo tas plaši tiek lietots

arī kā aizsargpārklājums dažādu citu izstrādājumu izgatavošanai, lai nocietinātu berzes kontakta virsmas, kā arī palielinātu tā kalpošanas laiku. Atbilstoši jaunu rotoru kontakta virsmu izgatavošanas prasībām izgatavotie paraugi tika pārklāti vakuumiekārtā ar sekojošiem iestatītiem parametriem (ierosmes strāva I_i , gāzes spiediens P_N , spriegums pamatnei U_{pam} , V_{ar} , uzklāšanas laiks T_{uzp}), kas atspoguļoti 5.1. tabulā.

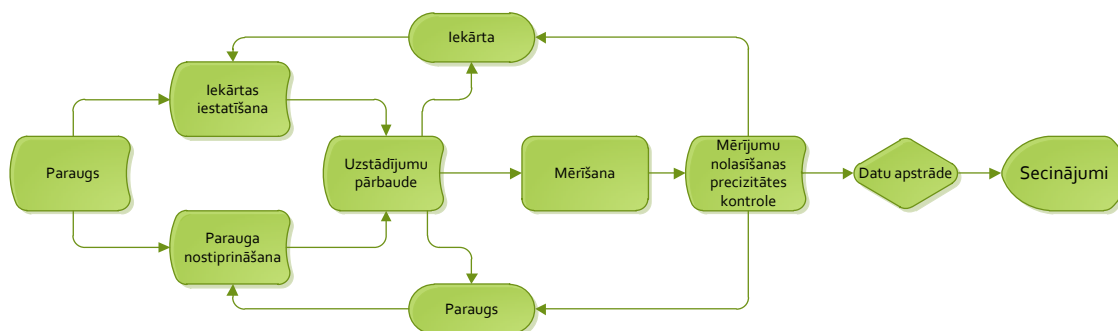
5.1. tabula

Galvenie TiN pārklājuma pārklāšanas režīmi

Grupa	I_i , (A)	P_N , (Pa)	U_{pam} , (V)	V_{ar} , (Pa)	T_{uzp} , (min)
1. Grupa	80	$1 \cdot 10^{-3}$	140	$1 \cdot 10^{-3}$	20
2. Grupa	80	$4 \cdot 10^{-4}$	140	$4 \cdot 10^{-4}$	20
3. Grupa	80	$3 \cdot 10^{-3}$	140	$3 \cdot 10^{-3}$	20

5.2. Eksperimenta datu apstrādes plānošana

Šajā nodaļā veikts īss izklāsts par eksperimentu datu apstrādi to nozīmi un metodiku. Eksperimenta ietvaros tiek veikta paraugu uzdoto datu mērīšana ar iekārtai noteiktu precizitāti pēc paraugu mērīšanas metodikas (5.2. att.).



5.2. att. Mērīšanas metodika

Iegūtie mērījumu rezultāti tika apstrādāti, izmantojot matemātiskās statistikas datu apstrādes metodes.

5.3. Paraugu izgatavošanas metodika

Eksperimentu veikšanai tiek izgatavoti vairāki paraugi, kas ir līdzvērtīgi rotoru materiālam un atbilstošiem virsmas raksturojošiem parametriem. Šīs nodaļas ietvaros tiek analizēta paraugu izgatavošanas metodika un nozīme. Ar mēriekārtu ierobežotām iespējām eksperimenta veikšanai tiek izgatavoti 12 paraugi no C35 tērauda ar noteiktu ķīmisko sastāvu un mehāniskām īpašībām (HV 123-167 kg/mm^2 , R_m 430 N/mm^2 , R_e 215 N/mm^2 [34]). Paraugu izmēri 30x30x5mm.

5.4. Raksturojošo parametru izmaiņu analīze skrūvveida rotoriem, kas uzlaboti ar dažādiem pārklājumiem, izmantojot vakuuma tehnoloģijas

5.4.1. Veidotā pārklājuma slāņa biezuma noteikšana

Eksperimentā izmantotie paraugi tika pārklāti ar pārklājumiem, kuru pamatā ir TiN. Veidotās paraugu grupas atšķiras ar uzklāšanas režīmiem (5.1. tabula). Pēc pārklāšanas tika veikta pārklājumu raksturojošo parametru noteikšana – uzklātā slāņa biezums. Mērīšana tika veikta izmantojot optisko mikrometru.



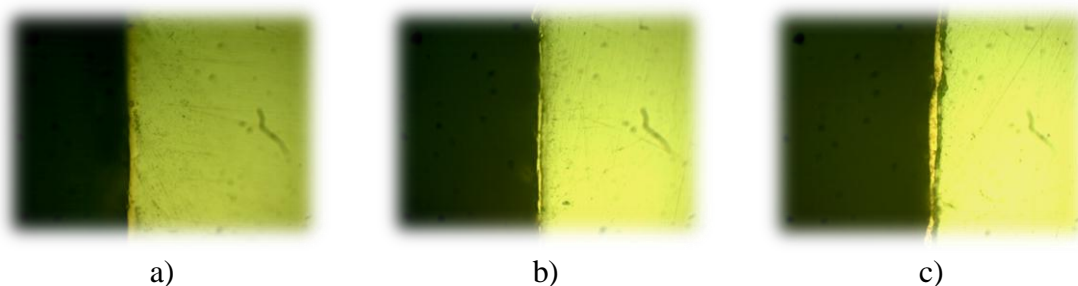
5.3. att. Paraugi pārklājuma slāņa biezuma mērīšanai

5.2. tabula

Pārklājumu biezuma mērījumi un rezultātu statistiskā apstrāde

Paraugu grupas apzīmējums	1. Grupa	2. Grupa	3. Grupa
Matemātiski sagaidāmā vērtība \tilde{m} , μm	2,91	2,76	2,85
Dispersija \tilde{D}	0,1121	0,1293	0,0783
Vidējā kvadrātiskā novirze $\sigma_{\tilde{m}}$	0,1059	0,1137	0,0885
Mērījumu relatīvā kļūda ϵ_{β} , %	5,98	6,78	5,10
Mērījumu ticamības intervāls 1 Grupa	I β (2,804; 3,016)		
Mērījumu ticamības intervāls 2 Grupa	I β (2,646; 2,874)		
Mērījumu ticamības intervāls 3 Grupa	I β (2,761; 2,939)		

Pārklājuma slāņa vizualizācijai tika izmantota optiskā mikroskopija - metalurģiskais mikroskops *IM 7000* no *Meiji Techno Inverted metallurgical microscope* sērijas ar 100x/0,9 objektīvu un digitālo spoguļkameru Canon EOS 500D.



5.4. att. Pārklāto paraugu digitālie attēli šķērsgriezumā
a) pirmās grupas paraugs, b) otrās grupas paraugs c) trešās grupas paraugs

Pēc iegūtiem nostiprinošā pārklājumu slāņa biezumu mērījumu rezultātiem varam secināt, ka biežākais un vienmērīgākais pārklājums, kas sasniedz 2,91 μm , novērojams pirmās grupas paraugiem. Salīdzinot (5.4. attēlā) savā starpā pārklāto paraugu šķērsgriezumus, trešās grupas paraugu šķērsgriezumam ir izteikti novērojami neskaidri tumši materiāla apgabali, kuri var liecināt par sliktu slāņa sasaisti ar pamatmateriālu. Šāds pārklājuma slānis ekspluatācijas laikā mazas slodzes iedarbības rezultātā tieksies atdalīties no pamatmateriāla.

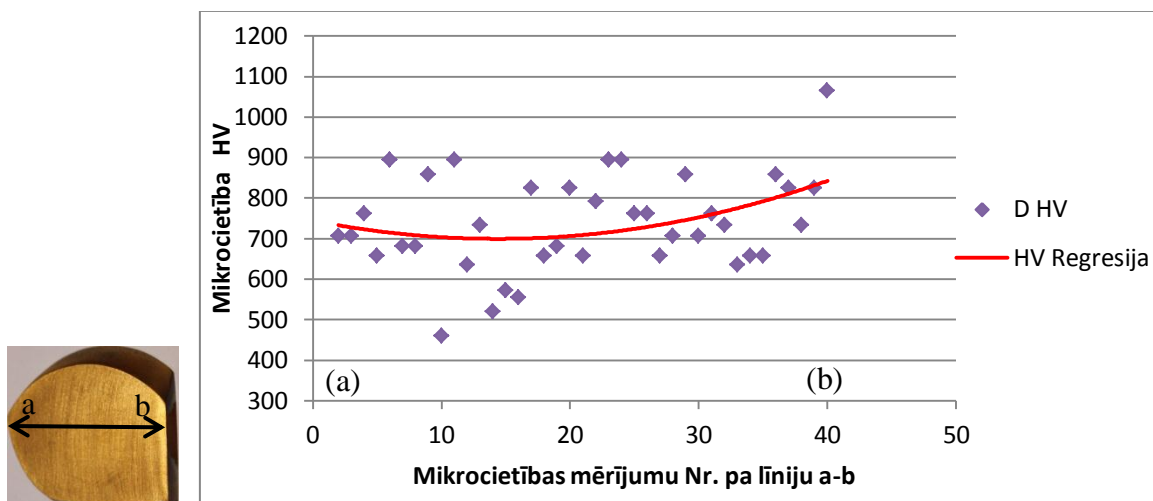
5.4.2. Pārklājumu mikrocietības izmaiņu analīze

Lai pilnīgāk raksturotu pārklājuma raksturojošās īpašības un tā ietekmi uz pamatmateriālu, tiek veikta mehānisko īpašību izmaiņu analīze. Izgatavotiem paraugiem tiek analizēta mikrocietības izmaiņa salīdzinot ar pamatmateriālu un mikrocietības izmaiņa mērot no pārklājuma uz pamatmateriālu [28, 30].



5.5. att. IIMT-3 mērišanas iekārtas kopskats

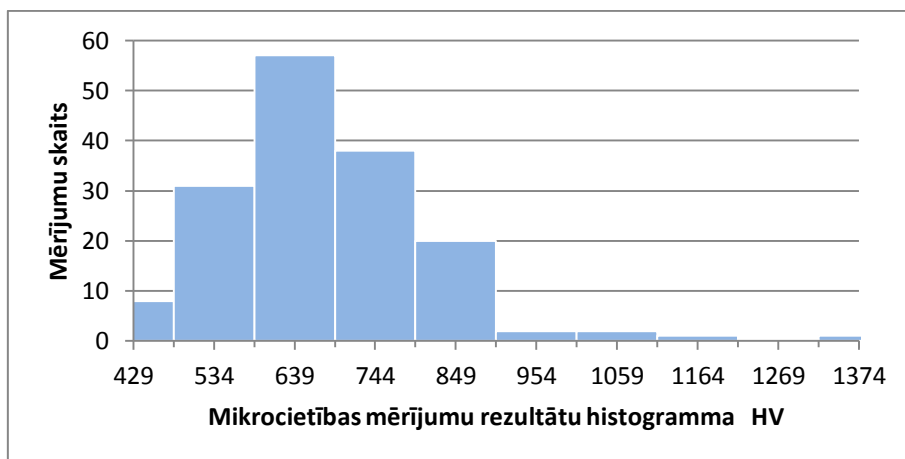
Katram paraugam tika veikti vairāki mēriji ar 0,5 mm intervālu un grupas ietvaros savstarpēji tika salīdzināti. Attēlā 5.6. grafiski ilustrēti pirmās grupas paraugu rezultātu mēriji.



5.6. att. Pirmās grupas virsmu nostiprinošo pārklājuma mikrocietības mēriji

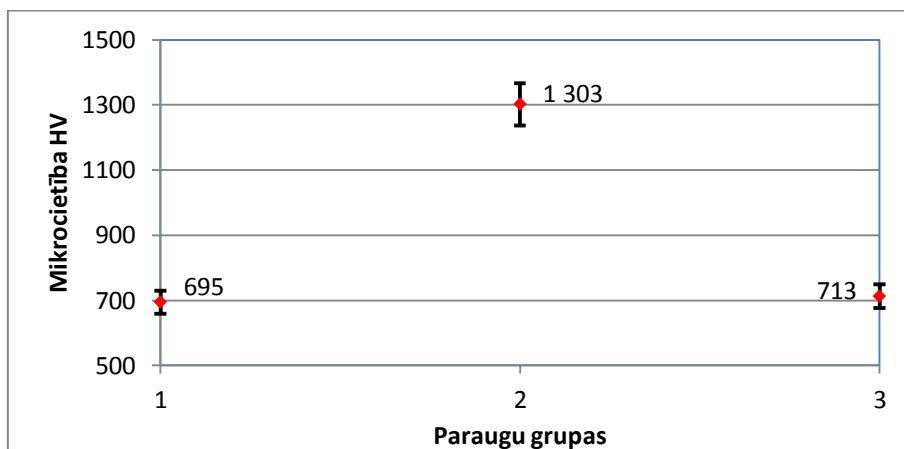
Pirmās grupas virsmu nodilumizturīgā pārklājuma mikrocietība svārstās robežās HV 456...1089 kg/mm² ar vidējo vērtību HV 695 kg/mm². Mēriju kļūda nepārsniedz 5% $\epsilon_{\beta} = 4,96\%$ un mēriju ticamības intervāls ir $I_{\beta} (660,414; 728,645)$.

Pēc 5.7. attēlā atspoguļotās mikrocietības gadījuma lieluma histogrammas var izvērtēt mēriju rezultātu izkliedi.



5.7. att. 1. grupas virsmu nostiprinošo pārklājuma mikrocietības gadījuma lieluma mēriju rezultātu histogramma

Pēc mērījumu rezultātu statistiskās datu apstrādes tiek aprēķināti un grafiski attēloti ticamības intervāli visām materiālu grupām (5.8. att.).



5.8. att. Virsmu nostiprinošo pārklājumu mikrocietība visām paraugu grupām

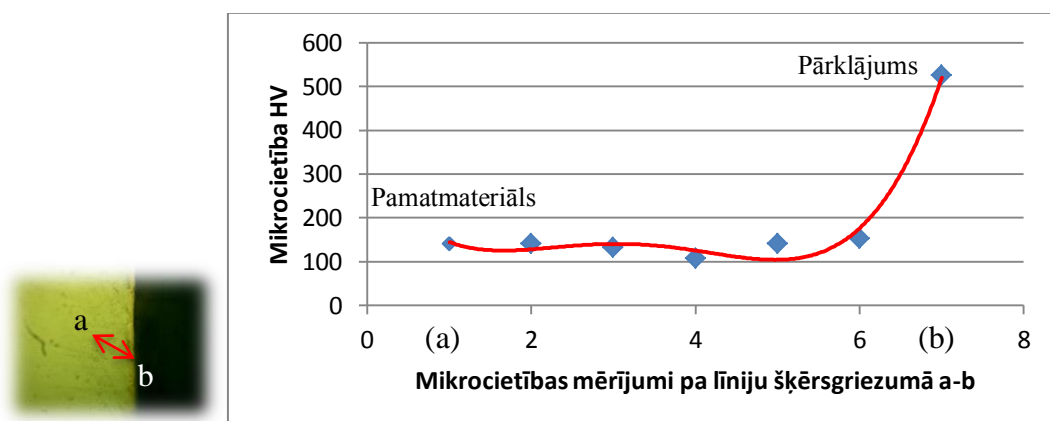
Salīdzinot savstarpēji visu grupu mērījumus, kas vienkopus ar ticamības intervāliem atspoguļoti 5.8. attēlā, var secināt, ka vislielākā nostiprinātā materiāla cietība ir novērojama otrās grupas paraugiem, savukārt vismazākais ticamības intervāls un mazākā mērījumu relatīvā kļūda ir pirmās grupas paraugiem.

5.3. tabula

Mikrocietības izmaiņas virzienā no pamatmateriāla uz virsmas nostiprinošo pārklājumu

Mērījums	HV 1. Grupa	HV 2. Grupa	HV 3. Grupa
Nr.1	141	141	95
Nr.2	141	122	75
Nr.3	131	56	61
Nr.4	107	131	101
Nr.5	141	75	141
Nr.6	152	131	213
Nr.7	526	1030	526

Lai novērtētu skrūves rotoru materiāla mehānisko īpašību izmaiņu, kas tika nostiprināti ar TiN pārklājumiem, tika veikta mikrocietības izmaiņas novērtēšana virzienā no pamatmateriāla uz virsmas nostiprinošo pārklājumu. Tādā veidā noskaidrojot vai nostiprināmais slānis uzklāšanas laikā ir izmainījis pamatmateriāla mehānisko parametru rādītājus. Mikrocietību izmaiņas visām trijām grupām atspoguļotas 5.3. tabulā.

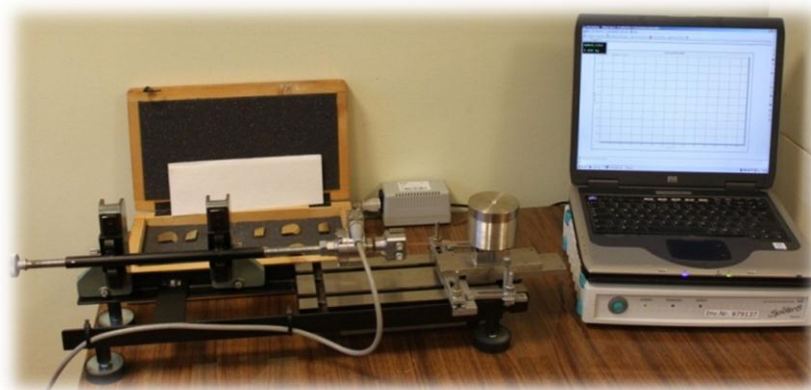
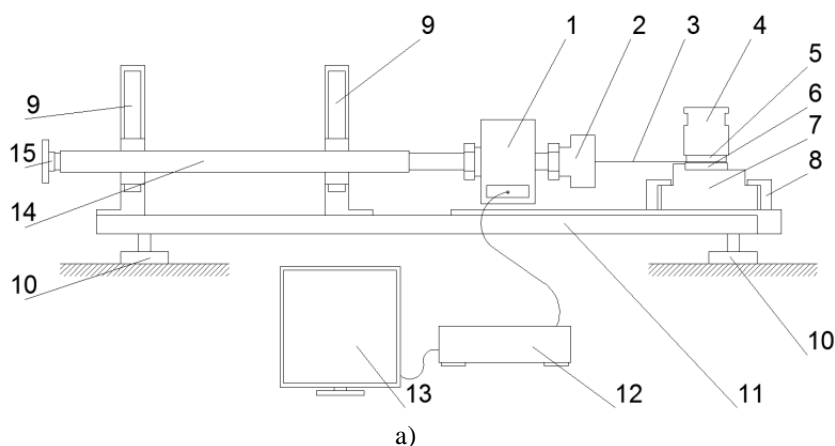


5.9. att. Mikrocietības izmaiņas virzienā no pamatmateriāla uz virsmas nostiprinošo pārklājumu

Analizējot iegūtos mikrociētības mērījumu rezultātus, var secināt, ka TiN pārklājums neizmaina pamatmateriāla mehāniskās īpašības.

5.4.3. Pārklājuma berzes koeficienta izmaiņu analīze

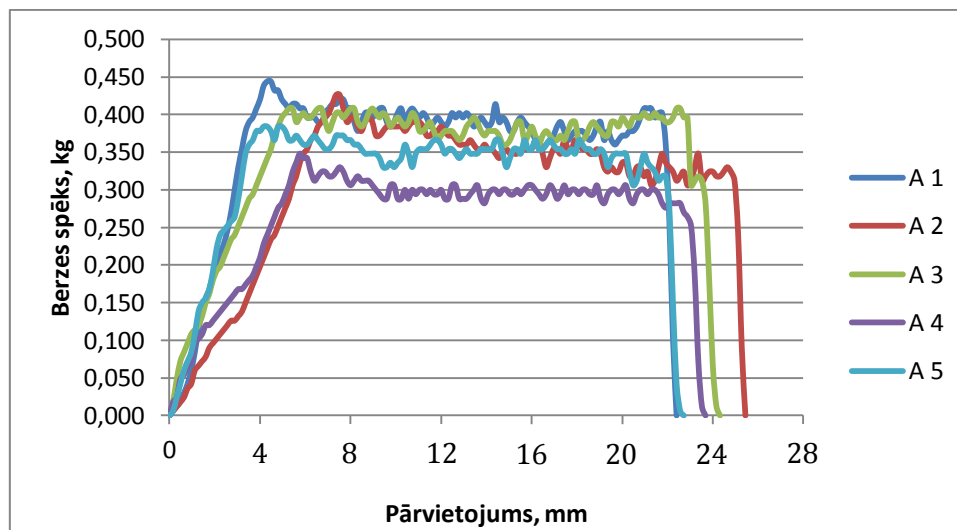
Katrā mikrotilpumā pie berzes notiek spriegumu cikliskas izmaiņas, materiāla robežslāņos notiek mikrobojājumu veidošanās, kas balstīta uz elastīgi plastiskās deformācijas likumsakarībām. Veicot skrūves tipa kompresoru rotoru kontakta virsmas uzlabojumus ir svarīgi iegūt virskārtu ar labākām mehāniskajām īpašībām tai skaitā ar mazāku berzes koeficientu, kas paaugstina kompresora daba efektivitāti un palielina kalpošanas laiku.



5.10. att. Berzes spēka noteikšanas iekārta

a) kinemātiskā shēma 1-dinamometrs, 2-satvērējs, 3-stieple, 4-slogotājs, 5-parugs, 6-pretparaugs, 7-turētājs, 8-piespiedējs, 9-regulējamās vadīklas, 10-regulējamā pamatne, 11-statīvs, 12-datu lasītājs, 13-datu apstrādātājs (PC), 14-vilces mehānisma vadīkla, 15-vilces mehānisms, b) kopskats

Tā kā skrūves tipa kompresorā atrodas skrūves pāris, kuru abu kontakta virsmas tiek pārklātas ar virsmas nostiprinošiem pārklājumiem, līdz ar to gan paraugs, gan pretparaugs ir ar vienādiem pārklājumiem un vienādiem virsmas topogrāfijas parametriem. Mērījumi tika veikti paraugiem un pretparaugiem bez to piestrādes. Eksperimenta laikā tiek mērīts berzes spēks, pēc kura tiek aprēķināts gan statistiskais, rotoru rotācijas uzsākšanas gadījumā, gan slīdes berzes koeficients to kustības laikā.



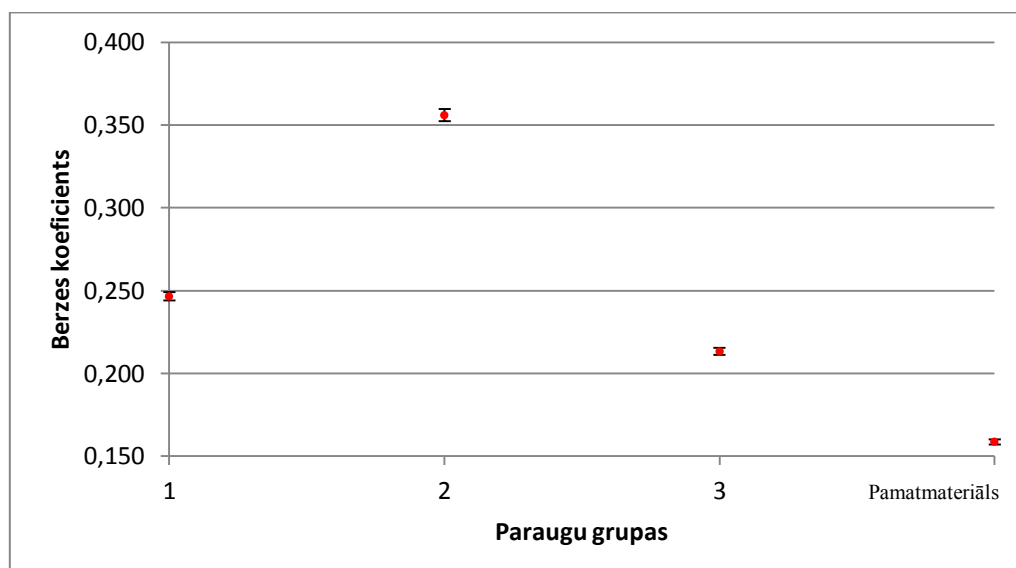
5.11. att. Berzes spēka mērījumi ar TiN nostiprinātiem 1. grupas rotoru materiālu paraugiem sausā kontakta gadījumā

5.4. tabula

Pirmās grupas paraugu mērījumi, aprēķinu rezultāti

	Statiskais berzes spēks	Slīdes berzes spēks
Slogojums m , (N)	14,2	14,2
Berzes spēks max (N)	3,9	3,5
Berzes koeficients μ_s, μ_{sl}	0,28	0,25

Pēc pirmās grupas slīdes berzes spēku mērījumiem (5.11. att. 5.4. tabula) var novērot ka berzes spēks svārstās robežās F_b 0,32...0,39 kg ar vidējo vērtību F_{bvid} 0,36 kg. Mērījumu mērīšanas kļūda nepārsniedz 1% $\epsilon_\beta = 0,72\%$ un mērījumu ticamības intervāls ir I_β (0,354; 0,359). Visu triju grupu paraugu berzes spēku savstarpējais salīdzinājums attēlots 5.12. attēlā.

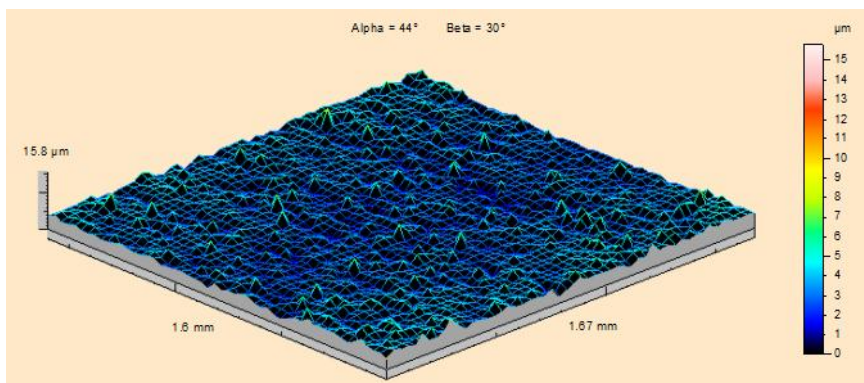


5.12. att. Slīdes berzes koeficientu savstarpējais salīdzinājums

Savukārt veicot kontakta virsmas piestrādes eksperimentus ir pārbaudīts, ka pēc kontaktu virsmas pārklāšanas ar nostiprinošiem pārklājumiem un veicot to piestrādi vai noslēdzošo apstrādi, kas rezultātā samazina lielos virsmu defektus, tiek samazināts berzes koeficients par 8...12%.

5.4.4. Pārklājuma virsmas kvalitātes novērtēšana ar kontakta tipa profilometru

Lai varētu spriest par virsmas topogrāfijas parametriem, vienlaikus par tās kvalitāti un uz tās esošiem defektiem, par ko liecināja iepriekšējā nodaļā veiktie pētījumi, pēc pārklāšanas ar TiN pārklājumu, kontakta virsmas tika pakļautas virsmas topogrāfijas analīzei ar kontakta tipa mērītāju 3D. 3D analīze vispilnīgāk raksturo paraugu kontakta virsmu mikro līmenī, kas sniedz informāciju ne tikai par galvenajiem virsmas raksturojošiem parametriem, bet arī raksturo to ar virsmas un tilpuma parametru kompozīcijas, telpisko, funkcionālo un hibrīda parametriem. 3D analīze dod iespēju arī novērtēt virsmu vizuāli, no kā rodas priekšstats par virsmas mikronegludumiem kopumā un tās raksturu atsevišķos apgabalos.



5.13. att. 1. grupas pārklātā parauga līmeņotā 3D virsma (1,6x1,6 mm)

Pēc paraugu pārklāšanas ar TiN materiāla slāni 1. grupas paraugu 3D topogrāfijas galvenos virsmas raksturojošo parametru analīzes datus un virsmu pēc līmeņošanas var aplūkot 5.13. attēlā un 5.5. tabulā.

5.5. tabula

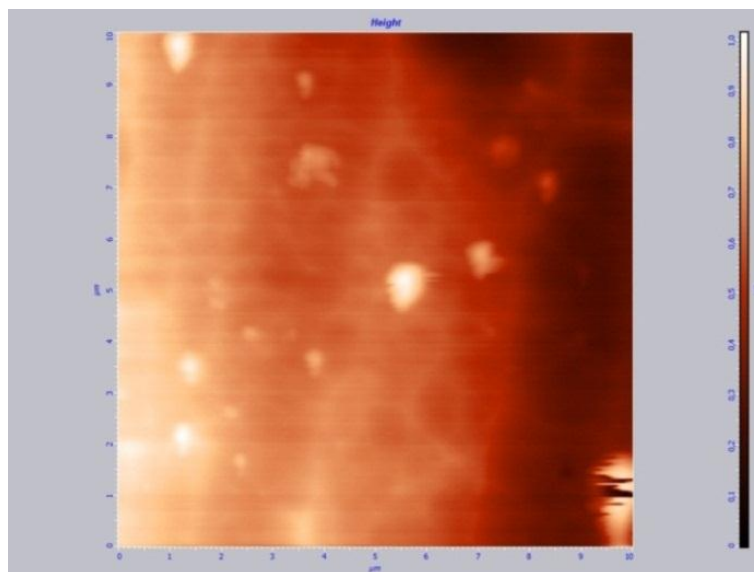
1. grupas pārklātā parauga topogrāfijas analīzes dati bez piestrādes

1. grupa	$S_{a,}$ (μm)	$S_{z,}$ (μm)	$S_{p,}$ (μm)	$S_{v,}$ (μm)	$R_{a1,}$ (μm)	$R_{a2,}$ (μm)	$RS_{m1,}$ (mm)	$RS_{m2,}$ (mm)
Paraugs a	0,439	6,040	4,150	2,750	0,314	0,258	0,0580	0,0708
Paraugs b	0,528	7,560	5,950	3,120	0,521	0,294	0,0340	0,0356
Paraugs c	0,395	5,590	3,900	2,270	0,341	0,260	0,0434	0,0899
Paraugs d	0,392	4,300	1,310	4,260	0,359	0,285	0,0331	0,0594
Vid.	0,439	5,873	3,828	3,100	0,384	0,274	0,042	0,064

Salīdzinot visas virsmu topogrāfijas, var novērot savdabīgus makro veidojumus robežās no 1,3...6,5 μm (izciļņus), kas haotiski izvietoti uz virsmas. Neregulāras formas nelīdzenumi, kā uzrāda iepriekš aplūkotie topogrāfijas mērījumi, izmaina rotoru kontaktu virsmas raksturojošos parametrus, piemēram, vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes palielinājusies no 0,413 līdz 0,539 μm . Savukārt veicot kontakta virsmas piestrādes eksperimentus ir pārbaudīts, ka, pēc kontaktu virsmas piestrādes, kas samazina lielos virsmu defektus, novērojama virsmas raksturojošo parametru izmaiņas, piemēram, R_a samazinās par 10-15%.

5.4.5. Pārklājuma virsmas kvalitātes novērtēšana ar AFM

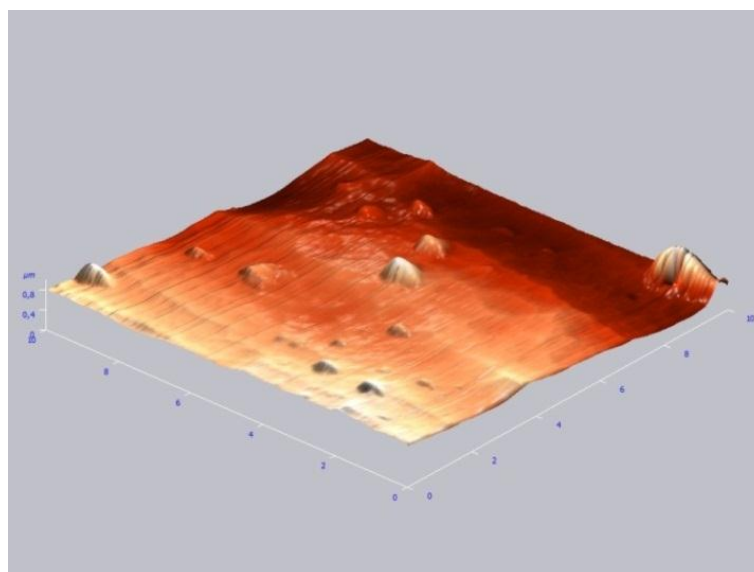
Aplūkojot skrūves tipa kompresora rotoru kontakta virsmu visu trīs grupu pārklātos paraugus uz virsmas ir sastopami telpiski veidojumi, dažādu lielumu un izvietojuma blīvuma virsmas izvirzījumi un ieplakas. Lai spriestu par izciļņu raksturu un formu skrūves tipa kompresora kontakta virsma tiek pakļauta virsmas kvalitātes analīzei nano mērogā, kas tiek veikta ar atomu spēku mikroskopu (AFM) palīdzību.



5.14. att. 1. grupas parauga AFM skanētās virsmas nano reljefs, reljefa attēlojums (10x10 μm)

Analizējot uz virsmas sastopamos defektus, tos var iedalīt divās grupās:

- 1) Regulāras formas defekti – rombveidīgi, apļveidīgi. Šī nostiprinošā pārklājuma nano reljefu defektu izmēru vērtības svārstās robežās no 140...330 nm;
- 2) Neregulāras formas defekti - pīles.



5.15. att. 1. grupas parauga AFM nano reljefs, 3D attēlojums

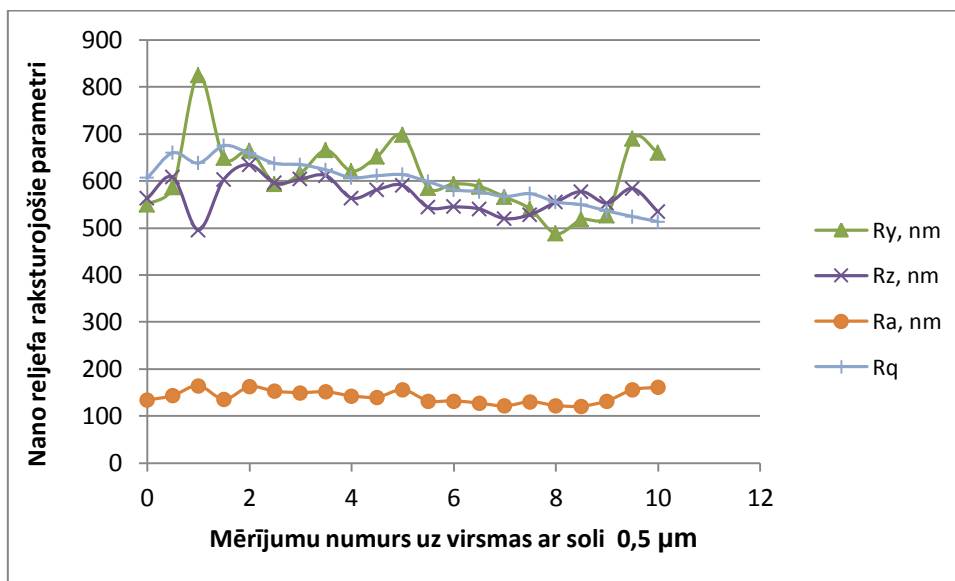
5.6. tabula

1. grupas parauga nostiprinošā pārklājuma virsmas nano reljefa raksturlielumi

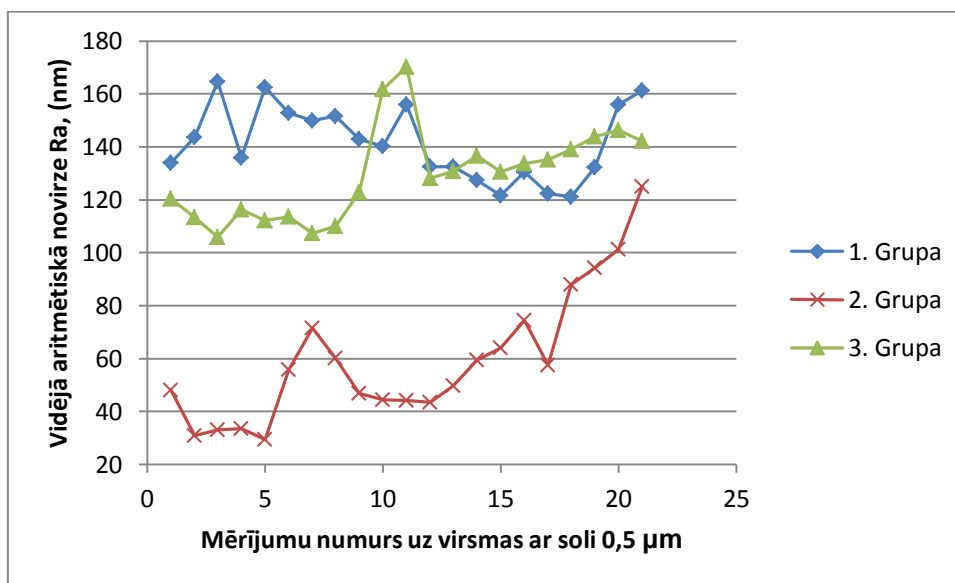
Ra, (nm)	Rz, (nm)	Rq, (nm)	Ry, (nm)
147,876	522,168	177,797	1012,48

Aplūkojot uzdotās virsmas raksturojošo parametru grafisko attēlojumu (5.16. att.) var izvērtēt virsmas viendabīgumu un spriest par tās kvalitāti. Iepriekšminētajā attēlā redzami profilogrammas parametri iegūti, analizējot katru skenēto rotoru kontakta virsmas laukumu intervālā ik pa 0,5 μm. Visu nostiprināto rotoru kontaktu virsmu salīdzināšanai tiek konstruēta diagramma (5.17. att.), kura raksturo Ra – profila vidējās aritmētiskās novirzes no vidusplaknes

– izmaiņas. Varam secināt, ka stabilākais Ra ir novērojams pirmās grupas paraugiem, bet viszemākā Ra vērtība – otrās grupas paraugiem.



5.16. att. 1. grupas parauga nostiprinošā pārklājuma virsmas nano reljefa raksturlielumi



5.17. att. Ra savstarpējais salīdzinājums

Salīdzinot savstarpēji visu trīs grupu pārklājumus tiek secināts, ka uzklāšana procesa mainīgais darba spiediens ļoti maz ietekmē virsmas nano reljefu. Uz visām kontakta virsmām ir sastopami uzklājamā materiāla defekti gan piliņu, gan ieplaku veidā. Veicot mērījumus atkārtoti vieniem un tiem pašiem paraugiem pēc laika, netika konstatētas virsmas reljefa izmaiņas. Līdz ar to tiek secināts, ka pārklājums un uz tā radušies defekti ir noturīgi laikā.

5.5. Pārklāto rotoru kontakta virsmu darba spēju prognozēšanas metodika

Šajā nodaļā tiek izveidota metodika eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru rotoru kontakta virsmu uzlabojumu efektivitātes izvērtēšanai. Tas nepieciešams, lai izvērtētu rotoru kalpošanas laika palielināšanas iespējas. Metodikā tiek piedāvāti divi kritēriji:

- 1) Kritērijs, kas balstīts uz rotoru virsmas kontakta tipu – kontakta tipa koeficients k_T ;
- 2) Kritērijs, kas ievēro nodiluma procesa norisi – nodiluma ietekmes koeficients k_d .

Kontakta tipa koeficients. Aprēķinos tiek izanalizēti vairāki virsmu parametru kritēriji, kas būtiski ietekmē kontakta virsmu darbību. Tam nolūkam tiek noteikti kontakta kritēriji sākotnējām (nepārklātām) virsmām un rezultējošām (pēc pārklāšanas) virsmām. Tā kā nepārtrauktā kontaktā atrodas divas virsmas, detaļu virsmu kontaktā kontakta virsmu savstarpējo iedarbi raksturo kontakta kritērijs (KK). Kontakta kritēriju nosakām pēc sakarības 5.1. [31].

$$KK = \frac{RS_{m1}H_{\mu}}{S_a E} \quad (5.1.)$$

kur: RS_{m1} – vidējais nelīdzenuma solis šķēlumā perpendikulāri berzes pāru kustības virzienam, (mm);
 H_{μ} – mikrociētība, (kg/mm²);
 S_a – virsmas vidējā aritmētiskā novirze, (μm);
 E – materiāla elastības modulis, (kg/mm²).

Savstarpēji salīdzinot kontakta kritērija sākotnējās vērtības (KK_S) ar iegūtām (rezultējošām) kontakta kritērija (KK_R) vērtībām, kas iegūtas pēc rotoru kontakta virsmu pārklāšanas ar TiN, tiek izveidota kontakta tipa koeficienta k_T sakarība:

$$k_T = \frac{KK_R}{KK_S} = \frac{RS_{m1}^R}{RS_{m1}^S} \cdot \frac{S_a^S}{S_a^R} \cdot \frac{H_{\mu}^R}{H_{\mu}^S} \quad (5.2.)$$

kur: Indeksi S, R raksturo sākotnējās un rezultējošās vērtības.

Jo šī KK vērtība lielāka, jo detaļu virskārtas deformācijas kļūst elastīgākas, līdz ar to kontakta tipa koeficientam ir jābūt lielākam par vienu ($k_T > 1$).

5.7. tabula

Kontakta tipa koeficienta k_T vērtības

Pārklājuma grupa	Koeficients	Vērtība
1. Grupa	k_{T1}	5,01
2. Grupa	k_{T2}	9,35
3. Grupa	k_{T3}	5,28

Analizējot aprēķina rezultātus (5.7. tabula), redzams, ka pārklājuma pielietošana, kas savā starpā atšķiras ar uzklāšanas parametriem, palielina kontakta kritērija KK vērtības un būtiski palielina koeficienta k_T vērtības. No tā izriet, ka pētāmā kompresora rotora kontakta virsmas pārklājumi uzlabo rotoru nodilumizturību.

Nodiluma ietekmes koeficients. Lai prognozētu izstrādājuma kalpošanas laika izmaiņas, veicam nodiluma prognozējamā lielumu salīdzinājumu. Nodiluma lielumu var izteikt ar sekojošu 5.3. sakarību [26].

$$E\{U_n\} \approx k_m \cdot K_R \cdot K_{F-M} \cdot \frac{q}{E} \cdot S_a \cdot \frac{L_b}{S_{m2}^a} \quad (5.3.)$$

kur: k_m – koeficients, kas atkarīgs no noguruma līknes parametriem, (N_o, m);

K_R – virsmas raupjuma parametru komplekss, ($R_a; S_{m1}$);

K_{F-M} – fiziski mehānisko parametru komplekss, ($E; \sigma$);

q – relatīvais spiediens uz kontaktējošām virsmām;

E – materiāla elastības modulis;

S_a – virsmas vidējā aritmētiskā novirze;

L_b – berzes ceļš;

S_{m2}^a – profila vidējais nelīdzenuma solis šķēlumā berzes pāru kustības virzienā aktīvai virsmai.

Savstarpējai nodiluma lieluma salīdzināšanai tiek izveidota nodiluma ietekmes koeficienta izteiksme (5.4.).

$$k_d = \frac{E\{U_n\}^S}{E\{U_n\}^R} = \frac{K_R^S}{K_R^R} \cdot \frac{S_a^S}{S_a^R} \quad (5.4.)$$

kur: $E\{U_n\}^S$ – nodiluma lielums kontakta virsmai bez nodilumizturīgā pārklājuma (sākotnējais);

$E\{U_n\}^R$ - nodiluma lielums kontakta virsmai ar TiN pārklājumu (rezultējošais);

Indeksi S, R raksturo sākotnējās un rezultējošās vērtības.

Jo materiālam ar nodilumizturīgo pārklājumu vērtība $E\{U_n\}$ mazāka, jo detaļu nodilums būs mazāks, līdz ar to nodiluma ietekmes koeficientam pēc sakarības 5.4. ir jābūt lielākam par vienu ($k_d > 1$)

5.8. tabula

Nodiluma ietekmes koeficienta k_d vērtības virsmām ar TiN pārklājumu

Koeficients	Vērtība
k_{d1}	1,31
k_{d2}	1,12
k_{d3}	1,06

Analizējot kontakta virsmu uzlabojumu efektivitāti pēc izstrādātās metodikas piedāvātajiem kritērijiem var secināt, ka rotoru kontakta virsmām ar TiN pārklājumiem koeficienta k_T un k_d vērtības ir >1 . Visi tehnoloģiskie uzlabojumi rotoru kontaktu virsmām ar TiN pārklājumiem izveido virsmu kontaktu elastīgāku, samazina nodiluma lielumu. No tā izriet, ka palielināsies izstrādājuma kalpošanas laiks.

5.6. Secinājumi

Analizējot eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru darba efektivitātes nodrošināšanas iespējas, tika veikta rotoru kontakta virsmu pārklāšanas iespēju analīze ar nodilumizturīgu TiN materiālu, kas ir ar augstākām mehāniskām īpašībām nekā pamatmateriālam. Eksperimentālos nolūkos izvirzītās hipotēzes pārbaudīšanai (vai TiN pārklājums uzlabo kontakta virsmas fizikāli mehāniskās īpašības, palielina nodilumizturību un kalpošanas laiku) tika veidoti paraugi un pārklāti ar nostiprinošiem pārklājumiem, izmantojot PVD metodi - katoda loka izlādes nogulsnešanas tehnoloģiju (*cathodic arc deposition*), kas ar fizikālo procesu palīdzību veido pārklājumu. Pārklājuma materiāla funkcionālās īpašības tiek veidotas atsevišķu atomu un molekulu līmenī.

Pēc uzdotajiem uzklāšanas parametriem (5.1. tabula) uz kontakta virsmas tika iegūts pārklājuma biezums robežās no 2,76 μm līdz 2,91 μm . Analizējot mehānisko īpašību izmaiņu analīzi tika secināts, ka šie kontaktu virsmu uzlabojumi palielina daudzkārtīgi rotoru virsmas mehāniskās īpašības, mikrocietība pieaug no 127 līdz 1302 kg/mm^2 , izturības robežspriegums - R_m izmainās no 415 līdz 540 MPa, kā arī uzklātais slānis ļoti minimāli izmaina pamatmateriāla īpašības, saglabājot pamatmateriālu stigrū.

Uzklājamā slāņa analīzes ietvaros tika noteikts berzes koeficients kontakta virsmai. Tika novērota tā palielināšanās (5.12. att.). Savukārt veicot kontakta virsmas piestrādes eksperimentus ir pārbaudīts, ka pēc kontaktu virsmas pārklāšanas ar nostiprinošiem pārklājumiem un veicot to piestrādi vai noslēdzošo apstrādi, kas rezultātā samazina lielos virsmu defektus, tiek samazināts berzes koeficients par 8...12%.

Saistībā ar neregulāras formas nelīdzenumiem, ko uzrāda topogrāfijas mērījumi, ir novērojama rotoru kontaktu virsmas raksturojošo parametru izmaiņas, piemēram, vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes ir palielinājusies no 0,413...0,539 μm .

Pēc rotoru materiālu pārklāšanas uz virsmas ir novērojami defekti, kas rada pārklājuma porainību. Vairāki autoru darbu pētījumos [5; 9] tiek norādīts, ka šie defekti ir mikropilīšu veidojumi, kas rodas TiN pārklājuma uzklāšanas procesa laikā, izmantojot katoda loka nogulsnešanu vakuuma vidē, vai arī ir nepietiekama substrāta temperatūras ietekmē, kas nav spējusi izkausēt pārklājamo materiālu. Salīdzinot savstarpēji visu trīs grupu pārklājumus tiek secināts, ka uzklāšana procesa mainīgais darba spiediens ļoti maz ietekmē virsmas nano reljefu. Uz visām kontakta virsmām ir sastopami uzklājamā materiāla defekti gan pilīšu, gan ieplaku veidā. Veicot mērījumus atkārtoti vieniem un tiem pašiem paraugiem pēc četrus mēnešu starplaika, netika konstatēta virsmas reljefa izmaiņa. Līdz ar to tiek secināts, ka pārklājums un uz tā radušies defekti ir noturīgi laikā.

Lai spriestu par darba izstrādes laikā veikto eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru rotoru kontakta virsmu uzlabojumiem, tika izstrādāta metodika, kas piedāvā divus kritērijus:

- 1) Kritērijs, kas balstīts uz rotoru virsmas kontakta tipu – kontakta tipa koeficients k_T (5.2.);
- 2) Kritērijs, kas ievēro nodiluma procesa norisi – nodiluma ietekmes koeficients k_d (5.4.).

Izvērtējot kontakta virsmu uzlabojumu efektivitāti pēc izstrādātās metodikas piedāvātajiem kritērijiem var secināt, ka rotoru kontakta virsmām ar TiN pārklājumiem koeficienta k_T un k_d vērtības ir >1 . No tā izriet, ka šajā kontaktā pastāv elastīgs kontakts, kā rezultātā virsmas nelīdzenumi deformējas elastīgi un atdalīšanās notiek noguruma iespaidā. Samazinoties nodiluma lielumam palielināsies izstrādājuma kalpošanas laiks. Līdz ar to šie tehnoloģiskie risinājumi ir atzīstami par labiem un ieviešami ražošanas procesos. Jāatzīmē kā šie izstrādātie apstrādes tehnoloģisko procesu izvērtēšanas kritēriji ir izmantojami ne tikai pārklājumu, bet arī dažādu citu tehnoloģisko procesu vai citu rezultātu efektivitātes novērtēšanai, kas saistīti ar nodiluma procesa izpēti.

DARBA SECINĀJUMI

Aizvien lielāku nozīmi mūsdienās dažādās rūpniecības nozarēs ieņem saspīstā gaisa izmantošana. Patērētāji vēlas lietot iekārtas, kas ir spējīgas darboties bez darbības atteikumiem ilgāku laika periodu. Mainoties darba videi un darba apstākļiem būtiski tiek palielināts vai samazināts kompresoru darba resurss. Promocijas darba pētījumos liela uzmanība tiek pievērsta tiem faktoriem, kas ietekmē kompresora darba efektivitāti.

Promocijas darbā „Skrūves tipa kompresoru kontaktvirsmu nodilumizturības palielināšanas izpēte” ir iegūti zemāk minētie rezultāti:

1. Pēc skrūves kompresoru konstrukciju un rotoru kontakta virsmu analīzes tiek secināts, ka skrūvveida rotoru ir galvenās kompresoru darbīgās daļas, kuras būtiski ietekmē kompresoru darbības efektīvumu.

2. Rotoru atteikumu izpētes rezultātā varam secināt, ka raksturīgākie atteikumi eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoriem ir saistīti ar ievērojamiem kontakta virsmas bojājumiem, kas palielina gaisa noplūdes, līdz ar to samazinās kompresora ražība un efektivitāte.

3. Rotoru un apstrādes instrumentu ģeometrisku formu matemātiskās modelēšanas ietvaros tika izveidoti rotoru profila likņu matemātiskās sakarības, dod iespēju veidot griezošā instrumenta profila modelēšanu, rotoru profila izgatavošanai vai profilēšanai.

4. Rotoru kontakta virsmas nodilumizturības palielināšanas tehnoloģisko risinājumu izpētes rezultātā tika secināts, ka racionālāk izmantot esošā rotora virsmu uzlabošanas tehnoloģiju ar nodilumizturīgu vienslāņa TiN pārklājumu, kas vienlaicīgi pie nelieliem nodilumiem atjauno sākotnējo profila formu.

5. Kontakta virsmu apstrādes tehnoloģisko procesu efektivitātes izvērtēšanas izstrādātā metodika piedāvā kontakta virsmas analizēt pēc diviem kritērijiem:

1) Kritērijs, kas balstīts uz rotoru virsmas kontakta tipu – k_T (5.2.);

2) Kritērijs, kas ievēro nodiluma procesa norisi – k_d (5.4.).

Pēc promocijas darba ietvaros veiktajiem pētījumiem, eksperimentiem var secināt, ka nodilumizturīgais TiN pārklājums uzlabo kontakta virsmas fizikāli mehāniskās īpašības, palielina nodilumizturību un kalpošanas laiku eļļas plūsmas skrūves tipa kompresoru kontakta virsmām. Šie tehnoloģiskie risinājumi ir rekomendējami ieviešanai ražošanas procesos. Līdz ar to var apgalvot ka promocijas darba izvirzītais mērķis ir sasniegts.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Ashby M.F., Jones D.R.H. Engineering Materials I. Third edition – Oksford: 2005. – 424 p.
2. Asthana R., Kumar A., Dahotre N. Materials science in manufacturing. – Elsevier: 2006. – 630 p.
3. Bloch H.P., Geitner F.K. Machinery Component Maintenance And Repair, Third edition, Volume 3 – Elsevier: 2005. – 630 p.
4. Brown R.N. Compressors Selection and Sizing. – USA: Elsevier, 2005. - 637 p.
5. Carvalho N.J.M., Zoestbergen E., Kooi B.J., De Hosson J.Th.M. Stress analysis and microstructure of PVD monolayer TiN and multilayer TiN/(Ti,Al)N coatings// Elsevier, Journal of Thin solid films, Volume 426 – 2003. - 179-189 p.
6. Guerrato D., Nouri J. M., Stosic N., Arcoumanis C. Flow and pressure characteristics within a screw compressor// Third International Conference on Optical and Laser Diagnostics, Journal of Physics: Series 85 – 2007.
7. Gao Tie-yu., Yang Dong-fang, Cao Feng, Jiao Jin-cheng. Temperature and thermodynamic deformation analysis on rotors of twin screw multiphase pump with high gas volume fractions// Journal of Zhejiang University-Science A Applied Physics & Engineering – 2011. – 720-730 p.
8. Hanlon I., Paul C. Compressor Handbook. – USA: McGraw-Hill, 2001. - 754 p.
9. Krella A., Czyzniewski A. Cavitation erosion resistance of nanocrystalline TiN coating deposited on stainless steel // Elsevier, Journal of Wear, Volume 265 - 2008. 963-970 p.
10. Kovacevic A. Boundary adaptation in grid generation for CFD analysis of screw compressors// International Journal for Numerical Methods in Engineering – 2005. - 401-426 p.
11. Kovacevic A., Stosic N., Smith I. Screw Compressors - Mathematical Modelling and Performance Calculation. – Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. - 144 p.
12. Kovacevic. A., Stosic N., Smith I.K. Three dimensional analysis of screw compressor performance// Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol. 3 – 2003. - No. 2. - 259-284 p.
13. Kovacevic A., Stosic N., and Smith I. K. The influence of rotor deflection upon screw compressor performance// Schraubencompressortagung – Dortmund. - 2002.
14. Loomis A.W. Compressed Air and Gas Data. – USA: Ingersoll-Rand Woodcliff Lake, New Jersey, 1980. – 804 p.
15. Seshaiyah N., Ghosh Subrata Kr., Sahoo Ranjit Kr., Sarangi Sunil Kr. Performance analysis of oil injected twin screw compressor // 18th national & 7th ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer conference – Guwahaiti India. - 2006. - 1261-1268 p.
16. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Engineering tribology. - UK: Butterworth Heinemann, 2001. - 769 p.
17. Stosic N. Identification of constraints in the optimal generation of screw compressor rotors by the pressure angle method// IMechE International Conference on Compressors and Their Systems – London. - 2005.
18. Stosic N., Kovacevic A., Mujic E., Smith I. K. Development of a rotor profile for silent screw compressor operation// International Conference Compressors and Their Systems – London: - 2007.
19. Stosic N., Mujic E., Kovacevic A., Smith I. K. Profiling of screw compressor rotors by use of direct digital simulation// International Compressor Engineering Conference proceedings - Purdue, 2008.

20. Stosic N., Smith I.K., Kovacevic A. Numerical investigation of heat transfer on screw compressors rotors// 8th Argentinian Congress on Computational Mechanics – Buenos Aires, Argentina. - 2005.
21. Stosic N., Smith I.K., Kovacevic. A. Opportunities for innovation with screw compressors// Journal of Process Mechanical Engineering Vol 217 – 2003. - 157-170 p.
22. Stosic N., Smith I.K., Kovacevic A. Optimisation of screw compressors// Journal of Applied Thermal Engineering – 2003. - 1177-1195 p.
23. Stosic N., Smith I. K., and Kovacevic A. Optimisation of screw compressors design// VIII European Congress on Fluid Machinery for the Oil, Gas and Petrochemical Industry proceedings - 2002.
24. Stosic N., Smith I. K., Kovacevic A., Mujic E. Geometry of screw compressor rotors and their tools// Journal of Zhejiang University - Science A (Applied Physics & Engineering). – 2011. - 310-326 p.
25. Stosic N., Smith I.K., Kovacevic. A., Venumadhav K. Retrofit 'N'rotors for efficient oil flooded screw compressors// International Conference on Compressor Engineering proceedings – 2000. – Purdue. – 917 p.
26. Rudzītis J. Virsmas kontaktmehānika. Slīdes virsmu diluma aprēķini, 3. daļa – Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2007. – 80 lpp.
27. Zviedrs A. Datorrealizācijas matemātiskās metodes. – Rīga: RTU, 1999. - 73 lpp
28. Вербицкая А.Г., Кирносов В.И. Определение механических свойств материалов. – Москва: Издательство стандартов, 1984б – 191 с.
29. Гусак А.А. Задачи и упражнения по высшей математике. – Минск: Издательство Вышэйшая школа, 1973. - 385 с.
30. Погодин-Алексеев Г.И., Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Металловедение. – Москва: Государственное издательство оборонной промышленности, 1956. - 427 с.
31. Рудзитис Я. Контактная механика поверхностей. Микротопография профиля шероховатости поверхности, Часть II – Рига: Рижский технический университет, 2007. – 217 с.
32. Сакун И.А. Винтовые компрессоры. – Ленинград: Машиностроение, 1970. - 400 с.
33. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров. Проектирование металлорежущих инструментов. – Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. - 952 с.
34. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А., Гервасьев М.А., Гредитор М.А., Крылова К.М., Кубачек В.В., Мирмельштейн В.А. Марочник сталей и сплавов. – Москва: Машиностроение, 1989. – 639 с.
35. Internets. – <http://www.ghhrand.com/home.aspx1>