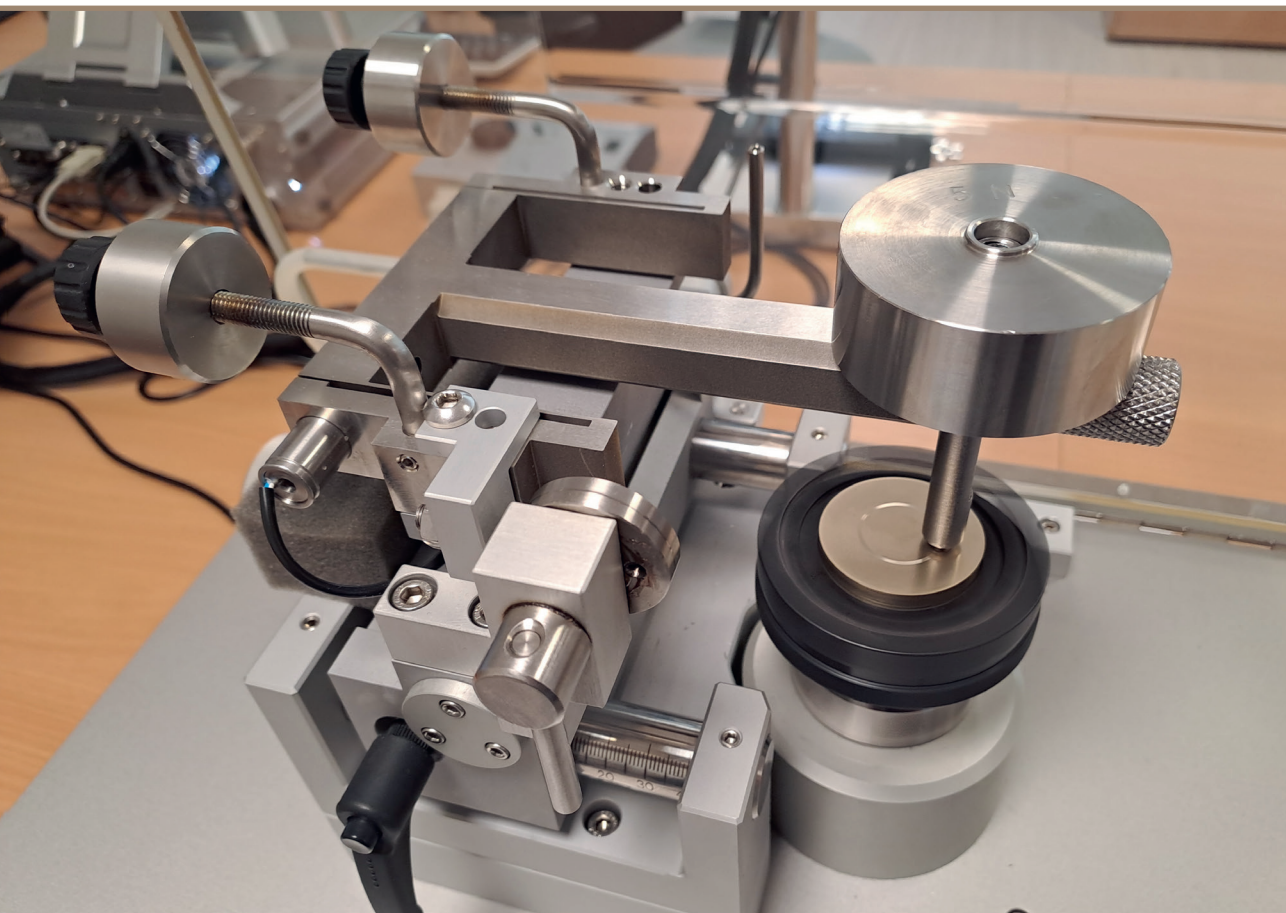


**Guntis Sprinģis**

## **SLĪDES BERZES PĀRA DETAĻU NODILUMA ANALĪZE UN NOTEIKŠANA**

Promocijas darbs



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Mehānikas un mašīnbūves institūts

**Guntis Sprīngis**

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika” doktorants

# **SLĪDES BERZES PĀRA DETALU NODILUMA ANALĪZE UN NOTEIKŠANA**

**Promocijas darbs**

Nozare: Mašīnbūve un mehānika

Zinātniskie vadītāji

profesore *Dr.sc.ing.*  
IRĪNA BOIKO

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

JĀNIS RUDZĪTIS

Rīga 2023

# SADARBĪBA

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” ietvaros.



## PATEICĪBAS VĀRDI

Darba autors izsaka pateicību promocijas darba zinātniskajiem vadītājiem: profesorei Dr.sc.ing. Irīnai Boiko par milzīgo atsaucību un konsultēšanu promocijas darba izstrādes gaitā; profesoram Dr.habil.sc.ing. Jānim Rudzītim par iesaisti fundamentālajā triboloģijas zinātnē un pētījumos.

Paldies profesoram Dr.sc.ing. Oskaram Liniņam par vērtīgajām konsultācijām triboloģijas jomā un ieteikumiem darba struktūras pilnveidē.

Paldies kolēģiem - Armandam Leitānam par palīdzību eksperimentālo pētījumu organizēšanā; Jānim Lungevičam par palīdzību virsmas tekstūras mērījumu veikšanā un Ernestam Jansonam par diskusijām berzes un nodiluma jautājumos.

Paldies visiem Mašīnbūves un mehatronikas katedras kolēģiem par atbalstu un palīdzību dažādu tehnisku jautājumu risināšanā.

Paldies RTU Doktorantu studiju nodaļai, īpaši Kristai Papēdei un Alīnai Galkinai, par konsultācijām un palīdzību dažādu jautājumu risināšanā, saistībā ar projekta “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” prasību ievērošanu.

Sirsnīgs paldies manai ģimenei par atbalstu un motivāciju promocijas darba izstrādes laikā un īpašu uzmundrināšanu darba izstrādes pēdējā posmā.

# ANOTĀCIJA

Promocijas darbā slīdes berzes pāra nodiluma noteikšanai izstrādāts jauns nodiluma aprēķina un analīzes matemātiskais modelis, kas ietver virsmas tekstūras (3D) parametrus, deformācijas veidu un sprieguma parametrus nogurumnodiluma gadījumā. Tam nolūkam sintezēts jauns berzes detaļu virsmu kontakta modelis, kas balstās uz normālo gadījuma lauka teoriju. Izstrādāta jauna berzes pāra kalpošanas laika aprēķinu metodika, kas balstās uz materiālu noguruma teoriju berzes un dilšanas procesā un ietver standartizētu parametru noteikšanu.

Darba gaitā veikts esošo pētījumu apskats un definēti pētījuma mērķi un uzdevumi. Veikta berzes pāra jaunā nodiluma matemātiskā modeļa aprēķinu rezultātu aprobācija. Eksperimentālo pētījumu nolūkā uzprojektēta un izgatavota dilšanas procesa dinamiskiem pētījumiem paredzēta iekārta. No iegūto eksperimentālo rezultātu analīzes nodefinēta nepieciešamība pilnveidot nodiluma aprēķina modeli ar virsmas tekstūras (3D) parametru pievienošanu berzes virsmu kontakta modeli, kā arī nepieciešamība precizēt materiāla izturības robežas aprakstošo parametru.

Analizēta eksperimentāli iegūto rezultātu nodiluma vērtību korelācija ar analītiskajiem aprēķiniem.

Sintezētais berzes virsmas nodiluma aprēķina modelis nodrošina iespēju analītiski noteikt nodiluma vērtību, kā arī analizēt un optimizēt nodilumu ietekmējošos parametrus mehānisma projektēšanas procesā.

Promocijas darbs ir latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, rezultātus un secinājumus, rekomendācijas tālākai izpētei, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 64 attēlus, 18 tabulas. Darba apjoms - 95 lapaspuses teksta. Literatūras saraksts sastāv no 93 informācijas avotiem.

# ABSTRACT

In this thesis, a new mathematical model for wear calculation and analysis is developed to determine the wear of sliding friction pairs, including surface texture (3D) parameters, deformation mode and stress parameters in the case of fatigue wear. For this purpose, a new contact model of the friction surfaces based on the normal random field theory has been synthesised. A new methodology for calculating the lifetime of a friction pair has been developed, based on the fatigue theory of materials in friction and wear and including the determination of standardised parameters.

The work includes a review of existing research and defines the objectives of the study. A validation of the results of the new mathematical model of the wear of friction pairs was carried out. For the experimental studies, a machine for dynamic studies of the wear process has been designed and built. From the analysis of the obtained experimental results, the need to improve the wear model with the addition of surface texture (3D) parameters in the friction surface contact model, as well as the need to specify the parameter describing the strength limit of the material, was defined.

The correlation of the experimental wear values with the analytical calculations was analysed.

The synthesised friction surface wear calculation model allows the wear value to be determined analytically and the wear parameters to be analysed and optimised during the design process.

The doctoral thesis is in Latvian, contains an introduction, 5 chapters, results and conclusion, recommendations for further research, a list of references, 2 appendices, 64 figures, 18 tables. The volume of the doctoral thesis is 95 pages. The list of references consists of 93 sources.

# SATURA RĀDĪTĀJS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IEVADS.....                                                                                                                       | 7  |
| IZMANTOTO APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....                                                                                                | 12 |
| 1. LITERATŪRAS APSKATS.....                                                                                                       | 13 |
| 1.1. Uz Dž.F.Arčarda vienādojuma balstītās nodiluma aprēķina pieejas .....                                                        | 13 |
| 1.2. Jauktie nodiluma aprēķina modeļi .....                                                                                       | 22 |
| 1.3. Nodiluma lieluma noteikšana veicot eksperimentālos pētījumus.....                                                            | 24 |
| 1.4. A.Proņikova et.al nodiluma aprēķinu modelis .....                                                                            | 26 |
| 1.5. I.Kraģeļska et.al. nodiluma aprēķina modelis .....                                                                           | 27 |
| 1.6. J.Rudziša et.al. nodiluma aprēķina modelis .....                                                                             | 29 |
| 1.7. Nodiluma noteikšanas pieeju apkopojums.....                                                                                  | 30 |
| 1.8. Secinājumi .....                                                                                                             | 33 |
| 2. BERZES VIRSMAS APRAKSTS UN DILŠANAS PROCESA ANALĪZES<br>UN OPTIMIZĀCIJAS PAMATPRINCIPI .....                                   | 34 |
| 2.1. Berzes virsmas apraksts, kontakta modelis un tā izejas pamatparametri.....                                                   | 34 |
| 2.2. Nodiluma aprēķina matemātiskais modelis.....                                                                                 | 35 |
| 2.3. Detaļu virskārtas sagraušanas modelis.....                                                                                   | 36 |
| 2.4. Dilšanas procesa daļiņu tilpuma aprēķins .....                                                                               | 39 |
| 2.5. Deformēto izciļņu skaita noteikšana .....                                                                                    | 40 |
| 2.6. Nodiluma aprēķina pamatsakarības .....                                                                                       | 44 |
| 2.7. Parametriskā optimizācija .....                                                                                              | 46 |
| 2.8. Secinājumi .....                                                                                                             | 53 |
| 3. PIRMĀ POSMA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI.....                                                                                      | 54 |
| 3.1. Materiāla izvēle un paraugu sagatavošana .....                                                                               | 54 |
| 3.2. Izmantotās iekārtas, mērinstrumenti un programmatūra.....                                                                    | 55 |
| 3.3. Eksperimentu darba secība un mērījumu veikšana.....                                                                          | 57 |
| 3.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze .....                                                         | 58 |
| 3.5. Secinājumi .....                                                                                                             | 63 |
| 4. OTRĀ POSMA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI .....                                                                                      | 64 |
| 4.1. Paraugu materiāla izvēle un sagatavošana eksperimentālajiem pētījumiem.....                                                  | 64 |
| 4.2. Izmantotās iekārtas, mērinstrumenti un datu apstrādes programmatūra .....                                                    | 65 |
| 4.3. Pētījumu darba secība, mērījumu veikšana un eksperimenta gaita .....                                                         | 68 |
| 4.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim<br>tērauds (102Cr6)-bronzā (CW456K) ..... | 70 |
| 4.5. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim<br>tērauds (102Cr6)-bronzā (CW307G) ..... | 77 |
| 4.6. Secinājumi .....                                                                                                             | 81 |
| 5. SLĪDES BERZES PĀRA NODILUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKA .....                                                                       | 83 |
| PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI .....                                                                                 | 86 |
| REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI .....                                                                                              | 88 |
| IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI .....                                                                                               | 89 |
| PIELIKUMI .....                                                                                                                   | 96 |

## IEVADS

Mūsdienās, lai panāktu ilgāku konkrētā izstrādājuma kalpošanas laiku, mašīnbūves un citu nozaru izstrādājumu detaļu izgatavošanas procesā izmanto gan jaunākās tehnoloģijas, gan jaunas materiālu kombinācijas. Ilgtspējīgas ekonomikas attīstība nav iedomājama bez pārejas uz efektīvu resursu izmantošanu, ko var panākt arī ar izstrādājumu kalpošanas laika palielināšanu – droša un ilgstoša izstrādājumu izmantošana ļaus efektīvāk, racionālāk pārvaldīt dabas un ražošanas resursus, kā arī tiešā veidā ļaus sasniegt arī citus ar ilgtspējīgu attīstību saistītus mērķus, t. sk. nodrošināt drošu vidi, samazināt vides piesārņojumu, enerģijas un citu resursu patēriņu.

Lai palielinātu kalpošanas laiku izstrādājumiem, kas ietver berzes pārus, kā arī atjaunotu berzes pāru ekspluatācijas laikā nodilušās virsmas, tiek izmantotas gan tradicionālās, gan arī modernās tehnoloģijas, piemēram, virsmu apstrāde un nocietināšana, izmantojot lāzera un elektronstaru apstrādi, dažādu veidu virsmu uzkausēšanas metodes, jonu-plazmas apstrāde vakuumā utt. [60, 61]. Paralēli detaļu virsmu ekspluatācijas īpašību uzlabošanas risinājumiem ir jāspēj arī prognozēt šo detaļu kalpošanas laiku, lai optimizētu ražošanas procesu un izgatavošanas tehnoloģiskajā procesā laikus ieviestu nepieciešamās korekcijas. Viens no galvenajiem kritērijiem, kas nosaka detaļu turpmāko ekspluatāciju, ir nodilums. Lai arī patlaban ir zināmi vairāki paņēmieni un aprēķinu metodikas, kas ļauj noteikt nodilumu analītiski, joprojām populāra ir pieeja, kurā nodiluma prognozēšana ir balstīta ilgstošos eksperimentos, kas ir gan laikietilpīgs, gan arī pietiekami dārgs process. Tas saistīts ar to, ka analītiskajos aprēķinos būtu nepieciešams ņemt vērā visus dilšanas procesu ietekmējošos faktorus, kas saistībā ar dilšanas procesa komplekso dabu vairumā gadījumu netiek darīts.

Lai nodrošinātu nodiluma analītisko aprēķina vērtību lielāku sakritību ar faktiskajām, ir nepieciešams definēt berzes virsmu kontakta nosacījumus, aprakstīt berzes procesa norisi, kā arī iekļaut svarīgākos nodilumu ietekmējošos parametrus, kas ir pietiekami viegli nosakāmi, bet maksimāli precīzi apraksta faktisko dilšanas procesu.

Berzes pāru kalpošanas laika prognozēšana analītiski, kas ir derīga praktisku inženieruzdevumu risināšanai un ietver parametrus, kas ir nosakāmi ar mūsdienu mērīšanas metodēm, neveicot ilglaicīgus un resursietilpīgus eksperimentus, un kas ne tikai paātrina izstrādājumu projektēšanas procesu, bet arī sniedz ievērojamu ieguldījumu ilgtspējīgā attīstībā.

Līdz ar to promocijas darba tēma ir aktuāla gan zinātnei, gan tautsaimniecībai, jo saistīta ar zināmu berzes pāru kalpošanas laika prognozēšanas metodiku trūkumu novēršanu, kas ievērojami ietekmēs pētījumu un projektēšanas efektivitāti.

**Hipotēze.** Virsmas tekstūras (3D) parametru ieviešana, kā arī atsevišķu materiāla noguruma parametru vērtību precizēšana slīdes berzes pāru nodiluma aprēķinā ļaus palielināt aprēķina precizitāti, sintezējot jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli un izstrādājot berzes pāru kalpošanas laika prognozēšanas metodiku.

Promocijas darba “SLĪDES BERZES PĀRA DETAĻU NODILUMA ANALĪZE UN NOTEIKŠANA” mērķis ir sintezēt jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli berzes pāriem un izstrādāt metodiku berzes pāru kalpošanas laika prognozēšanai.

## **Promocijas darbā uzstādītā mērķa sasniegšanai ir izvirzīti vairāki uzdevumi:**

- 1) Veikt informācijas avotu izpēti un analīzi.
- 2) Veikt eksperimentālo priekšizpēti.
- 3) Izstrādāt berzes virsmu kontakta modeli, kas ietver berzes virsmas tekstūras (3D) parametrus.
- 4) Sintezēt jaunu berzes pāra nodiluma aprēķina matemātisko modeli.
- 5) Izstrādāt jaunu berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodiku.
- 6) Veikt jaunās berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodikas aprobāciju.

Lai sasniegtu darba mērķi un atrisinātu uzdevumus, izmantotas kvantitatīvās un kvalitatīvās pētījumu metodes, kā arī tālāk tekstā uzskaitītais eksperimentu veikšanas tehniskais nodrošinājums.

Teorētiskajiem aprēķiniem tika izmantotas elastības teorijas, virsmas kontaktteorijas un virsmas materiāla nogurumteorijas sakarības, varbūtības teorijas atsevišķa sadaļa (gadījuma lauks), kā arī normālais sadalījuma likums.

Nepieciešamo virsmas tekstūras (3D) parametru noteikšanai otrā posma eksperimentālajos pētījumos tika izmantota 3D kontūru un virsmas tekstūras mēršanas sistēma *Mitutoyo FORMTRACER Avant 3D* (*Mitutoyo*, Japāna). Pirmā posma eksperimentālajos pētījumos virsmas raupjuma profila parametru mērījumiem tika izmantots *Taylor Hobson SURTRONIC 25* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija) portatīvais profilometrs. Izdilušās berzes trases šķēsgriezums tika noteikts, lietojot *Mitutoyo SURFTEST SJ-500* (*Mitutoyo*, Japāna) profilometru. Lodītes noslīpētās plaknes laukuma diametrs pirms/pēc eksperimenta tika mērīts, izmantojot digitālo mikroskopu *Hirox* (*Hirox*, Japāna).

Eksperimentu veikšanai slīdes berzes pārim tika izmantots *CSM* tribometrs (*CSM Tribometer*, Šveice) un pašizgatavota berzes un dilšanas procesu pētīšanas iekārta kombinācijā ar elektronisko dinamometru *PCE FG-50* (*PCE Instruments UK Ltd*, Lielbritānija) un apgriezienu mērierīci *ALLURIS SMF-50* (*Alluris*, Vācija). Pirmā posma eksperimentālajos pētījumos piespiedējruļļa garums tika kontrolēts ar digitālo mikrometru *Mitutoyo* (*Mitutoyo*, Japāna) ar precizitāti 0,001 mm.

Eksperimenta datu (berzes koeficienta, dilšanas laika/distances u. c. parametru) uzskaitē, apstrādei un analīzei tika izmantota *InstrumX* programmatūra (*CSM instruments*, Šveice). Eksperimentā iegūto mērījumu vērtību turpmākai apstrādei un analīzei tika lietotas *TalyMap Gold* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija), *MCube Map Ultimate 8*, *Microsoft Excel*, *MathCad* datorprogrammas. Rezultātu attēlošana nodrošināta grafiku, attēlu un tabulu veidā.

## **Darba zinātniskā novitāte:**

1. Jauns berzes virsmu kontakta modelis, kas ietver berzes virsmas tekstūras (3D) parametrus.
2. Jauns nodiluma aprēķina matemātiskais modelis, kas sintezēts uz jauna berzes virsmas modeļa bāzes un ņem vērā materiāla deformācijas parametrus.
3. Jauna nodiluma prognozēšanas metodika, kas ļauj noteikt berzes pāra kalpošanas laiku, kā arī analizēt un sintezēt optimālo parametru vērtības maksimālā kalpošanas laika nodrošināšanai.

## **Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes:**

1. Sintezēts jauns berzes pāra nodiluma prognozēšanas analītisks modelis, bāzēts izstrādātajā berzes virsmu kontakta modelī, kas ietver berzes virsmas tekstūras (3D) parametrus, nodrošinot pilnīgāku virsmas aprakstu, kas ir būtiski nodiluma aprēķinam un nodrošina precīzāku aprēķinu, salīdzinot ar iepriekš zināmajiem analītiskajiem modeļiem.
2. Jauna slīdes berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodika, kas nodrošina precīzāku prognozi, salīdzinot ar iepriekš zināmajām metodikām.
3. Eksperimentālo pētījumu rezultāti, kas apstiprina izstrādātā berzes pāra nodiluma prognozēšanas analītiska modeļa un slīdes berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodikas lietojamību inženieruzdevumu aprēķiniem.

## **Praktiskā nozīmība:**

Promocijas darba rezultātus var izmantot gan pētniecībā, gan tautsaimniecībā. Pētot nodilumu, berzes pāriem būtu ieteicams izmantot promocijas darba gaitā izstrādāto berzes virsmu kontakta modeli, nodiluma aprēķina modeli un uz tā pamata izstrādāto berzes pāra nodiluma prognozēšanas metodiku, jo pirmo reizi attiecīgajos modeļos un metodikā tika integrēti tekstūras (3D) parametri, kas (par ko liecina vairāki zināmi pētījumi [44–52, 54–58, 90]) pilnīgāk un precīzāk apraksta detaļu virsmas, savukārt nodiluma aprēķina modelis ietver deformācijas veida un spriegumu parametrus. Promocijas darba rezultāti liecina, ka šī pieeja nodrošina precīzāku berzes pāra kalpošanas laika prognozi, salīdzinot ar līdz šim zināmajām pieejām, turklāt, salīdzinot ar iepriekš zināmajām nodiluma aprēķinu metodikām, šajā darbā izstrādātā metodika ietver viegli nosakāmus standartizētus raksturlielumus un materiāla īpašības.

Promocijas darbā izstrādātā berzes pāra jaunā nodiluma prognozēšanas metodika ļauj prognozēt berzes pāru salāgojuma kalpošanas laiku analītiski, izslēdzot nepieciešamību veikt laikietilpīgus un darbietilpīgus eksperimentus, kas ir aktuāli ne tikai pētniecībā, bet arī rūpniecībā. Metodika tika izmantota SIA “Naco” darbu izpildei līgumprojektā Nr. 1/22.05.2013-3 “Nanostrukturēto pārklājumu nodiluma aprēķināšanas metodikas izpēte, izmantojot pārklājuma plastiskuma un elastības raksturlielumus”.

Promocijas darba rezultātu nozīmību atzina arī Mašīnbūves un metālapstrādes rūpniecības asociācija (MASOC), izstrādātā jauna nodiluma aprēķina metodika ievietota MASOC interneta vietnē (sadaļā, kas ir pieejama MASOC biedriem), līdz ar to tā ir pieejama vairāk nekā 160 Latvijas attiecīgās nozares uzņēmumiem – MASOC biedriem. Promocijas darba galvenie rezultāti ir aprobēti arī vairākās starptautiskās zinātniskās konferencēs un publicēti zinātniskos izdevumos.

## **Darba aprobācija:**

### **Starptautiskās zinātniskās konferences (norādītas būtiskākās):**

1. Springis G., Boiko I. Studies of experimental results and analytical calculations of wear of friction pair "steel-anti-friction material". 64<sup>th</sup> International Scientific Conference of Riga Technical University, *Mechanical engineering technology and heat engineering*, 2023. gada 12. oktobris, Rīga, Latvija. **Ar nopublicētu tēzi.**

2. Springis G., Boiko I. Comparison of Experimental and Theoretical Wear Studies of Sliding Friction Pairs of Metallic Surfaces. Riga Technical University 61<sup>st</sup> International Scientific Conference *Mechanical Engineering Technology and Heat Engineering*, 2020.gada 14.oktobris, Rīga, Latvija. **Ar npublicētu tēzi.**
3. Springis G., Rudzitis J., Gerins E., Bulaha N. Theoretical Approach of Wear for Slide-Friction Pairs. 12<sup>th</sup> International Conference "Mechatronic Systems and Materials Intelligent Technical Systems", 2016.gada 3.-8. jūlijs. Bijalstoka, Polija. **Ar npublicētu tēzi.**
4. Springis G., Rudzitis J., Avisane A., Kumermanis M., Semjonovs J., Leitans A. Wear problems of slide-friction pairs. The 9-th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM 2013), 2013.gada 1.- 3.jūlijs, Viļna, Lietuva. **Ar npublicētu tēzi.**
5. Springis G., Rudzitis J., Avisane A., Kumermanis M. Wear Calculation Possibility of Slide-Friction Pair "Shaft-Plain Bearing" for Four-Stroke Engines". 3<sup>rd</sup> International Advances In Applied Physics & Materials Science Congress. Antalya, Turkey, AIP Conference Proceedings, 24-28 April 2013. **Ar npublicētu tēzi.**
6. Springis G., Rudzitis J. Wear calculation models for slide friction pairs, Riga Technical University 53<sup>rd</sup> International Scientific Conference dedicated to the 150<sup>th</sup> anniversary and The 1<sup>st</sup> Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute/RTU Alumni, 2012.gada 11.-12.oktobris, Rīga, Latvija. **Ar npublicētu tēzi.**

#### **Publikācijas zinātniskajos žurnālos (SCOPUS):**

1. Springis G., Boiko I., Linins O. Calculation of Wear of Metallic Surfaces Using Material's Fatigue Model and 3D Texture Parameters. *Tribology in Industry*, Vol. 45, 2023, pages 729-741. Pieejams: doi: 10.24874/ti.1581.11.23.12.
2. Springis G., Rudzitis J., Avisane A., Leitans A. Wear Calculation For Sliding Friction Pairs. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 2, 2014, pages 41.-54. ISSN 2255-8896. Pieejams: doi: 10.2478/lpts-2014-0012.

#### **Raksts pilna teksta konferenču rakstu krājumā/žurnālā (SCOPUS):**

1. Springis G., Boiko I., Kononova O. Optimisation of the parameters included in the wear analysis model to increase the service life of the friction pair. 23rd International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": Proceedings. Vol.x, Latvia, Jelgava, 22-24 May, **2024**, 6 pages. (*Iesniegts*).
2. Springis G., Rudzitis J., Lungevics J., Berzins K. Wear Calculation Approach for Sliding - Friction Pairs. *Journal of Physics: Conf. Series* 843 (2017) 012072. 2017, pages 1-8. ISSN 1742-6588. Pieejams: doi: 10.1088/1742-6596/843/1/012072.
3. Springis G., Rudzitis J., Gerins E., Bulaha N. Theoretical Approach of Wear for Slide-Friction Pairs. *Trans Tech Publications*, 2017, pages 202 - 211. ISSN 1662-9779. Pieejams: doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.260.202>.
4. Springis G., Rudzitis J., Gerins E., Leitans A. Rough Surface Peak Influence on the Wear Process of Sliding-Friction Pairs. 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": Proceedings. Vol.15, Latvia, Jelgava, 25-27 May, 2016, pages 1430-1436. ISSN 1691-3043. Pieejams: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2016/Papers/N283.pdf>.
5. Springis G., Rudzitis J., Avisane A., Kumermanis M., Semjonovs J., Leitans A. Wear Problems of Slide-Friction Pair. *Trans Tech Publications*, Switzerland, *Solid State*

*Phenomena*, Vol. (220-221), 2015, pages 361-366. ISSN 1662-9779. Pieejams: doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.361>.

6. Linins O., Leitans A., Springis G., Rudzitis J. Determining the Number of Peaks of Rough Surfaces Necessary for Wear Calculation”, Trans Tech Publications, Switzerland, *Key Engineering Materials*, Vol. 604, 2014, pages 59-62. ISSN 1013-9826. Pieejams: doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.604.59>.

### **Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts:**

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 64 attēli, 18 tabulas, divi pielikumi, kopā 95 lappuses, neieskaitot pielikumus.

Literatūras sarakstā ir 93 nosaukumi.

## IZMANTOTO APZĪMĒJUMU SARAKSTS\*

$Sq$ – vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes;  
 $Sa$ – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes;  
 $RSm_1$ – solis perpendikulāri apstrādes virzienam;  
 $RSm_2$ – solis apstrādes virzienā;  
 $Str$ – virsmas anizotropijas koeficients;  
 $V_\Sigma$ – deformēto virsmas izciļņu tilpums pa visu berzes virsmu;  
 $N_{cf}$ – faktiskais ciklu skaits, kuram tiek pakļauti virsmas izciļņi berzes procesā;  
 $N_c$ – ciklu skaits, kas noved pie virsmas izciļņu sagraušanas;  
 $L_b$ – berzes ceļa garums;  
 $RSm_2^a$  – virsmas raupjuma vidējais solis virsmai, kas veicina otras virsmas dilšanu;  
 $N_0$ – materiāla izturības ciklu skaits pie asimetriskas slodzes;  
 $t_\sigma$ – bezdimensionāla (bezizmēra) spriegumu attiecība;  
 $m$  – materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs;  
 $\sigma_0$ – materiāla ilgizturības spriegumu robežvērtība;  
 $\sigma_a$ – sprieguma amplitūda;  
 $P_i$ – spēks, kas darbojas uz vienu  $i$ -to izcilni;  
 $a_i$  – lielā elipses pusass;  
 $b_i$  – mazā elipses pusass;  
 $\alpha_t$ – nelīdzenuma virsotnes deformācija;  
 $H_t$ – mikronelīdzenuma vidējais liekums;  
 $\Theta$ – materiāla elastības rādītājs;  
 $K(e)$  – 1. kārtas eliptiskais integrālis;  
 $E(e)$  – 2. kārtas eliptiskais integrālis;  
 $\mu$ – Puasona koeficients;  
 $h_0$  – paraboloīda segmenta augstums mērīts no virsotnes (atdalītās daļiņas biezums);  
 $K_i$  – raupjuma  $i$ -tā izciļņa izliekums;  
 $k_1$  un  $k_2$ – galvenie  $i$ -tā izciļņa izliekumi pa savstarpēji perpendikulāriem virzieniem ( $k_1 > k_2$ );  
 $h_{izc.}$ – izciļņa augstums,  
 $u$ – deformācijas līmenis;  
 $h_{atd.}$ – dilšanas rezultātā atdalītās daļiņas biezums;  
 $\gamma$  – relatīvais šķēluma agstums normēts ar  $Sq$ ;  
 $\zeta_v$  – normētais negludumu augstums;  
 $k_q$ – koeficients, kas atkarīgs no virsmas anizotropijas parametra  $Str$ ;  
 $E$ – dilstošās detaļas materiāla elastības modulis;  
 $q$ – slodze;  
 $V_i$ – viena  $i$ -tā izciļņa atdalītā tilpuma vidējā vērtība;  
 $N_\gamma$  – berzes rezultātā deformēto izciļņu skaits;  
 $Sds$ – raupjas virsmas izciļņu skaits.

\*Apzīmējumi ir norādīti sākot ar 2.nodaļu.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

Arvien vairāk attīstoties dažādām detaļu izgatavošanas tehnoloģijām un pielietojamo materiālu klāstam, īpaši aktuāls vienmēr ir bijis jautājums par dažādu izstrādājumu kalpošanas laiku, tā prognozēšanu un faktoriem, kas to ietekmē. Laika gaitā tika izstrādāti vairāki diluma aprēķina modeļi, ar kuru palīdzību iespējams aptuveni prognozēt konkrēta salāgojumu kalpošanas laiku. Sakarā ar to, ka dilšanas process ir daudzveidīgs, to ietekmē daudzi parametri: virskārtas izciļņu ģeometrija (raupjums, viļņainība, formas novirze utt.); fizikāli mehāniskās virskārtas stāvoklis; detaļu materiāls; dilšanas temperatūra; dilšanas režīms utt. Visus šos faktorus, kas darbojas šajā procesā, analītiski ņemt vērā nav iespējams, tāpēc dilšanas aprēķini tiek attīstīti vairākos virzienos, kas ņem vērā ietekmējošo lielumu kompleksus.

## 1.1. Dž. F. Arčarda vienādojumā balstītās nodiluma aprēķina pieejas:

Vienu no populārākajām nodiluma aprēķina teorijām izstrādāja britu zinātnieks Dž.F.Arčards (*John F.Archard*). Šīs teorijas pamatā ir apgalvojums, ka būtiskākie parametri, kas ietekmē nodilumu ir saistīti ar slodzi, materiāla cietību un slīdēšanas distanci, tādējādi nodilušā materiāla tilpums, kas atdalās no virsmas, tiek noteikts pēc sekojošas izteiksmes [1]:

$$W = k \cdot \frac{F \cdot l}{H}. \quad (1.1.)$$

kur  $F$  – slodze, kas darbojas uz kontaktvirsmu;

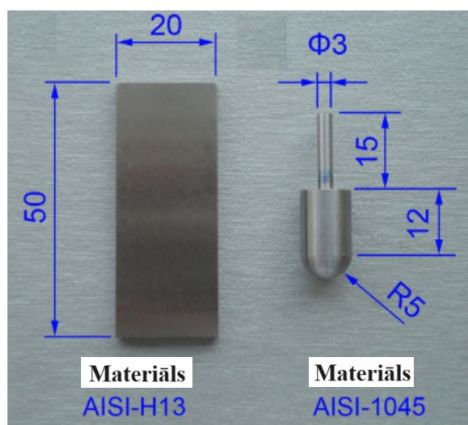
$l$  - detaļas slīdēšanas distance;

$H$  – materiāla cietība;

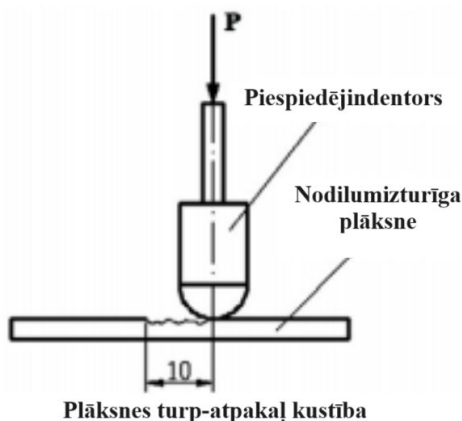
$k$  – bezizmēra nodiluma koeficients.

Veicot literatūras analīzi [1,2,3,5,6,7,10,12,26,27,28,30,33,40], tika secināts, ka Dž.F.Arčarda nodiluma aprēķina 1.1. vienādojums, atsevišķos gadījumos to nedaudz modificējot, pielāgojot atbilstoši virsmas ģeometrijai un materiāliem, joprojām tiek plaši lietots.

*Xu Wujiao et al.* [1] pētīja karstās kalšanas presformas nodiluma mehānismu un, pilnveidojot 1.1. vienādojumu, piedāvāja nodiluma aprēķina sakarības, lai precīzāk prognozētu presformas nodilumu un lietotu presformas ģeometrijas optimizācijas metodi ar mērķi pagarināt presformas kalpošanas laiku. Par piemēru izmantojot riteņa rumbas kalšanas procesā izmantoto serdeni, tika pētīts nodiluma mehānisms, veicot novērtējumu ar SEM tehnoloģijām. Veicot eksperimentālos pētījumus izvēlētajiem materiāliem (testa plāksne - AISI-H13 tērauds, indentors - AISI-1045 tērauds) (1.1.att.), raksta autors konstatēja, ka uz nodilušās virsmas pastāv trīs konkurējoši nodiluma mehānismi, proti, adhezīvais, abrazīvais un oksidācijas nodilums.



a)



b)

1.1. att. Eksperimentālo pētījumu paraugi (a) un eksperimenta shēma (b):

a - plāksne, b - piespiedējindentors [1].

Autors ierosina, ka summārais nodilums sastāv no trim iepriekšminētajiem nodiluma veidiem:

$$w_{total} = \lambda_{adhesive} \cdot w_{adhesive} + \lambda_{abrasive} \cdot w_{abrasive} + \lambda_{oxidation} \cdot w_{oxidation} \quad (1.2.)$$

kur  $w_{total}$  - virsmas summārais nodilums;

$w_{adhesive}$ ,  $w_{abrasive}$  un  $w_{oxidation}$  - adhēzijas, abrazīvais un oksidācijas izraisītais nodilums;

$\lambda_{adhesive}$ ,  $\lambda_{abrasive}$  un  $\lambda_{oxidation}$  - adhēzijas, abrazīvā un oksidācijas izraisītā nodiluma svara koeficients.

Turpinājumā raksta autors piedāvā pilnveidot nodiluma aprēķina vienādojumus, pielāgojot tos konkrētam nodiluma veidam. Pēc autora veiktajām modifikācijām, adhēzijas nodilums (1.2.att.) tiek noteikts sekojoši:

$$w_{adhesive} = \int_0^t k \cdot \frac{P \cdot V}{H(T)} dt. \quad (1.3.)$$

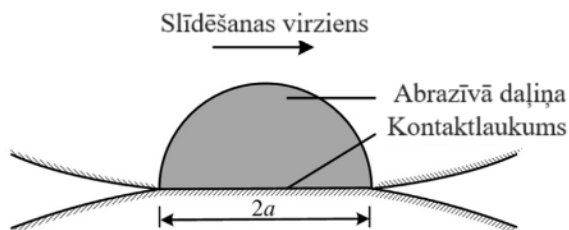
kur  $k$  – bezizmēra nodiluma koeficients;

$P$  - spiediens uz kontakta laukumu;

$V$  - slīdēšanas ātrums;

$H(T)$  - materiāla cietība pie temperatūras  $T$ ;

$t$  - slīdēšanas laiks.

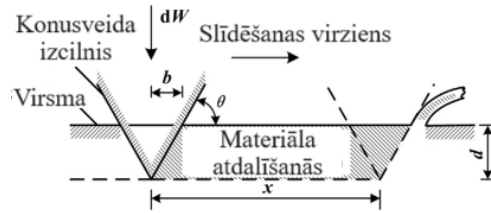


1.2. att. Adhēzijas nodiluma modeļa shēma [1].

Abrazīvais nodilums (1.3.att.):

$$w_{abrasive} = \int_0^l \frac{2 \cdot \tan \theta \cdot P \cdot V}{\pi} \cdot \frac{P \cdot V}{H(T)} dt. \quad (1.4.)$$

kur  $\theta$  norāda konusveida izciļņa saskares leņķi ar kontaktējošo virsmu.



1.3. att. Abrazīvā nodiluma modeļa shēma [1].

Oksidācijas izraisītais nodilums (1.4. att.):

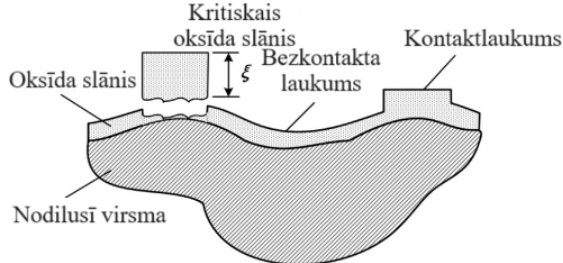
$$w_{oxidation} = \int_0^l \frac{P \cdot A_p \cdot C^2}{H(T) \cdot \zeta} \cdot \exp\left(-\frac{Q_p}{R \cdot (T)}\right) dt. \quad (1.5.)$$

kur  $A_p$  - oksidācijas *Arrhenius* konstante;

$Q_p$  - oksidācijas aktivācijas enerģija;

$R$  - molārā gāzes konstante;

$C = 6M_{Fe}/(9-\eta)\rho Mo$ , ( $\eta$  ir  $Fe_3O_4$  - tilpuma procentuālais saturs,  $\rho$  - dzelzs blīvums,  $Mo$  un  $M_{Fe}$  ir skābekļa un dzelzs molārās masas).



1.4. att. Oksidācijas nodiluma modeļa shēma [1].

Taču jāatzīmē, ka analītisko aprēķinu formulām ir būtiski trūkumi - visos nodiluma aprēķina vienādojumos iekļautais nodiluma svāra koeficients  $\lambda$  tiek noteikts tikai eksperimenta rezultātā, kas izslēdz iespēju veikt analītiskos aprēķinus bez eksperimenta. Konkrēti adhezīvā nodiluma gadījumā, pirms analītisko aprēķinu veikšanas, bija nepieciešams veikt nodiluma testus, tādējādi savācot adhēzijas nodiluma rezultātā radušos nodiluma produktus un tos nosverot, tika iegūtas nodiluma koeficienta vērtības  $k$ , kuras ir jāizmanto aprēķina vienādojumā, tādējādi aprēķinu nav iespējams veikt bez iepriekš eksperimentāli iegūtajām parametra  $k$  vērtībām.

*A. Adrians et al.* [2] savā pētījumā izmanto uz 1.1. vienādojuma pamata izstrādāto metodi, pielietojot to sausās slīdes nodiluma prognozēšanai automobiļa turbokompresora vārpstas un bukses salāgojumam. Tiek veikta simulāciju ar galīgo elementu metodi, adaptējot 1.1. vienādojumu katram detaļas mezgla punktam lokālā mērogā atsevišķi:

$$V_{W,i} = k \cdot F_{n,i} \cdot s_{fi}. \quad (1.6.)$$

kur  $V_{W,i}$  - mezgla nodilušais tilpums;  
 $F_{n,i}$  - mezgla kontakta normāls spēks;  
 $s_{fi}$  - mezgla kontakta novietojums.

Pēc tam summējot katra mezgla nodilušo tilpumu, tiek atrasts summārais nodilums:

$$\sum_{i=1}^N V_{W,i} = V_W. \quad (1.7.)$$

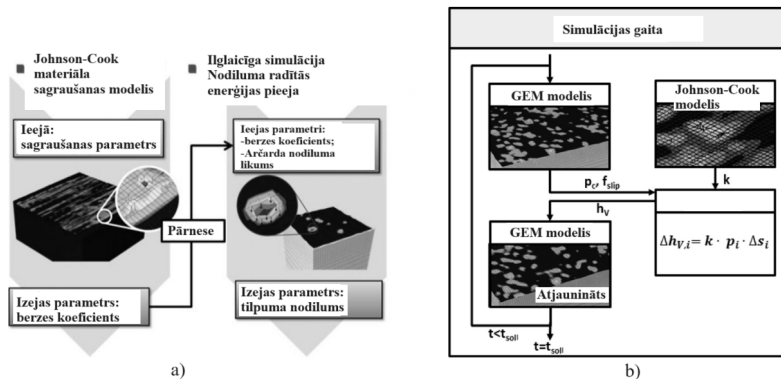
Simulācijas gaitā iegūtais nodiluma apjoms ir tuvs eksperimentālajam, taču nevar sniegt objektīvu vērtējumu, jo simulācijas ilgums nav bijis pietiekams, ko atzīst arī pats autors. Dotais vienādojums neņem vērā reālos slīdes berzes apstākļos radušos temperatūru un oksidācijas procesus, kam, pēc autora uzskata, ir vitāli svarīga loma salāgojuma kontaktvirsmu nodilumizturībai. Nav arī skaidrs kā simulācijas procesā tiek aprakstīts virsmas raupjums un pēc kādiem kritērijiem tas tiek izvēlēts.

*S.Reichert et al.* [3] pēta dažādus vārpstas gultņu materiālus, īpašu uzmanību pievēršot nodilumizturībai kombinācijā ar tērauda vārpstu. Pētījuma mērķis ir simulēt slīdes nodilumu divām detaļām ar raupju virsmu sausā un jauktas eļļošanas režīmā, ņemot vērā reālo virsmas topogrāfiju. Skaitliskās simulācijas tiek modelētas, pielietojot galīgo elementu programmatūru *Abaqus (Dessault Simulia)*, apvienojot to ar *Python* programmēšanas valodu, lai aprakstītu nodilumu raupjām virsmām. Visi pētījumi, kas skar jauktu eļļošanas režīmu, ir balstīti uz Lorenca eļļošanas modeli, ņemot vērā papildinājumus, ko ievieš pētījuma autori. Arī šajā pētījumā tiek izmantots klasiskais Dž.F.Arčarda nodiluma 1.1. vienādojums. Lai šo likumu integrētu galīgo elementu modeli, simulējot nodilumu, autors uzsver, ka ir nepieciešams lokāls formulējums katram virsmas mezgla punktam. Tādā gadījumā, pēc autora uzskata, Dž.F.Arčarda modelis ir derīgs arī lokālam pielietojumam un tiek modificēts sekojoši:

$$h_{i+1} = h_i + k \cdot p_i \cdot \Delta s_i. \quad (1.8.)$$

kur  $p_i$  - mezgla punkta kontaktspiediens;  
 $\Delta s_i$  - slīdēšanas distance katrā mezgla punktā;  
 $k$  - nodiluma koeficients.

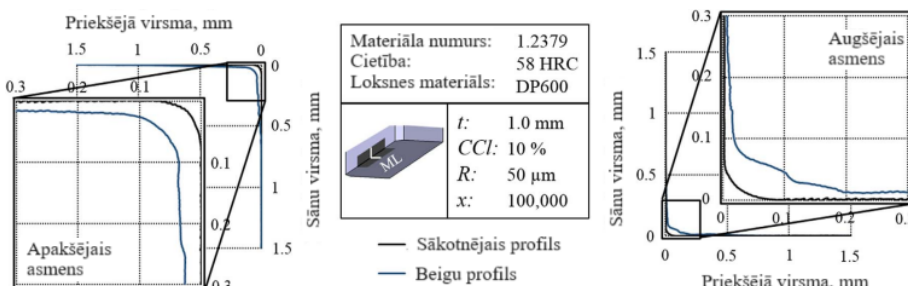
Nodiluma simulācijas secība un simulācijas darba gaitas shēma, ievērojot Dž.F.Arčarda nodiluma aprēķina vienādojumu, ir parādīta 1.5.att.



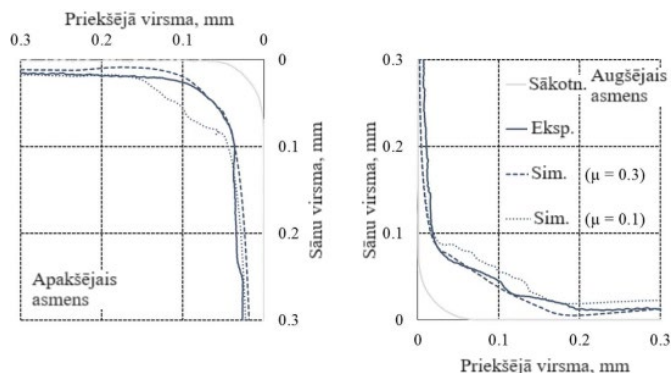
1.5. att. Nodiluma simulācijas secība (a) un uz Dž.F.Arčarda modeļa balstītā nodiluma procesa simulācijas darba gaitas shēma (b):  $t_{soll}$  - simulācijas laiks [3].

Autora piedāvātajā modelī nodilums tiek īstenots, pārvietojot virsmas mezglu punktus par aprēķināto nodiluma dziļuma lielumu. Virsmas mezglu punktu kustība notiek normālvirzienā. Nodiluma lielums tiek atjaunināts katrā laika pieaugumā. Vienādojumā iekļautais nodiluma koeficients  $k$  tiek rēķināts balstoties uz *Johnson-Cook* virsmas sagraušanas modeli, kas ņem vērā spriegumu, deformācijas ātrumu, temperatūru un spiedienu elementa sloģošanas laikā. Taču jāatzīmē, ka *S.Reichert et.al.* piedāvātajā nodiluma aprēķina simulācijas pieejā nav izskaidrots ar kādiem virsmas raupjuma parametriem tiek definēta virsma un pēc kāda principa tā tiek modelēta simulācijas programmā. Spriežot pēc rakstā atrodamās informācijas, slīdes berzes procesa simulācijas kopējais laiks līdz 2,5 sekundēm nav pietiekams, lai izdarītu ticamus secinājumus par nodiluma vērtībām, ko atzīst arī pats pētījuma autors. Tāpat nav veikts simulācijas procesā iegūto datu salīdzinājums ar eksperimentālajām vērtībām, tāpēc izdarīt secinājumus par datu atbilstību nav iespējams.

*Wan-Gi Cha et al.* [5] modelēja metāla lokšņu sausās griešanas/ciršanas procesā izmantoto instrumenta asmeņu nodilumu, savienojot Dž.F.Arčarda nodiluma aprēķina vienādojumu ar REDSY nodiluma simulācijas rīku, lai noteiktu instrumenta ģeometrijas izmaiņas, ko izraisa nodilums. Modelēšanā tika pielietota galīgo elementu metode, kura balstījās uz *Lemaitre* sagraušanas modeli, kas ir saistīts ar materiāla plastiskuma un elastības parametriem. Tika realizēts arī eksperimentālais pētījums, veicot instrumenta asmeņa formas nodiluma mērījumus pēc noteikta darba ciklu skaita (pēc 1000, 5000, 15000, 30000, 50000, 75000 un 100000 izciršanas cikliem) ar mērķi salīdzināt simulācijā un eksperimentā (1.6.att., 1.7.att.) iegūtās nodiluma vērtības.



1.6. att. Nomērītais instrumenta asmeņu profils (kreisajā pusē - apakšējais asmens, labajā pusē - augšējais asmens) pirms un pēc 100000 griešanas operācijām [5].



1.7. att. Eksperimentā un simulācijā iegūtie nodilušā instrumenta asmeņu profili veicot 100000 detaļu izciršanas ciklus (pa kreisi - apakšējā asmens profils, pa labi - augšējā asmens profils)

Gao Deli et al. [6] pētot nodiluma rievās dziļumu korpusa iekšpusē, kas tiek izmantots iekārtās dziļurbumu veikšanai, apgalvojot, ka nodiluma prognozēšanai var tikt veiksmīgi pielietots nodiluma aprēķina modelis, kas balstīts uz 1.1. vienādojumu ar tajā veiktajām modifikācijām:

$$V = \frac{\eta}{H_b} \int \mu \cdot N \cdot L \cdot dl = f_w \int \mu \cdot N \cdot L \cdot dl. \quad (1.9.)$$

kur  $V$  - nodilušā materiāla tilpums;

$H_b$  - cietība pēc Brineļa;

$\eta$  - nodiluma efektivitāte (bezdimensiju parametrs);

$f_w$  - nodiluma koeficients;

$N$  - spēks, ko rada urbja kāts uz korpusu;

$L$  - slīdēšanas distance;

$\mu$  - berzes koeficients.

Jose A.Brandao et al. [7] veic zobrata zoba virsmas nodiluma skaitlisko simulāciju, kuras pamatā ir jaukts eļļošanas modelis, kurā tiek ņemti vērā virsmas profila raupjuma parametri ( $R_z$ ,  $R_a$  un  $R_q$ ), smērvielas īpašības un nodiluma modelis. Dotā pētījuma autors aprēķinu balstīja uz Dž.F.Arčarda nodiluma analītisko vienādojumu, kas dotajā gadījumā tiek pielāgots zobratu zobu darba apstākļiem un ģeometrijai:

$$\Delta V = N_{turns} \cdot b \cdot Z_l \cdot k \int_{t_A}^{t_E} F_N(t) |U_2(t) - U_1(t)| dt. \quad (1.10.)$$

kur  $\Delta V$  - nodilušā materiāla tilpums;

$N_{turns}$  - zobrata apgriezienu skaits;

$b$  - zobrata zoba platums;

$Z_l$  - zobrata zobu skaits;

$k$  - nodiluma koeficients;

$F_N$  - pieliktais spēks;

$U_1$  un  $U_2$  - kontaktējošo zobratu zobu tangenciālais ātrums kontaktpunktā;

$t$  - laiks;

$t_A$  - moments, kad zobrata zobs saskaras ar pretējo zobu;

$t_E$  - moments, kad zobrata zobs pārtrauc kontaktu ar pretējo zobu.

Salīdzinot simulācijā iegūtos rezultātus un eksperimentā iegūtos datus, arī pats pētījuma autors piekrīt, ka nodiluma modeļa atbilstības aprobācijai būtu nepieciešami papildus eksperimenti ar labāku mērījumu precizitāti.

K.Frischmuth et al. [10] savos pētījumos, veicot matemātisko modelēšanu ātrgaitas vilciena ritenim, kas pārvietojoties pa dzelzceļa sliekšņiem ir pakļauts dilšanas procesam, centās integrēt Dž.F.Arčarda modeli veicot nodiluma prognozēšanu, integrējot šo pieeju matemātiskās sakarībās. Savukārt B.Dirks un R.Enblom [27] uzsver, ka dzelzceļa riteņu un sliekšņu kalpošanas laika novērtēšanā ir jāņem vērā gan nodilums, gan arī kontaktnogurums, kas rodas ekspluatācijas laikā ritenim un slīdei. Pēc zinātnieku uzskata virsmas nodilums un kontaktnogurums ir cieši saistīti savā starpā - nodilums var izmainīt riteņa un slīdes savstarpējo kontaktģeometriju, tādā veidā sekmējot plaisu rašanos un izplatīšanos, savukārt pie lielāka nodiluma kontaktnogurumam abos elementos var tikt kavēta izplatīšanās, tādējādi, pēc autoru domām, strauji samazinot nodilumu, var radīt labvēlīgus apstākļus noguruma plaisu

rašanās iespējām. Savos pētījumos autori pieturās pie *Jendel* papildinātā Dž.F.Arčarda nodiluma aprēķina vienādojuma [27], kurā kontakta laukums tiek sadalīts noteiktā lieluma šūnveida elementos. Turpmāk katram elementam tiek noteikts nodiluma dziļums. Pētījuma mērķis bija atrast korelāciju starp nodiluma modeli un kontaktnoguruma modeli. Kā pārādija simulācijas rezultāti, ir nepieciešami turpmākie pētījumi un modeļu pilnveidošana.

*I.Khader et al.* [26] pēta veltni, kuru virsma ir no silīcija nitrīda, nodilumu pārveidojot vienādojumu (1.1.) sekojošā izskatā:

$$V_w = C_0 \cdot p \cdot A \cdot s. \quad (1.11.)$$

kur  $V_w$  - tilpuma nodiluma vērtība;

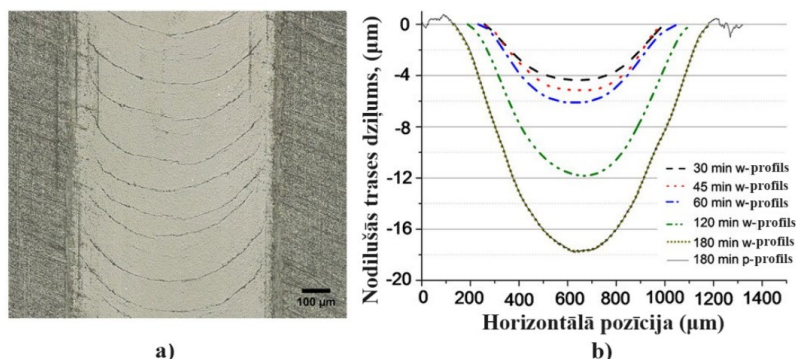
$C_0$  - nodiluma koeficients;

$p$  - kontaktspiediens;

$A$  - kontakta laukums;

$s$  - izslīdēšanas ātrums.

Turpmāk šis vienādojums tiek integrēts simulācijas programmatūrā *Abaqus/Standard*. Eksperimentāli nosakot vidējā berzes koeficienta vērtību ( $\mu=0.28$ ), tiek pielietots *Coulomb* berzes modelis, lai integrētu berzes parametrus kontakta algoritma. Pētījumā tiek veikti arī eksperimentālie nodiluma mērījumi (1.8.att.) uz divu disku tipa nodiluma pētīšanas iekārtas. Nodilums uz disku virsmas tiek mērīts izmantojot profilometru.



1.8. att. Mikroskopa attēls, kurā redzama nodiluma pēdas ar tipiskām c-veida plaisām uz silīcija nitrīda parauga virsmas pēc 30 minūšu ilga testa (a), nodiluma pēdu šķēsgriezuma skats kā laika funkcija (b) [26].

Simulācijā tika pieņemts, ka materiāls ir bez defektiem, t.i., plaisām, porām, u.c., kā arī berzes koeficients visas simulācijas laikā ir nemainīgs.

*Yuanpei Chen et al.* [28] veicot tērauda stieplu nodiluma prognozēšanas pētījumus, izmanto *McColl et.al.* modificēto Dž.F.Arčarda nodiluma aprēķinu vienādojumu:

$$\Delta H_i(x, y, t) = k_i(x, y, t) \cdot p(x, y, t) \cdot S_i(x, y, t). \quad (1.12.)$$

kur  $\Delta H$  - lokālais nodiluma dziļuma pieaugums;

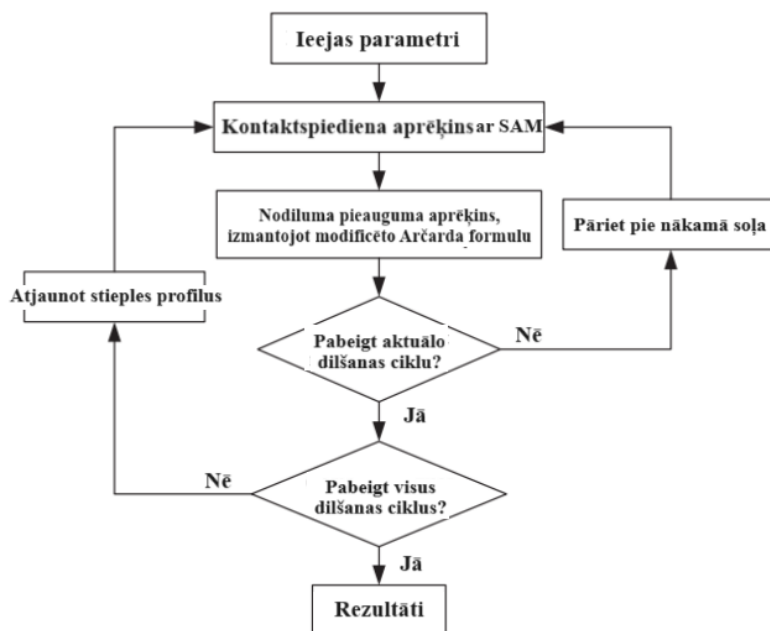
$k_i$  - lokālais nodiluma koeficients;

$S$  - lokālās slīdēšanas parametrs;

$p$  - kontaktspiediens.

Turpmāk vienādojums tiek integrēts nodiluma izplatības matemātiskajā modelī, kurā tiek iekļauti arī citi papildus parametri (stieplu kontaktspiediens, deformācija un iekšējie spriegumi)

un kuru tiek mēģināts risināt, izmantojot pusanalītisko aprēķinu metodi (SAM - no angļu val.) (1.9. att).



1.9. att. Tērauda stieplu nodiluma noteikšanas algoritms [28].

Lai salīdzinātu iegūtos matemātiskā aprēķina rezultātus, pētījuma autors veic arī simulāciju, izmantojot galīgo elementu metodi.

*Jonaki Mukherjee et al.* [12] 1.1 vienādojumu vienkāršotā veidā pielieto pētīt nodiluma īpašības SiC pārklājumiem. Veicot mikro-skrāpēšanas testus plāksnītēm pārklātām ar Si un ievietojot 1.1. formulā mērījumus iegūtos rezultātus, tiek rēķināta nodiluma intensitāte.

*Weijun Tao et al.* [30] uzsver, ka rites gultņu nodiluma aprēķinos plaši tiek izmantots 1.1. vienādojums, kuru turpmāk savā pētījumā pielieto arī raksta autors, apskatot rullīšu lineāro vadotņu nodilumu, kuru cieši saista ar slodzi, kas pielikta vadotnēm. Tiek skaidrots, ka vienādojumā ietilpstošo nodiluma koeficientu  $k$  ietekmē materiāla īpašības, eļļošanas apstākļi, virsmas raupjums un daudzi citi faktori, kurus apkopojot ir sarežģīti izveidot precīzu matemātisko modeli, tāpēc autors piedāvā izvēlēties nodiluma koeficientu  $k$ , balstoties uz zinātnieka E.Rabinoviča 1958. gada eksperimentu rezultātiem, kas kārtējo reizi apstiprina to, ka vienādojums (1.1.) neietver būtisku nodilumu ietekmējošo parametru kompleksu.

*V.Popovs et al.* [31,32] apskata Dž.F. Arčarda vienādojuma modificēšanas iespējas, ņemot vērā zinātnieka E.Rabinoviča izstrādāto teoriju par dilšanas rezultātā atdalījušos daļiņu veidošanos, kas ņem vērā materiāla elastības moduli, materiāla cietību un daļiņu atdalīšanai patērēto darbu. Pētījuma mērķis ir piedāvāt nodiluma aprēķina formulu, apvienojot abu iepriekš minēto zinātnieku izstrādātās teorijas, kā arī realizēt iegūto sakarību skaitlisko simulāciju. Simulācijas rezultātā autori ilustratīvi parāda kā iegūtā sakarība darbojas pie dažādiem apstākļiem/kritērijiem, kā rezultātā tiek iegūts priekšstats par dilšanas procesā iesaistītajiem noteicošajiem faktoriem. Svarīgi ir tas, ka arī paši autori uzsver nepieciešamību pēc padziļinātas noteicošo parametru izpētes.

Yanfei Liu et al. [40] pēta materiāla mehānisko īpašību izmaiņas berzes rezultātā un modificē Dž.F.Arčarda klasisko nodiluma aprēķina modeli. Autors uzsver, ka pakļaujot divu detaļu virsmas savstarpējām svārstību tipa kustībām ar mazu amplitūdu, uz materiāla virsmas norisinās vitālas mehānisko īpašību un mikrostruktūras izmaiņas, bet Dž.F.Arčarda modelis šos faktorus neņem vērā. Lai pamatotu savu hipotēzi, autors veic lodīte-plakne berzes eksperimentālos pētījumus. Plaknei tiek ņemti trīs dažādi materiāli (nerūsējošais tērauds, tīrs varš un titāna sakausējums Ti-6Al-4V) un lodīte tika izgatavota no alumīnija. Detaļu virskārtas mehānisko īpašību un mikrostruktūras izmaiņas tika pētītas, izmantojot nanoindentāciju un skenējošo elektronu mikroskopu. Tika ierosināts nedaudz modificēts nodiluma aprēķina modelis, kas ņem vērā berzes rezultātā izraisīto dinamisko izmaiņu ietekmi uz materiāla mehāniskajām īpašībām (1.10. att.):

$$V = k \cdot \frac{W \cdot S}{H_{TTS}}. \quad (1.13.)$$

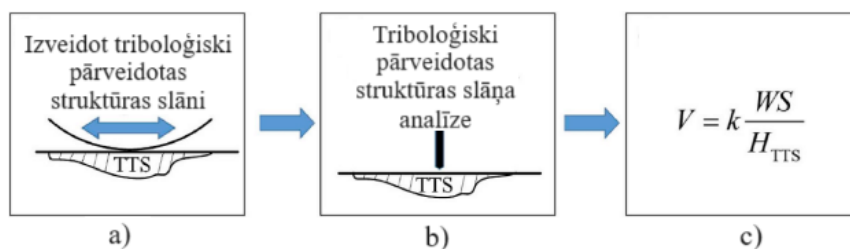
kur  $V$  - nodilušā materiāla tilpums;

$k$  - nodiluma koeficients;

$W$  - slodze;

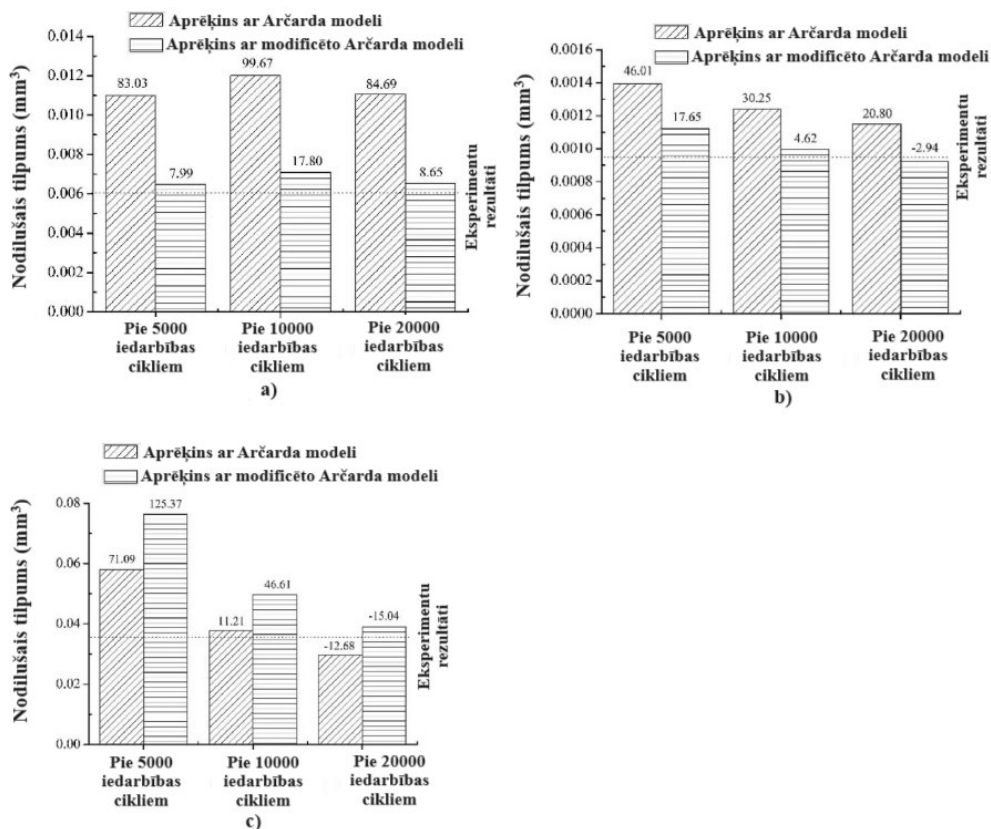
$S$  - berzes ceļš;

$H_{TTS}$  - berzei pakļautās detaļas virskārtas cietība (tiek mērīta pēc 1000 cikliem).



1.10. att. Uzlabotā uz Dž.F.Arčarda vienādojuma balstītā nodiluma aprēķina secība: pārveidotās virskārtas struktūras izveidošana (a), pārveidotās virskārtas struktūras raksturošana (b) un modificētais Dž.F.Arčarda nodiluma vienādojums (c) [40].

Pētījuma rezultātā autors uzsver, ka modificētais nodiluma aprēķinu vienādojums diviem materiāliem parādīja lielāku atbilstību ar eksperimentā iegūtajiem datiem (nerūsējošais tērauds, tīrs varš) (1.11. att.), savukārt titāna sakausējumam (Ti-6Al-4V) labāka nodiluma vērtību atbilstība ar eksperimentālajiem datiem novērojama, rēķinot pēc klasiskā Dž.F.Arčarda vienādojuma. Pētījuma autors to skaidro ar to, ka titāna sakausējumam mikrostruktūra, oksidācija, porainība un plaisas rada papildus sarežģītumus nepieciešamo parametru noteikšanā.



1.11. att. Tērauda (a), tūrā vara (b) un titāna sakausējuma (c) eksperimentālais un prognozētais nodilums (skaitļi virs kolonnām norāda % starpību starp teorētiskajiem un eksperimentālajiem rezultātiem) [40].

Kā redzams, tad Dž.F.Arčarda nodiluma aprēķina klasiskais vienādojums, bieži vien pētījumu autoru pilnveidots, papildinot ar nepieciešamajiem parametriem, vai arī pielāgots konkrētai situācijai, joprojām ir populārs mūsdienu zinātnieku vidū, tanī skaitā arī pielietojot datorsimulācijas programmu sniegtās iespējas (piemēram, bāzētās uz galīgo elementu metodes), Dž.F.Arčarda vienādojums tiek ņemts par pamatu nodiluma prognozēšanai.

Taču jāatzīmē, ka analizējot rūpīgāk Dž.F.Arčarda vienādojuma papildinājumus/pilnveidojumus, ir redzams, ka tam joprojām ir būtiski trūkumi. Vairumā gadījumu nav skaidrs kādā veidā tiek aprakstīta divu berzes detaļu virsmas tekstūra, kādi konkrēti parametri tiek ņemti vērā modelējot virsmu un vai tie ietekmē nodiluma vērtības. Daudzos gadījumos analītiskajam aprēķinam nepieciešamie parametri tiek sākotnēji iegūti no eksperimentālajiem pētījumiem, tādējādi nav iespējams veikt nodiluma vērtību aprēķinu, iepriekš neveicot eksperimentālos pētījumus, kas bieži vien prasa gan specializētu aprīkojumu, gan arī mēraparātus konkrētu parametru novērtēšanai.

## 1.2. Jauktie nodiluma aprēķina modeļi

Fei Lyu *et al.* [8] sava pētījuma ietvaros apskata aksiālā sūkņa virzuļa un cilindra savstarpējo nodilumu un piedāvā nodiluma prognozēšanas vienādojumus, kuru pamatā ir

sakarības starp gultņa sloģošanas un eļļošanas parametriem. Tādējādi raksta autori izsaka apgalvojumu, ka sūkņa darbības gaitā, mainoties slodzei un eļļošanas apstākļiem, norisinās divu veidu nodilums. Ka pirmo autori min abrazīvo nodilumu, kuru piedāvā rēķināt sekojoši:

$$dw = k_s \frac{P_s}{3\sigma_s} ds. \quad (1.14.)$$

kur  $s$  - berze ceļš;

$\sigma_s$  - materiāla tecēšanas robeža;

$k_s$  - berzes koeficients, kas tiek noteikts eksperimentāli.

Brīdī, kad eļļas slānis ir nepietiekams un notiek sūkņa detaļu virsmu nelīdzenumu daļēja saskare, nodilumu tiek piedāvāts rēķināt ar sekojošu slīdes-berzes pāra nodiluma aprēķina vienādojumu:

$$dw = \frac{u \cdot dt}{dA} [\delta_0 \cdot e^{-\Delta/2ut} - h]^2 \cdot \frac{\Delta}{\delta_0}. \quad (1.15.)$$

kur  $t$  - slīdes berzes laiks;

$A$  - nodilumam pakļautais laukums;

$\delta_0$  - virsmas nelīdzenumu augstums;

$\Delta$  - virsmas nelīdzenuma garums;

$\tau$  - virzuļa materiāla aiztures laiks.

$e$  - virzuļa novietojums.

Darba gaitā pētījuma autori integrēja aprēķina vienādojumus simulācijā un veica arī praktiskus eksperimentus, lai salīdzinātu iegūtās nodiluma vērtības. Jāatzīmē, ka apskatītajā nodiluma aprēķina modelī ietilpstošais berzes koeficients  $k_s$  tiek noteikts eksperimentāli un tam nav iepriekš definēts teorētiskais pamatojums kādās robežās to būtu jāpieņem aprēķina formulā, tādējādi tas var variēt plašās robežās, kas var būtiski ietekmēt arī aprēķina rezultātus, ko atzīst arī dotā pētījuma autori. Tāpat autori nosaka kurā vietā ir lielākais nodilums, ko apstiprina eksperimentālo un simulācijā iegūto rezultātu sakritība, taču netiek minētas konkrētas nodiluma vērtības un nav skaidrs kāds ir rezultātu izkļedes intervāls.

*H. Kloss et al.* [11] pētījumā analizē divas metodes, kas tiek pielietotas nodiluma teorētiskajiem aprēķiniem, t.i., masas bilances un enerģijas bilances nodiluma aprēķina metodes. Masas bilances gadījumā tiek analizēts dilstošo daļiņu veidošanās ātrums  $q_f(t)$ , atdalīto daļiņu masa kontakta iekšpusē  $m(t)$  un atdalīto daļiņu plūsma vai ātrums  $q_w(t)$ , transportējot tās ārpus kontakta. Tādējādi nodiluma aprēķinam tiek izmantoti trīs diferenciālvienādojumi. *Sakurai et al.* [11] izmantoja šāda veida vienādojumus, lai aprakstītu dzelzs sulfīda slāņu veidošanos eļļotā tribosistēmā, izmantojot radioaktīvo sēru un sēra savienojumus. Līdzīgā veidā *Dorinsons* un *Ludema* [11] aprakstīja metāla pārnese un oksidēšanās norisi nodiluma procesā. *Fillot et al.* [11] izmantoja šo koncepciju, lai modelētu granulveida materiālu nodiluma uzvedību dilšanas procesā.

Analizējot enerģijas bilances nodiluma prognozēšanas metodi *H.Kloss et al.* [11] uzsver, ka enerģijas līdzsvara mehānismi un procesi ietver enerģijas pārnese, mehāniskā darba uzkrāšanu, izstarošanu un izkliedi. Visi šie procesi ir cieši saistīti ar reāla kontakta laukuma veidošanos, elastīgo un plastisko deformāciju rašanos un termālās enerģijas (siltuma) rašanos,

pārveidojot mehānisko darbu. Pētījumā autori veica arī praktiskus eksperimentus, lai pārbaudītu teorētisko vienādojumu atbilstību. Kā tika secināts, tad pētījumā aprakstītie vienādojumi var būt noderīgi, lai salīdzinātu eksperimentālos rezultātus, kas iegūti dažādos testa apstākļos, taču turpmāk nepieciešami vienādojumu pilnveidojumi, vienlaicīgi pētot arī eksperimentos iegūtos rezultātus. Tāpat autori uzsver, ka ir nepieciešama atdalījušos daļiņu, virsmas slāņa un virsmas topogrāfijas, kā arī mainīgā nodiluma ātruma padziļināta analīze.

*R.Tandler et al.* [29] pilnveidoja zinātnieka *G.Fleischer* nodiluma enerģijas vienādojumu nodiluma aprēķinam:

$$V_V = \frac{W_R}{e} = \int_{s0}^{s1} k \cdot F_N \cdot \mu \cdot ds. \quad (1.16.)$$

kur  $W_R$  - berzei patērētais darbs;

$e$  - materiāla enerģijas blīvums;

$s$  - berzes ceļš;

$K$  - materiālu savstarpējais enerģijas blīvums ( $k=1/e$ );

$F_N$  - pieliktais spēks;

$\mu$  - berzes koeficients.

Ar mērķi analizēt automobiļa gāzes sadales mehānisma ķēdes atsevišķu elementu nodilumu, pētījumu gaitā nodiluma aprēķina modelis tika integrēts *ABAQUS CAE* un tika veikta datorsimulācija, kā arī mērījumi reālam objektam. Secināts, ka nepieciešams turpināt pilnveidot iepriekšminēto modeli ar mērķi sasniegt lielāku simulācijas rezultātu precizitāti un samazināt izmaksas.

### 1.3. Nodiluma lieluma noteikšana veicot eksperimentālos pētījumus

Pieeja, kas balstās nevis uz analītiskajiem aprēķiniem, bet gan nodiluma vērtībām, kas iegūtas eksperimentālā veidā, joprojām ir plaši pielietota arī mūsdienās.

“Lode-disks” tribometra izmantošanas rezultātā iegūto eksperimentālo nodiluma datu apstrāde:

*Wenfang Cui et al.* [19] analizējot nano-TiN pārklājuma uz Ti sakausējumiem īpašības, nodiluma novērtēšanai, veicot pētījumus uz lode-disks tribometra, nosaka dilšanas intensitāti nomērot izdilušās trases parametrus. *Sajjad Ghasemi et al.* [20] šādas konstrukcijas tribometru izmanto Ti/TiN pārklājumiem uz Al 7075 pamatnes pētījumos, kuros tiek mērīts izdilušās trases platums un dziļums, lai analizētu pārklājuma īpašības, tanī skaitā arī nodiluma lielumu. *S.M.Lari Baghal et al.* [21] apskatot Ni-Co/SiC pārklājumus uz Al pamatnes pēc eksperimenta, nodilumu novērtē nosakot dilšanas intensitāti un svēršanas rezultātā nosakot atdalītā materiāla masu. *Xu Bin-shi et al.* [18] veicot eksperimentālos pētījumus pārklātai virsmai, nodiluma lielumu analizē izmērot no lodes atstātās izdilušās trases dziļumu. *Hadi Nasiri Vatan et al.* [22] testējot WC nanokompozītu pārklājumu triboloģiskās īpašības uz Mg sakausējumiem, nodiluma novērtēšanai veic gan paraugu svēršanu, gan lodes atstātās izdilušās trases ģeometrisku parametru mērīšanu, gan arī nosakot dilšanas intensitāti. *M.Bahshwan et al.* [25] savu uzmanību akcentē uz tērauda detaļu, kas tiek ražotas izmantojot aditīvo ražošanas

tehnoloģiju, nodiluma īpašību pētīšanas, veicot eksperimentus un nosakot dilšanas intensitāti. Atsevišķas uzmanības ir vērts zinātnieka *P.Kiranagi et al.* [24] pētījums, kas savā darbā apskata nodiluma lieluma izteikšanas mērvienības, ko zinātnieki izmanto analizējot nodilumu, kas ir iegūts veicot eksperimentus.

*Citu kontakta veidu tribometru berzes pāra darbības rezultātā iegūto eksperimentālo nodiluma datu apstrāde:*

*Shirin Dehghi et al.* [13] analizējot korozijas un nodiluma īpašības Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC pārklājumiem veic nodilumizturības testus. Iegūto mērījumu un elektronu mikroskopijas datu apstrādes rezultātā tiek izdarīts secinājums par dominējošā nodiluma veidu un dilšanas intensitāti. *Lin Ding* [14] *et al.* analizējot nano-CeO<sub>2</sub> ietekmi uz mikrostruktūru un nodilumizturību pārklājumiem uz Co bāzes, kā vienu no svarīgākajiem izejas parametriem apskata svara nodilumu (miligramos), kura skaitliskās vērtības tiek iegūtas tikai eksperimentu rezultātā. *Pengbo Mi et al.* [15] dilšanas intensitāti nosaka nano-WC-Co pārklājumiem, ievietojot eksperimentāli iegūtos datus izteiksmē:

$$W_s = \frac{C \cdot S}{F \cdot L}. \quad (1.17.)$$

kur  $W_s$  - wear rate, mm<sup>3</sup>;

$C$  - nodiluma celiņa perimetrs, mm;

$S$  - nodiluma celiņa laukums, mm<sup>2</sup>;

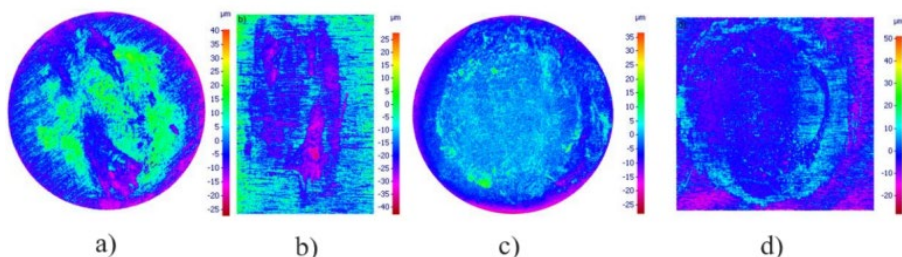
$F$  - spēks, N;

$L$  - summārais berzes ceļš, mm.

Darbs izraisa interesi, jo pārklātie paraugi eksperimentu gaitā tiek karsēti, tādējādi nosakot dilšanas intensitāti dotajam pārklājumu veidam pie dažādām temperatūrām.

*Yazdani et al.* [16] pētī nanostrukturētu funkcionāli graduētu Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozītmateriālu pārklājumu īpašības, apskata arī eksperimentāli iegūtu dilšanas intensitāti. Pēc autoru apgalvojuma dilšanas intensitāte ir apgriezti lineāra sakarība ar cietību, kā rezultātā šis lielums labi saskan ar 1.1. vienādojumu.

*J.C.Walker et al* [17] apskatot Fe nanodaļiņu pārklājumus, kas paredzēti nodilumizturības palielināšanai pie augstām temperatūrām, nodiluma noteikšanai izmanto divas metodes - svēršanas metodi, t.i., nosverot eksperimentālos paraugus pirms un pēc eksperimenta veikšanas vai arī rekonstruējot detaļas sākotnējo ģeometrisku formu, aprēķina nodilušo materiāla daudzumu (1.12.att.).



1.12. att. 3D virsmas rekonstrukcijas [17]:

rullīša (a) ar diametru 7 mm un plāksnes (b) bez pārklājuma virsmas; rullīša (c) un plāksnes ar pārklājumu (d) virsma; eksperimenti veikti istabas temperatūrā [17].

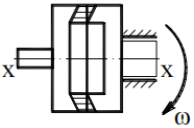
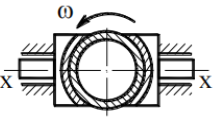
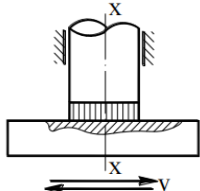
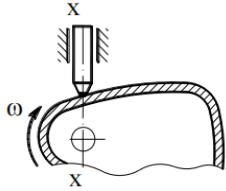
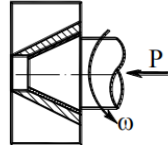
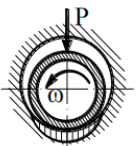
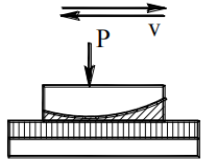
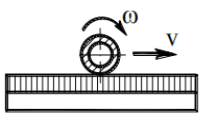
Vereschaka *et al.* [23] savā darbā pētot griezējplāksnīšu ar dažāda veida pārklājumiem ((Ti,Al)CN, Ti-TiCN-(Ti, Al, Cr)CN) parametrus apstrādājot tēraudu, īpašu uzmanību pievērš arī nodiluma analīzei. Nodilums tiek noteikts nomērot izdilušās plāksnītes attiecīgos parametrus, izmantojot instrumentālo mikroskopu.

#### 1.4. Proņikova *et al.* nodiluma aprēķinu modelis

Viens no ievērojamākajiem zinātniekiem, kurš aprēķinu metodē sasaistīja dilšanas ātrumu  $\gamma$  ar berzes pāra īpatnējiem spiedieniem  $p$  un relatīvās slīdes kustības ātrumu  $v$  bija A. Proņikovs [70,75-77,86]. A. Proņikovs nosaka divus nodiluma veidus – virsmas nodilumu un berzes salāgojuma nodilumu. Virsmas nodilums tiek raksturots ar detaļas izmēra izmaiņu virzienā, kas ir perpendikulārs pret berzes virsmu  $\Delta h$ . Vispārējā gadījumā nodilums sadalās pa berzes virsmu nevienmērīgi, tāpēc  $\Delta h = f(x, y)$ , kur  $x$  un  $y$  – berzes virsmas koordinātas.

Divu salāgotu virsmu berzes gadījumā abas virsmas dilst vienlaicīgi. Tas noved pie salāgojamo virsmu savstarpējā stāvokļa izmaiņām.

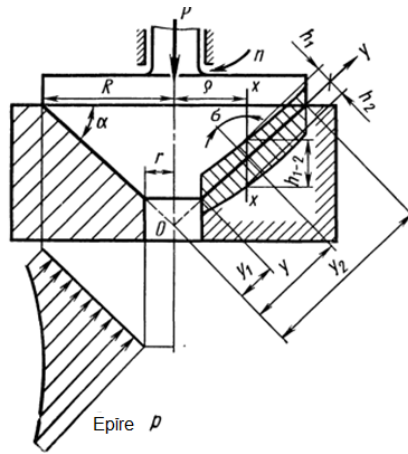
A. Proņikovs arī izstrādāja salāgojumu klasifikāciju pēc to nodiluma apstākļiem (1.13.att.).

| Tips | Grupa                                                                               |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                      |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|      | 1                                                                                   | 2                                                                                  | 3                                                                                  | 4                                                                                    |
| I    |    |   |   |    |
| II   |  |  |  |  |

1.13. att. Salāgojumu klasifikācija pēc A. Proņikova [70].

Atkarībā no detaļu savstarpējā tuvināšanās rakstura to virsmu nodiluma laikā, visi salāgojumi tiek iedalīti divos tipos. I tipa salāgojumiem ir papildus nedilstošas vai arī maz dilstošas vadīklas, kuras nodrošina detaļu tuvināšanos diluma laikā tikai uzdotajā  $x$ - $x$  virzienā. II tipa salāgojumos notiek izdilušo detaļu pašiestatīšanās un to savstarpējais novietojums ir atkarīgs no izdilušās virsmas formas. Šī metode ļauj noteikt diluma lielumu (ķermeņa lineāro izmēru izmaiņas) un izdilušās virsmas formu. Šie aprēķini ir balstīti materiāla nodilumu likumsakarībās un novērtē salāgojuma konfigurāciju.

Kā piemēru var apskatīt konisko salāgojumu un tā abrazīvo nodilumu (1.14.att.).



1.14. att. Koniskā salāgojuma nodiluma principiālā shēma [70].

Pēc A.Proņikova izteiksmes, nodiluma ātrums tiek rēķināts šādi:

$$\gamma_{1-2} = \frac{P \cdot n \cdot (K_1 + K_2)}{(R - r) \cdot \cos \alpha}. \quad (1.18.)$$

kur  $P$  – slodze, kas darbojas uz detaļām;

$n$  – apgriezienu skaits;

$K_1$  un  $K_2$  – detaļu nodilumizturības koeficienti;

$R, r$  – maksimālais un minimālais berzes virsmu kontakta rādiuss.

A.Proņikovs apgalvo, ka tādā veidā var būt atrasti arī skaitliskās sakarības citiem salāgojumu pāriem un dažādām nodiluma likumsakarībām.

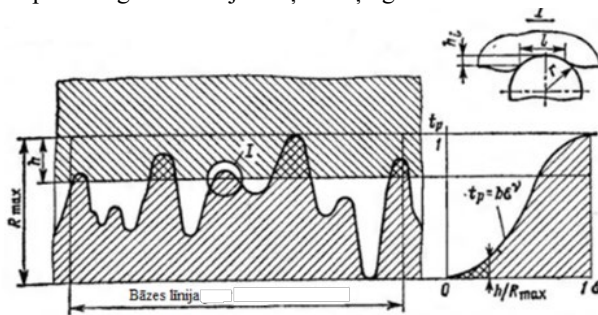
Svarīgi uzsvērt, ka šie aprēķini tiek balstīti uz materiālu nodilumu likumsakarībām un ievēro salāgojuma konfigurāciju, taču formulā iekļautie detaļu nodilumizturības koeficienti  $K_1$  un  $K_2$  tiek noteikti tikai ilgstoša eksperimenta gaitā, tādējādi zūd jēga iepriekš veikt nodiluma aprēķinus.

## 1.5. Kraģeļska *et al.* nodiluma aprēķina modelis

Citam virzienam piederīgie zinātnieki izmanto aprēķina metodes, kuras ietver gan berzes pāra konstruktīvos raksturlielumus, gan berzes detaļu materiāla fizikāli-mehāniskos parametrus, gan arī detaļu virsmas ģeometriskos parametrus. Šīs grupas zinātnieki ir I. Kraģeļskis, N. Djomkins, u.c.

I.Kraģeļskis [74,79,87] norāda, ka sākotnējās aprēķinu formulās tika ņemta vērā tikai materiāla cietības un slodzes ietekme uz materiāla nodilumizturību. Taču aprēķini parādīja, ka ne mazāk svarīgu ietekmi uz materiāla nodilumu atstāj konkrētā materiāla elastības raksturlielumi, detaļas darba režīms (slodze, ātrums, temperatūra), ārējie apstākļi (eļļošana, apkārtējā vide) un berzes mezgla konstruktīvās īpatnības. Brīdī, kad mikronelīdzenums slīd pa ķermeni, zonā pirms tā izveidojas deformējamā materiāla izcilnis, kurš atrodas spiedes spriegumu iedarbībā. Savukārt zonā aiz mikronelīdzenuma berzes spēku iedarbības rezultātā, materiāls izstiepjās. Tādā veidā katrā deformējamā materiāla elementā notiek mainīgas deformācijas. Vairākkārtējas deformācijas, kuras atkārtojas, noved pie virskārtas fizikālo un ķīmisko īpašību izmaiņām un virskārtā rodas bojājumi, kuri noved pie daļiņu atdalīšanās.

I.Kraģeļskis [42] apskata pilnīgi cieta ķermeņa ar raupju virsmu kontaktu (1.15.att.), šim ķermenim slīdot pa elastīgi deformējamā ķermeņa gludu virsmu.



1.15. att. Cieta raupja ķermeņa kontakts ar plakanu deformējamā materiāla virsmu [74].

Raupjā virsma tiek modelēta ar lodveida segmentu kopu ar vienādiem rādiusiem, kuri pēc augstuma izvietoti tādā veidā, ka materiāla sadalījums modeļa virskārtā un reālajā virsmā tiek aprakstīts ar vienādu līkni. Dilšanas intensitātes aprēķinam tiek piemērota šāda pamatformula [74,87]:

$$I = K_I \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \cdot \frac{p_a}{p_r} \cdot \frac{I}{n} \quad (1.19.)$$

kur  $K_I$  – reizinātājs, kuru nosaka ņemot vērā nelīdzenumu ģeometrisku konfigurāciju un šo nelīdzenumu izvietojumu pēc augstuma uz cietu ķermeņu virsmām;

$\alpha$  – pārseguma koeficients;

$p_a$  – faktiskais kontakta laukums;

$p_r$  – nominālais kontakta laukums;

$n$  – ciklu skaits, kas noved pie materiāla sagraušanas.

Dilšanas intensitāte  $I$  ir atkarīga no salāgojamo ķermeņu kontaktmijiedarbības. Vadoties pēc I. Kraģeļska, visos gadījumos ir jānodrošina elastīga ķermeņu mijiedarbība. Lielākajā daļā gadījumu šis nosacījums izpildās patvaļīgi virsmu piestrādes rezultātā, kas noved pie kontaktējošo nelīdzenumu konfigurācijas un to novietojuma pēc augstuma izmaiņām. Formulas pirmā daļa  $h/r$  apraksta virsmas nelīdzenumu relatīvo iespīšanās dziļumu. Šis lielums nosaka kontakta veidu. Nākamā formulas daļa  $p_a/p_r$  nosaka faktiskā kontakta laukumu attiecību pret nominālo kontakta laukumu. Trešā formulas daļa raksturo materiāla spēju pretoties sagraušanai pie atkārtotas iedarbības (materiāla nogurumu). Rezultātā veicot nepieciešamos formulas pārveidojumus elastīga kontakta gadījumā un pārejot no nodiluma intensitātes uz nodilušā materiāla tilpumu, tiek piedāvāta šādā izskatā [79,87]:

$$V_e = \frac{k \cdot b \cdot \varepsilon^{v+1} \cdot A_c \cdot R_{max}}{(v+1) \cdot \alpha \cdot n} \quad (1.20.)$$

kur  $k$  – koeficients, kas ievērtē deformēto tilpumu;

$b, v$  – virsmas relatīvā atbalsta laukuma aproksimācijas koeficienti;

$\varepsilon$  – relatīvais tuvinājums;

$\alpha$  – koeficients, kas raksturo sprieguma un kinemātisko stāvokli kontaktlaukumā;

$R_{max}$  – profila nelīdzenumu lielākais augstums;

$A_c$  – kontaktlaukuma virsma;

$n$  – ciklu skaits, kas noved pie materiāla sagraušanas.

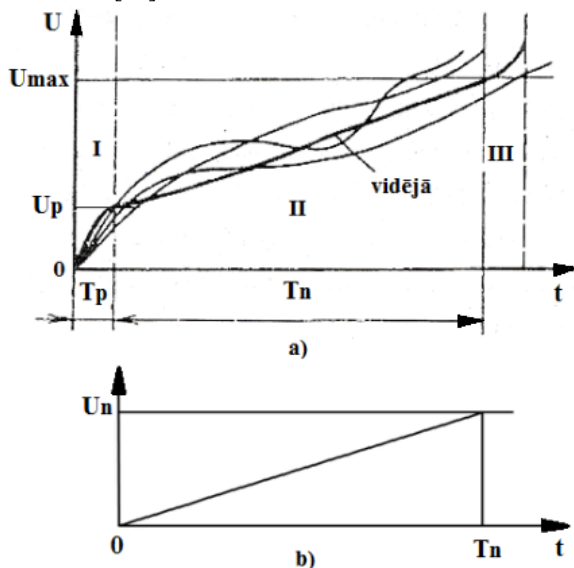
Turpmāk I. Kraģeļskis nosaka jau konkrētus salāgojuma gadījumus un iepriekšminētās formulas tiek piemērotas katram individuālam gadījumam.

Zinātnieka I.Kraģeļska ieviestajos vienādojumos ietilpstošie parametri raksturo berzes procesa fizikālās parādības, kuras noris virsmu kontaktēšanās laikā, taču ne visai pilnīgi raksturo berzes detaļu virsmas parametrus, jo tiek pielietoti nestandarta raupjuma parametri - koeficienti  $b$  un  $v$ , nelidzenuma virsmu rādiusi, u.c. lielumi.

## 1.6. Rudzīša *et al.* nodiluma aprēķina modelis

Zinātnieku J.Rudzīša un O.Liniņa darbos nodiluma aprēķina pieejas pamatā ir iepriekš apskatītais I.Kraģeļska nodiluma aprēķina modelis papildinātā variantā, kurā papildus iekļauta virkne nozīmīgu parametru, kas ļauj pielietot nodiluma aprēķina vienādojumu inženiertehnisko uzdevumu risināšanai, izvēloties aprēķinam nepieciešamo parametru kopu.

J.Rudzītis *et al.* dilšanas procesu raksturo ar trim stadijām (1.16. att.) – piestrādi, normālo dilšanu un katastrofālo dilšanu [66].



1.16. att. Dilšanas lieluma  $U$  atkarība no salāgojuma darbības laika  $t$ :  
I - piestrāde, II – normālais dilšanas periods, III – katastrofālā dilšana (a);  
normālais dilšanas periods (b) [66].

Saskaņā ar 1.16. (a) attēlu, redzams, ka:

$$U_{max} = U_p + U_n. \quad (1.21.)$$

kur  $U_p$ ,  $U_n$  – vidējais nodiluma lielums piestrādes un normālās ekspluatācijas stadijās.

Šajā modelī piestrādes procesa parametrs  $U_p$  tiek noteikts eksperimentāli. Tas ir pamatots ar to, ka piestrādes stadijā pastāv liels daudzums parametru, kas ir ļoti mainīgi un tāpēc nav iespējams tos objektīvi novērtēt un iekļaut aprēķinos, tādējādi nodiluma aprēķinu modelis paredz to, ka vidējais nodiluma lielums  $U_p$  piestrādes posmā tiks novērtēts eksperimentāli, savukārt  $U_n$  - aprēķinu ceļā, kas vizuāli attēlots ir parādīts 1.16. att. (b), kur redzams, ka vidējais nodilums normālā ekspluatācijas periodā pieaug lineāri [66].

Līdz ar to piedāvāto nodiluma aprēķinu var nosaukt par eksperimentāli-teorētisku, jo  $U_p$  tiek noteikts eksperimentāli, bet  $U_n$  - izmantojot analītisku sakarību.

J.Rudzīša et.al. lineārā nodiluma aprēķina formula berzes virsmām ir šāda [66]:

$$E\{U_n\} \approx k_m \cdot K_R \cdot K_{F-M} \cdot \frac{q}{E} \cdot Ra \cdot \frac{L_b}{S_{m2}^a}. \quad (1.22.)$$

kur  $k_m$  - koeficients, kas atkarīgs no noguruma līknes parametriem;

$K_R$  - virsmas raujuma parametru komplekss;

$K_{F-M}$  - fizikāli-mehānisko parametru komplekss;

$q$  - spiediens, kas darbojas uz kontaktējošām virsmām;

$L_b$  - berzes ceļa garums;

$E$  - dilstošās detaļas materiāla elastības modulis;

$Ra$  - dilstošās virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze;

$RSm_2^a$  - virsmas raupjuma vidējais solis berzes virzienā aktīvai virsmai.

J.Rudzīša et.al nodiluma aprēķinu modelī, salīdzinot to ar I.Kraģeļska piedāvāto, papildus tiek ņemti vērā standartizētie raupjuma profila parametri, modelējot virsmas mikropogrāfiju ar varbūtības teorijas atsevišķu sadaļu – gadījuma lauka teoriju un berzes virsmu sagraušana pēc nogurumteorijas likumsakarībām. Uz doto brīdi šo modeli var uzskatīt par pilnīgo berzes virsmu aprēķina modeli, taču kā būtisku trūkumu var minēt to, ka joprojām tiek izmantoti virsmas raupjuma profila (2D) parametri, kas nesniedz pilnīgu informāciju par berzes virsmas reālo mikropogrāfiju, kā rezultātā samazinās nodiluma aprēķina precizitāte.

## 1.7. Nodiluma noteikšanas pieeju apkopojums

Līdz šim zināmo nodiluma aprēķinu modeļu un pieeju literatūras apskata kopsavilkums ir sniegts 1.1. tabulā.

1.1.tabula

Nodiluma aprēķinu literatūras apskata kopsavilkums

| Atsauce                         | Teorētiskais pamatojums | Nodiluma teorētiskais aprēķins | Eksperimentālie pētījumi    | Nodiluma procesa simulācija | Raupjuma profila parametri (2D) | Virsmas tekstūras 3D) parametri | Piezīmes                 |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Xu Wujiao<br><i>et al.</i> [1]  | Dž.F.Arčards            | +                              | Turp-<br>atpakaļ<br>kustība | -                           | -                               | -                               | Formula tika pilnveidota |
| A.Adrians<br><i>et al.</i> [2]  | Dž.F.Arčards            | +                              | -                           | Jā,<br>GEM                  | -                               | -                               | Formula tika pilnveidota |
| S.Reichert<br><i>et al.</i> [3] | Dž.F.Arčards            | +                              | -                           | Jā,<br>GEM                  | -                               | -                               | Formula tika pilnveidota |
| Wan-Gi<br>Cha <i>et al.</i>     | Dž.F.Arčards            | -                              | Reāls<br>objekts            | Jā,<br>GEM,                 | -                               | -                               | Formula tika pilnveidota |

|                                    |                                              |   |   |       |     |   |                                                                                                                   |
|------------------------------------|----------------------------------------------|---|---|-------|-----|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [5]                                |                                              |   |   | REDSY |     |   |                                                                                                                   |
| Gao Deli <i>et al.</i> [6]         | Dž.F.Arčards                                 | + | + | -     | -   | - | Formula tika pilnveidota                                                                                          |
| Jose A.Brandao <i>et al.</i> [7]   | Dž.F.Arčards                                 | + | + | +     | +   | - | Formula tika pilnveidota                                                                                          |
| K.Frischmuth <i>et al.</i> [10]    | Dž.F.Arčards                                 | + | - | -     | -   | - | Formula tika integrēta matemātiskajā modelī                                                                       |
| I.Khader <i>et al.</i> [26]        | Dž.F.Arčards                                 | + | + | +     | -   | - | Formula tika pilnveidota                                                                                          |
| B.Dirks un R.Enblom [27]           | Dž.F.Arčards + Jendel                        | + | - | +     | -   | - | Formula tika pilnveidota                                                                                          |
| Yuanpei Chen <i>et al.</i> [28]    | Dž.F.Arčards                                 | + | - | +     | -   | - | Formula tika pilnveidota                                                                                          |
| Yanfei Liu <i>et al.</i> [40]      | Dž.F.Arčards                                 | + | + | -     | -   | - | Formula tika pilnveidota                                                                                          |
| Weijun Tao <i>et al.</i> [30]      | Dž.F.Arčards                                 | + | + | -     | -   | - | Nodiluma apjoms praktiski tiek novērtēts, mērot detaļu brīv kustību                                               |
| V.Popovs <i>et al.</i> [31,32]     | Dž.F.Arčards                                 | + | - | +     | -   | ? | Dž.F. Arčarda un E.Rabinoviča teoriju apvienojums. Parādīta virsmas tekstūra, bet nav definēts nevienš parametrs. |
| Fei Lyu <i>et al.</i> [8]          | Jaukts                                       | + | + | +     | -   | - | -                                                                                                                 |
| H.Kloss <i>et al.</i> [11]         | Masas bilances un enerģijas bilances modelis | + | + | +     | ?   | - | Nodiluma aprēķiniem dati tiek ņemti no iepriekš veiktiem eksperimentiem                                           |
| [13,14,15, 18,19,20, 21,22,24, 25] | Nodiluma noteikšana eksperimentāli           | - | + | -     | -   | - | Nodiluma lielums tiek noteikts balstoties uz eksperimentos iegūtajiem rezultātiem                                 |
| Proņikovs <i>et al.</i> [41]       | A. Proņikova pieeja                          | + | - | -     | -   | - | Nodilumu nosaka pēc salāgoto detaļu savstarpējā novietojuma izmaiņām                                              |
| Kraģeļskis <i>et al.</i> [42]      | I. Kraģeļska pieeja                          | + | - | -     | +/- | - | Pielieto nestandarta virsmas raupjuma parametrus                                                                  |
| Rudzītis <i>et al.</i> [43, 49]    | J. Rudzīša pieeja                            | + | - | -     | +   | - | Pielieto standartizētos virsmas raupjuma parametrus (2D)                                                          |

1.1. tabulā ir sagrupēts būtiskāko nodiluma noteikšanas modeļu un pieeju apkopojums pēc kritērijiem, kuri sniedz informāciju par nodiluma novērtēšanas teorētisko vai eksperimentālo pieeju, dilšanas procesa simulācijas iespējām, kā arī virsmas raupjuma parametriem, kas ir/nav iekļauti nodiluma novērtēšanā.

Nodiluma noteikšanai joprojām tiek lietotas divas pamatpieejas - nodiluma analītiskais aprēķins un nodiluma vērtību noteikšana, veicot eksperimentālos pētījumus. Eksperimentāli iegūto nodiluma vērtību noteikšanas metode tiek pielietota, ja nav iespējams veikt analītiskos aprēķinus, vai arī ir nepieciešams veikt analītisko un eksperimentālo datu aprobāciju. Jāņem vērā, ka eksperimentālie pētījumu bieži vien prasa specifisku aprīkojumu gan paša dilšanas procesa nodrošināšanai, gan arī dilšanas rezultātā radušos lielumu noteikšanai un analīzei, kas galarezultātā sadārdzina pētījumu procesu.

Analizējot zinātnieku pētījumos izmantotos nodiluma aprēķinus, tika secināts, ka pastāv vairākas nodiluma analītiskā aprēķina metodes. Katra no tām ir balstīta konkrētā dominējošo parametru ietveršanā aprēķinā, taču bieži vien (Dž.F.Arčarda vienādojums un tā pārveidojumi, masas un enerģijas balances likums, A.Proņikova *et al.* modelis, I.Kraģeļska *et al.* modelis) nodiluma aprēķina formulās iekļautie koeficienti/parametri ir nosakāmi ilgstošos eksperimentos, kā rezultātā zūd jēga veikt analītiskos aprēķinus.

Apskatot zinātnieka I.Kraģeļska *et al.* modeli ir jāatzīmē, ka nodiluma aprēķina formulā ir iekļauta virkne parametru, kas darbojas reālā dilšanas procesā, taču joprojām berzes virsmas tiek aprakstīta ar nestandartizētiem raupjuma parametriem un koeficientiem.

J.Rudzīša *et al.* nodiluma aprēķinā izmantojamajā virsmas apraksta modelī ir iekļauti standartizētie virsmas profila (2D) parametri, kā arī virsmas mikrotopogrāfijas modelēšana ar varbūtības teorijas atsevišķu sadaļu – gadījuma lauka teoriju un berzes virsmu sagraušana pēc nogurumteorijas likumsakarībām.

Mūsdienu zinātnes un tehnikas sasniegumi, kā arī jaunie standarti ļauj pilnveidot J.Rudzīša *et al.* nodiluma aprēķina modeli un veikt nepieciešamās izmaiņas un papildinājumus, ar mērķi precizēt aprēķina formulā iekļauto nodilumu ietekmējošo parametru izmērītās vērtības, tādējādi iegūstot precīzākus datus slīdes berzes pāru materiāliem un virsmām.

**Hipotēze:** Virsmas tekstūras (3D) parametru ieviešana, kā arī atsevišķu materiāla noguruma vērtību precizēšana slīdes berzes pāra nodiluma aprēķinā ļaus palielināt aprēķina precizitāti, sintezējot jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli un izstrādājot berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodiku.

Promocijas darba **mērķis** ir sintezēt jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli berzes pāriem un izstrādāt metodiku berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanai.

Promocijas darbā uzstādītā mērķa sasniegšanai ir izvirzīti sekojoši **uzdevumi**:

- 7) Veikt informācijas avotu izpēti un analīzi.
- 8) eikt eksperimentālo priekšizpēti.
- 9) Izstrādāt berzes virsmu kontakta modeli, kas ietver berzes virsmas tekstūras (3D) parametrus.
- 10) Sintezēt jaunu berzes pāra nodiluma aprēķina matemātisko modeli.
- 11) Izstrādāt jaunu berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodiku.
- 12) Veikt jaunās berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodikas aprobāciju.

## 1.8. Secinājumi

1. Nodiluma aprēķina esošo pieeju analīze pierādīja, ka lai paaugstinātu nodiluma aprēķina precizitāti, ir nepieciešams sintezēt jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli un izstrādāt jaunu berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodiku. Līdz šim zināmās prognozēšanas metodikas vai nu nesatur berzes virsmu raksturojošos parametrus vai satur 2D raupjuma parametrus, kuru izmantošana nenodrošina pilno virsmas aprakstu (ir atrasti un analizēti atbilstoši zinātniskie informācijas avoti), un/vai satur grūti nosākamo parametru kopu (nestandarta parametri, eksperimentāli noteicamie parametri), kas ir viens no būtiskākajiem iemesliem analītiskā nodiluma aprēķina rezultāta un kalpošanas laika prognozes neatbilstībām reālām vērtībām.

2. Līdz ar to ir izvirzīta sekojošā promocijas darba pētījuma **hipotēze**:

Virsmas tekstūras (3D) parametru ieviešana, kā arī atsevišķu materiāla noguruma vērtību precizēšana slīdes berzes pāra nodiluma aprēķinā ļaus palielināt aprēķina precizitāti, sintezējot jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli un izstrādājot berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodiku.

3. Promocijas darba **mērķis** ir sintezēt jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli berzes pāriem un izstrādāt metodiku berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanai. Berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodikas izstrādē nepieciešams izstrādāt berzes virsmu kontakta modeli, integrējot tajā virsmas tekstūras (3D) parametrus, kā arī precizēt ilgizturības parametra vērtību slīdes berzes pāru nodiluma aprēķinā.

## 2. BERZES VIRSMAS APRAKSTS UN DILŠANAS PROCESA ANALĪZES UN OPTIMIZĀCIJAS PAMATPRINCIPI

### 2.1. Berzes virsmas apraksts, kontakta modelis un tā izejas pamatparametri

Berzes virsmas mikrotopogrāfijas apraksts, īpaši neregulāra virsmas raupjuma gadījumā, ir samērā sarežģīts, ko var izskaidrot ar to, ka virsmas raupjuma izciļņi ir izvietoti dažādos augstumos un pēc formas tiem ir dažāda konfigurācija. Tāpēc praksē attīstījās nelīdzenumu attēlošanas modeļi, kuriem bija pareiza ģeometriskā forma, piemēram, stieņveida, sfēriska, konusveidīga (arī nošķelts konuss), elipsoidāla, cilindriskā, prizmai līdzīga u.c. Tanī pat laikā reālajiem neregulāra virsmas raupjuma profiliem piemīt būtiskas novirzes no iepriekšminētās idealizācijas. Tāpēc zinātnieku centieni ir virzīti uz pēc iespējas pilnīgāku raupjas virsmas profila aprakstu pielietošanu.

Pētot neregulāru virsmas raupjumu, efektīva ir gadījuma funkciju teorijas metode, tādējādi virsmas mikrotopogrāfiju var aprakstīt ar divmēru **gadījuma funkciju**, t.i., gadījuma lauku  $h(x,y)$  ar diviem mainīgajiem  $x$  un  $y$  [55,62,66].

Gadījuma lauks pie nodilušām virsmām tiek pieņemts kā normāls, t.i., tāda lauka ordinātas ir sadalītas pēc normālā sadalījuma likuma [66], to raksturo augstuma parametrs  $Sq$  - vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes,  $\mu m$ .

Svarīgs gadījuma funkcijas raksturlielums ir **korelācijas funkcija**, kas norāda sakarību starp gadījuma funkcijas punktiem, tādējādi jo ātrāk dilst korelācijas funkcija, jo haotiskāks ir gadījuma lauks. Korelācijas funkcija ir atkarīga no diviem mainīgajiem  $\tau_1$  un  $\tau_2$ , kur  $\tau_1$  un  $\tau_2$  ir vektora  $\tau$ , kas savieno divus virsmas punktus, projekcijas uz abscisu un ordinātu ass Dekarta koordinātu sistēmā [66].

Viens no svarīgākajiem zinātnes attīstības etapiem un sasniegumiem izstrādājumu izgatavošanas un kontroles jomā ir saistīts ar virsmas tekstūras (3D) parametru standarta ieviešanu 2012. gadā (*ISO 25178-2:2012*). Jāatzīmē, kas tas būtiski ietekmēja turpmāko ražošanas un zinātnisko pētījumu pieeju, ļaujot uzlabot sasniedzamo rezultātu precizitāti un kvalitāti, kā arī sniedza plašas iespējas fundamentālās zinātnes līmenī, sniedzot iespēju integrēt jaunos parametrus pētījumu apstrādē un analizē, tādējādi attīstot jaunas iespējas pētījumiem līdz šim aktuālo problēmjautājumu risināšanā. Patlaban vairāku zinātnieku pētījumi [43,45-47,49-51,53-54,56-57,91] apliecina, ka virsmas tekstūras (3D) parametri sniedz detalizētāku informāciju par reālo virsmas topogrāfiju, salīdzinot ar 2D parametriem, un ļauj ar lielāku precizitāti analizēt pētījumu rezultātus, kas ir būtisks priekšnosacījums arī šajā promocijas darbā. Balstoties uz iepriekšminēto, apskatītajā virsmas kontakta modelī tiek integrēti raupjas virsmas definēšanai nepieciešamie 3D tekstūras parametri, kas tiks izmantoti turpmāk apskatītajos nodiluma analītiskajos aprēķinos.

**Nemot vērā iepriekšminēto, var nodefinēt neregulāra rakstura berzes virsmas kontakta modeli - virsmas raupjums tiek aprakstīts ar normālo viendabīgo divu mainīgo lielumu  $x$  un  $y$  gadījuma lauku  $h(x, y)$ , kura korelācijas funkcija ir nepārtraukta un tai piemīt nepārtraukti atvasinājumi.** Gadījuma lauka vidējo vērtību pilda plakne, kuru var nosaukt par vidējo plakni. Tādējādi, lai aprakstītu normālo gadījuma lauku, ir jāzina šī lauka matemātiski sagaidāmā vērtība, kā arī korelācijas funkcija. Nezaudējot būtību, var uzskatīt, ka  $E\{h(x, y)\}=0$  [66,67].

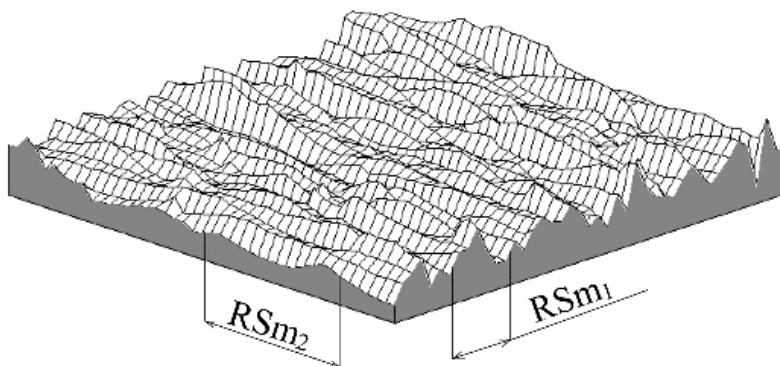
Saskaņā ar [66], apskatot iepriekšminēto parametru kopu un integrējot tekstūras 3D parametrus virsmas apraksta modelī, tiek iegūta 2.1. izteiksme:

$$Sa = \sqrt{\frac{2}{\pi}} Sq. \quad (2.1.)$$

kur  $Sa$  - vidējā aritmētiskā lauka novirze no vidusplaknes,  $\mu\text{m}$ ;

$Sq$  - vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes,  $\mu\text{m}$ .

Savukārt  $\rho(\tau_1, \tau_2)$  dod iespēju noteikt atbilstošos raupjuma soļu parametrus  $RSm_1$  (solis perpendikulāri apstrādes virzienam pa vidusplakni) un  $RSm_2$  (solis apstrādes virzienā pa vidusplakni) (2.1.att.).



2.1. att. Neregulāras virsmas raupjuma soļu parametri .

Soļu parametri  $RSm_1$  un  $RSm_2$  dod iespēju noteikt anizotropijas koeficientu  $Str$  [61]:

$$Str = \frac{RSm_1}{RSm_2} = \frac{n_2(0)}{n_1(0)}. \quad (2.2)$$

kur  $n_1(0)$  un  $n_2(0)$  – nulļu skaits virsmas šķēluma  $x$  un  $y$  divos savstarpēji perpendikulāros virzienos (t.i., virsmas šķērsaupjuma un garenraupjuma virzienos).

Anizotropijas koeficients  $Str$  mainās no  $0 \dots 1$ . Pie  $Str=1$  lauks ir izotrops, bet pie  $Str=0$  maksimāli izstiepts, tādējādi vienā virzienā iegūstot taisnu līniju.

**Tādā veidā var formulēt raupjas virsmas izejas parametru kopu** – pēc augstuma raupju virsmu var aprakstīt izmantojot parametru  $Sa$ , bet pa soļiem – garenvirzienā ar  $RSm_2$  un šķērsvirzienā - ar  $RSm_1$ .

Jāatzīmē, ka piedāvātie virsmas tekstūras (3D) parametri ir tehnoloģiski nodrošināmi virsmas sagatavošanas procesā un viegli nosakāmi ar mūsdienīgiem mēraparātiem, piemēram *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50*, *Mitutoyo FORMTRACER Avant 3D*, u.c.

## 2.2. Nodiluma aprēķina matemātiskais modelis

Lineārā nodiluma  $U_l$ ,  $\mu\text{m}$ , aprēķina procesu var aprakstīt ar 2.3. formulu [67]:

$$U_l = V_\Sigma \cdot \frac{N_{cf}}{N_c}. \quad (2.3.)$$

kur  $V_\Sigma$  – deformētais tilpums pa visu berzes virsmu;

$N_{cf}$  – faktiskais ciklu skaits, kuram tiek pakļauti virsmas izciļņi berzes procesā;

$N_c$  – ciklu skaits, kas izraisa virsmas izciļņu sagraušanas.

Sākotnēji aprēķināsim faktisko ciklu skaitu  $N_{cf}$ , kas divu virsmu berzes procesā iedarbojas uz virsmas izciļņiem un tos slogojot deformē. Balstoties uz [67]  $N_{cf}$ , tiek rēķināts izmantojot 2.4. formulu:

$$N_{cf} = \frac{L_b}{RSm_2^a}. \quad (2.4.)$$

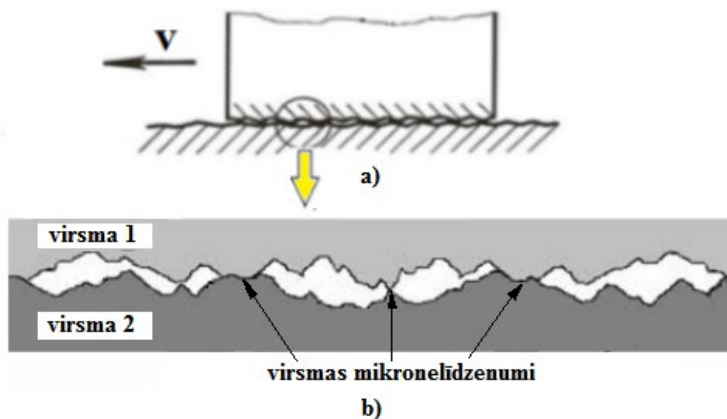
kur  $L_b$  – berzes ceļa garums, m;

$RSm_2^a$  - virsmas raupjuma vidējais solis berzes virzienā virsmai, kas veicina otras virsmas dilšanu (t.i., aktīvai virsmai), tiek mērīts 3D virsmai, mm.

Ciklu skaita  $N_c$  aprēķins, kas noved pie virskārtas izciļņu sagraušanas, ir parādīts turpmākajā nodaļā.

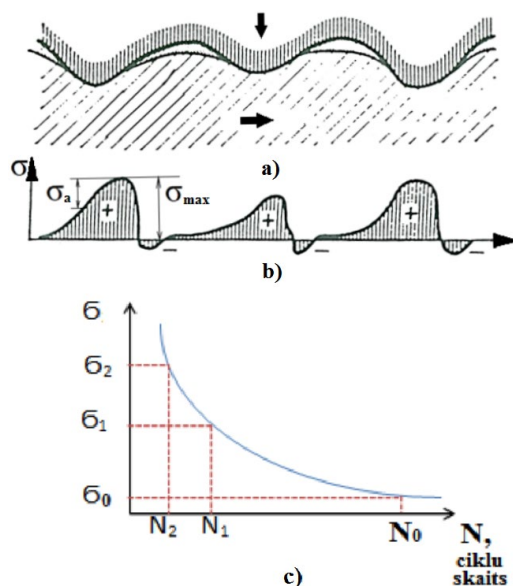
### 2.3. Detaļu virskārtas sagraušanas modelis

Ir virkne pētījumu, kas apliecina dilšanas procesa noguruma dabu [66,67,90]. Tas nozīmē, ka kontaktējošo materiālu dilšanas procesā notiek noguruma plaisu rašanās un izplatīšanās, kas galarezultātā izraisa materiāla daļiņu atdalīšanos. Apskatot divu raupju virsmu kontaktēšanās shēmu (2.2.att.), redzams, ka nelīdzenumu virsmas kontaktā veidojas spriegumi, kas rada priekšnoteikumus materiāla sagraušanai.



2.2. att. Divu raupju virsmu kontaktēšanās shēma:  
a-kontakta shēma, b-izciļņu kontakts [61].

Turpmāk apskatīsim apakšējā ķermeņa reālās virsmas izciļņu iedarbību uz augšējiem izciļņiem (2.3. att.).



2.3. att. Neregulāras raupjas virsmas: izcilņu savstarpējās iedarbības slogošanas shēma (a); spriegumu izmaiņas shēma (b); ciklu skaita noteikšanas līkne (c) [61].

Pie savstarpējās kustības katrs izcilnis, kura augstums pārsniedz zināmu līmeni, kuru nosaka pēc pretējā izcilņa atrašanās vietas, deformē šo izcilni, radot tajā spriegumu lauku. Attēlā 2.3. redzams, ka sprieguma izmaiņas notiek pēc nesimetriska cikla.

Berzes procesā nelīdzenumu deformācijas rezultātā  $\sigma_{\min} \ll \sigma_{\max}$ , tādējādi var pieņemt, ka  $\sigma_{\min} = 0$ . Saskaņā ar nogurumteoriju, izturības robeža  $\sigma_r$  pie nesimetriska cikla ir  $\sigma_0$ , jo indekss “r” ir:

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{0}{\sigma_{\max}} = 0. \quad (2.5.)$$

Ciklu skaitu  $N_c$  līdz materiāla sagraušanai, nosaka, izmantojot 2.5. formulu [90]:

$$N_c = \frac{N_0}{5 \cdot m!} \cdot t_{\sigma}^m. \quad (2.6.)$$

kur  $t_{\sigma}$  – bezdimensionāla (bezizmēra) spriegumu attiecība;

$N_0$  – materiāla izturības ciklu skaits pie asimetriskas slodzes atbilstoši ilgizturības spriegumu vērtībai  $\sigma_0$  (2.3. att. (c));

$m$  – materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs.

Pamatojoties uz [62,90], un ņemot vērā iepriekš aprakstītās sakarības, formula bezdimensionālās (bezizmēra) spriegumu attiecības  $t_{\sigma}$  noteikšanai, ir šāda:

$$t_{\sigma} = \frac{\sigma_0}{\sigma_a}. \quad (2.7.)$$

kur  $\sigma_0$  - materiāla ilgizturības robežspriegums, MPa;

$\sigma_a$  - sprieguma amplitūda, MPa.

Formulās (2.6.) un (2.7.) ietilpstošie parametri  $N_0$ ,  $m$ ,  $\sigma_0$  ir vidējie noteiktam materiāla tipam spriegumus uzņemošajai virsmai.

Formula (2.7.) ietver svarīgu parametru -  $\sigma_a$ , kas ir sprieguma amplitūda. Kā uzsver G.Konrāds [67] un J.Rudzītis [65,66] lielākās sprieguma vērtības, kas darbojas uz virsmas izciļņiem, ir tad, ja kontaktē izciļņu virsotnes. Tad, saskaņā ar [66],  $\sigma_a$ :

$$\sigma_a = \frac{3 \cdot P_i}{2 \cdot \pi \cdot a_i \cdot b_i} \quad (2.8.)$$

kur  $P_i$  – spēks, kas darbojas uz vienu i-to izcilni, N;

$a_i$ ,  $b_i$  – virsmas kontakta laukuma pusasis  $i$ -tam izcilnim.  $a_i$  – lielā elipses pusass, mm;  $b_i$  – mazā elipses pusass, mm;

$\pi$  -matemātiskā konstante.

Spēka  $P_i$  vērtību var atrast izmantojot pieeju, kur spriegumu elastīgā kontaktā nosaka ar nelīdzenuma virsotnes deformācijas lielumu un virsmas raupjuma parametriem, tādējādi pamatojoties uz [65,67] sniegtajiem vienādojumiem, un veicot matemātiskās darbības, sprieguma amplitūdas lielumu  $\sigma_a$ , kuru uzņem viens elipsoidāla tipa izcilnis, rēķina pēc sekojošas formulas:

$$\sigma_a = \frac{(\alpha_i \cdot H)^{1/2}}{\pi \cdot \theta \cdot [E(e) \cdot K(e)]^{1/2}} \quad (2.9.)$$

kur  $\alpha_i$  - nelīdzenuma virsotnes deformācija;

$H_i$  - mikronelīdzenuma vidējais liekums;

$\theta$  - materiāla elastības rādītājs;

$K(e)$ ,  $E(e)$  – 1. un 2. kārtas eliptiskie integrāļi.

Turpmāk, pieņemot, ka deformējas augstie nelīdzenumi, kuru sadalījuma blīvums ir pakāpes funkcija [66], un uzskatot, ka šie augstie nelīdzenumi atrodas virs līmeņa  $\gamma=2$ , iegūsim šādu sakarību:

$$\sigma_a = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot \theta} \cdot \frac{Sq \cdot n_1(0)}{[E(e) \cdot K(e)]^{1/2}} \cdot (1 + Str^2)^{1/2} \quad (2.10.)$$

Tā kā berzes virsmām nelīdzenumi ir izstiepti berzes virzienā, anizotropijas koeficients  $Str \approx 0$ ,  $E(e) \approx 1$ ,  $K(e) \rightarrow \infty$  [67]. Šajā gadījumā var pieņemt  $\theta \approx \frac{1}{\pi \cdot E}$ , jo  $\mu^2 < 0$ .

Izsakot no formulas (2.2.)  $Sq$ , un ievietojot formulā (2.10.) dotos vienkāršojumus, kā arī ņemot vērā to, ka  $n_1(0) = \frac{2}{RSm_1}$  [55], iegūsim  $\sigma_a$  aprēķina vienādojumu:

$$\sigma_a \approx \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E}{[K(e)]^{1/2}} \cdot \frac{Sa}{RSm_1} \quad (2.11.)$$

Šī formula raksturo vidējo sprieguma amplitūdu berzes procesā deformētiem nelīdzenumiem.

Ievietojot (2.11.) materiāla sagraušanas pamatformulā (2.6.), iegūstam gala formulu materiāla sagraušanai nepieciešamo ciklu skaita aprēķinam:

$$N_c \frac{N_0}{5 \cdot m!} \cdot \left[ \frac{\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{\sigma_0 \cdot RSm_l \cdot K(e)^{1/2}}{E \cdot Sa} \right]^m \quad (2.12.)$$

Iegūtās sakarības ļauj noteikt ciklu skaitu, kas nepieciešams materiāla sagraušanai. Šim nolūkam ir jāzina noguruma (*Vellera*) līknes raksturlielumi  $N_0$ ,  $m$ ,  $\sigma_0$  un materiāla elastības modulis  $E$ , kā arī raupjuma solis berzes šķērsvirzienā  $RSm_l$ .

## 2.4. Dilšanas procesa daļiņu tilpuma aprēķins

Tā kā neregulāra rakstura virsmas raupjums dotajā modelī ir aprakstīts ar normālo gadījuma lauku  $h(x,y)$ , tad šāda lauka augstos izciļņus var aprakstīt ar eliptiskiem paraboloīdiem, kuru segmenta tilpums  $V_i$  ir [90]:

$$V_i = \frac{\pi \cdot h_0^2}{K_i^{1/2}} \quad (2.13.)$$

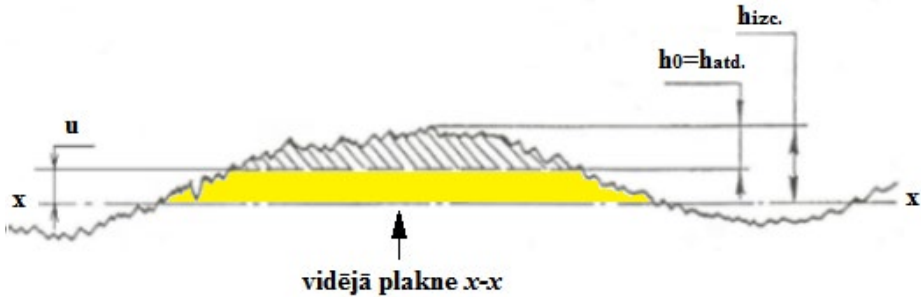
kur  $h_0$  – paraboloīda segmenta augstums mērīts no virsotnes (atdalītās daļiņas biezums), mm;  
 $K_i$  – raupjuma  $i$ -tā izciļņa izliekums.

Savukārt  $K$  [90]:

$$K_i = k_1 \cdot k_2 \quad (2.14.)$$

kur  $k_1$  un  $k_2$  – galvenie  $i$ -tā izciļņa izliekumi pa savstarpēji perpendikulāriem virzieniem ( $k_1 > k_2$ ).

2.4. attēlā parādīts deformētā virsmas izciļņa augstuma parametru novietojums virs virsmas vidējās plaknes  $x-x$ :  $h_{izc.}$  - izciļņa augstums,  $u$  - deformācijas līmenis.



2.4.att. Nodiluma daļiņu iespējamā atdalīšanās no virsmas izciļņa [61].

Atdalītās daļiņas biezums  $h_{atd.}$  ir atkarīgs no virskārtas stāvokļa, uzkalnes zonas lieluma un citiem fizikāli-mehāniskiem faktoriem, kas nosaka daļiņas veidošanos berzes procesā. Ņemot vērā apskatāmā kustīgā kontakta modeļa noteikumus, dilšana var noritēt pēc sekojošas shēmas: pie cikliskas izciļņu virsotņu slogošanas, ņemot vērā materiāla nepilnības, materiāla zemvirsmas slāņos rodas plaisa. Sprieguma lauka ietekmē no slodzes notiek plaisu savienošanās, to augšana un daļiņu atslāņošanās ar biezumu  $h_{atd.}$ . Šeit tiek pieņemts, ka  $h_{atd.} = h_0$ . Lielums  $h_{atd.}$  novērtēts, balstoties uz virskārtas slāņa stāvokļa analīzi. Zinot, ka berzes procesā spriegumi veidojas kontakta laukuma malā, pieņem, ka atdalīšanās notiek virsmas raupjuma deformācijas zonā, kuras augstums ir  $h_{atd.}$  (2.4.att.) [62].

No 2.4. attēla ir redzams, ka spēka ietekmē nelīdzzenuma deformācija nonāk līdz līmenim  $u$  (līmeņa  $u$  normētā vērtība ir  $\gamma = u/Sq$ ).

Pieņemsim, ka virsmas augsto nelīdzenumu virsotnes, kuras uzņem deformāciju, ir sadalītas pēc pakāpju sadalījuma likuma. Tad šo virsotņu ( $\geq 2S_q$ ) vidējais augstums [66,67]:

$$E\{\xi_v\} = \gamma + \frac{1}{\gamma}. \quad (2.15.)$$

kur  $\gamma$  - relatīvais šķēluma augstums normēts ar  $S_q$ .

$\xi_v$  - normētais negludumu augstums ( $\xi_v = h_{izc}/S_q$ ).

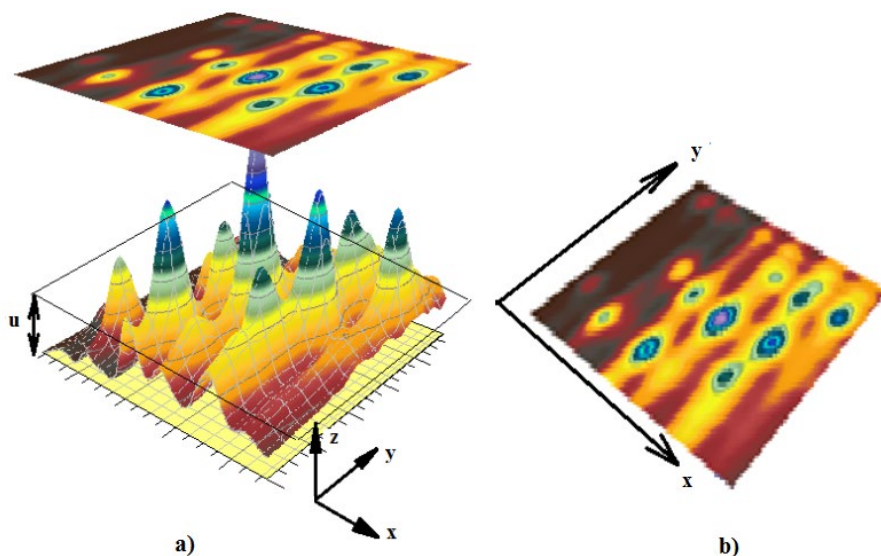
Ņemot vērā iegūtās sakarības, kas tiek analizētas literatūrā [66,67] un veicot matemātiskos aprēķinus, viena i-tā izciļņa atdalītā tilpuma vidējā vērtība  $V_i$  var tikt noteikta sekojoši:

$$V_i \approx \frac{S_q}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \pi \cdot n_1(0) \cdot n_2(0)}. \quad (2.16.)$$

Lai noteiktu visu izciļņu atdalīto summāro tilpumu  $V_\Sigma$ , nepieciešams viena izciļņa iegūto tilpumu  $V_i$  pareizināt ar deformēto izciļņu skaitu  $N_\gamma$ .

## 2.5. Deformēto izciļņu skaita noteikšana

Kā vienu no svarīgākajiem parametriem dilšanas procesā ir jāmin kontaktējošo virsmu izciļņu skaits. Par virsmas  $h(x, y)$  izciļņiem (nelīdzenumiem) tiek saukta raupjas virsmas daļa, kas atrodas virs līmeņa  $u$  (kas tiek noteikts kā šķēluma augstums no vidējās lauka vērtības) (2.5. att.) [63]. Atšķirībā no profila, dotajā gadījumā šķelšana notiek pa nepārtrauktām līknēm, ko var redzēt 2.5.att.(b) (skats uz nošķeltu virsmu no augšas).



2.5. att. Virsmas izciļņu skaita grafisks attēlojums:

(a) - 3D virsmas šķēlums līmenī  $u$ ; (b) - virsmas izciļņu šķēlums līmenī  $u$  skatā no augšas [63].

Izciļņu skaitu  $N_\gamma$  uz laukuma vienību nosaka pēc sekojošas formulas [63]:

$$N_\gamma = k \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2}}. \quad (2.17.)$$

kur  $k$  – koeficients.

Ņemot vērā sakarības, kas dotas [68], koeficients  $k$  tiek rēķināts sekojoši:

$$k = \frac{\pi \cdot n_1(0) \cdot n_2(0)}{2\sqrt{2}\pi}. \quad (2.18.)$$

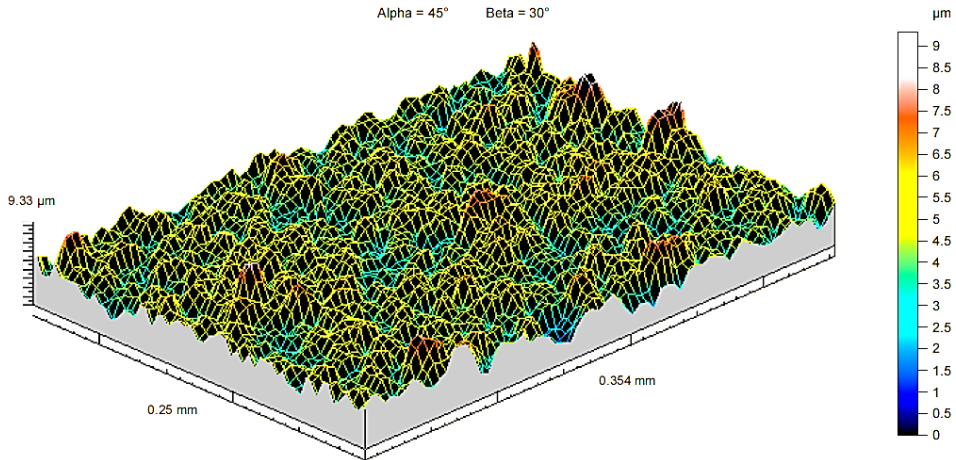
Kā jau iepriekš tika atzīmēts, profila nulļu skaits  $n(0)$  ir saistīts ar virsmas raupjuma soļa parametru  $RSm$  (skat. 2.1.nod.). Tādā gadījumā izciļņu skaitu uz laukuma vienību pēc formulas (2.17.) var aprēķināt sekojoši [65]:

$$N_\gamma \approx \frac{\pi \cdot n_1(0) \cdot n_2(0)}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2}}. \quad (2.19.)$$

Tā kā berzes procesa deformācija notiek ar augstākiem negludumiem, tad var pieņemt  $\gamma \geq 2$  [68] un formula (2.19.) pieņem sekojošu izskatu [67]:

$$N_\gamma = \frac{1}{5} \cdot n_1(0) \cdot n_2(0). \quad (2.20.)$$

Lai pēc (2.11.) formulas pārbaudītu izciļņu skaita aprēķināto vērtību atbilstību, tika veikts eksperiments, kura gaitā tika pārbaudīts kā teorija, kas skar virsmas izciļņu skaita aprēķinu, sakrīt ar eksperimentālajiem rezultātiem. Eksperimentālie mērījumi tika veikti pārklātai virsmai (2.6. att.), izmantojot *Taylor Hobson Intra 50* virsmas tekstūras mēriekārtu.

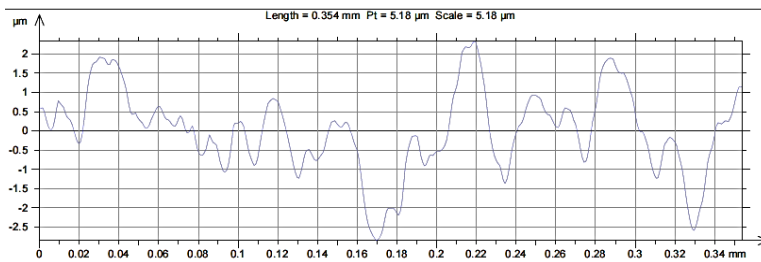


2.6. att. Virsmas 3D tekstūra [63].

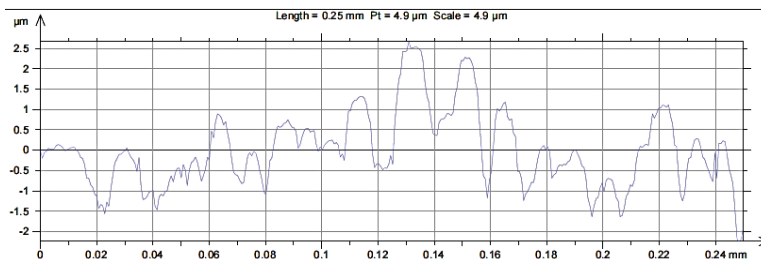
Dotajā gadījumā virsmu raksturo sekojoši galvenie parametri:

$Sa=0.811\mu\text{m}$ ;  $Sds=11624 \text{ pks/mm}^2$  (izciļņu skaits).

Nulļu skaitu un teorētiskajam aprēķinam nepieciešamos lielumus varam atrast izmantojot virsmas profila parametrus (2.7. un 2.8. att.), kas ir apkopoti 2.1.tabulā.



2.7. att. Profils x-ass virzienā (gar parauga garāko malu).



2.8. att. Profils y-ass virzienā (gar parauga īsāko malu) [63].

2.1.tabula

Izmērītie virsmas profila soļu parametri

| Parametrs | Vērtība, mm |
|-----------|-------------|
| $RSm_1$   | 0.0253      |
| $RSm_2$   | 0.0166      |

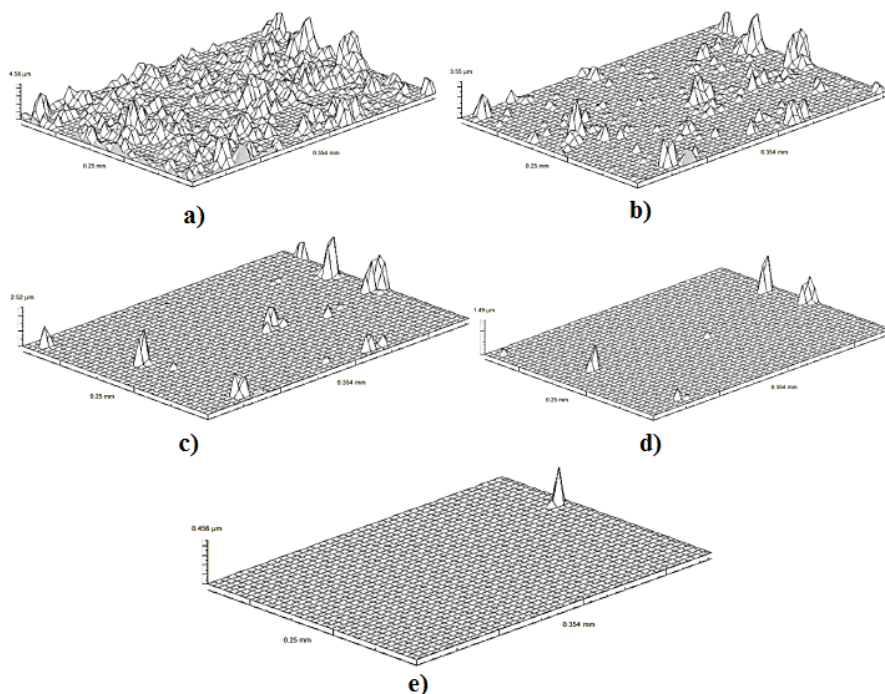
Lai noteiktu virsmas izciļņu skaitu atkarībā no līmeņa  $u$ , virsma tika nošķelta dažādos līmeņos, skaitot no vidējās plaknes. Šķēluma piemēri pie  $u=1Sq$ ,  $u=2Sq$ ,  $u=3Sq$  un  $u=4Sq$  ir doti 2.9. attēlā [64].

Nelīdzenumu skaits, atkarībā no virsmas šķēluma līmeņa, ir dots 2.2. tabulā.

2.2.tabula

Virsmas nelīdzenumu skaits

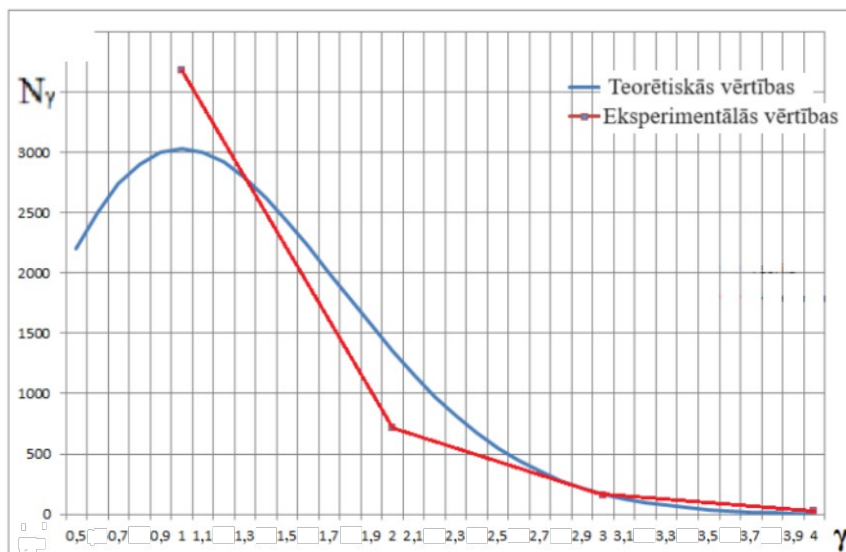
| Virsmas šķēluma līmenis        | Izciļņu skaits $Sds$ , pks/mm <sup>2</sup> |
|--------------------------------|--------------------------------------------|
| virsmas šķēlums pa viduslīniju | 8942                                       |
| 1Sq virs viduslīnijas          | 3679                                       |
| 2Sq virs viduslīnijas          | 713                                        |
| 3Sq virs viduslīnijas          | 158                                        |
| 4Sq virs viduslīnijas          | 22.6                                       |



2.9. att. Virsmas šķēlumi dažādos līmeņos:

(a) - virsmas šķēlums pa viduslīniju; (b) - virsmas šķēlums  $1S_q$  virs viduslīnijas; (c) - virsmas šķēlums  $2S_q$  virs viduslīnijas; (d) - virsmas šķēlums  $3S_q$  virs viduslīnijas; (e) - virsmas šķēlums  $4S_q$  virs viduslīnijas [63].

Izciļņu skaita mērījumu rezultāti un analītisko aprēķinu datu apkopojums ir parādīts 2.10. attēlā.



2.10. att. Eksperimentālais un teorētiskais izciļņu skaits [63].

2.10. attēlā ir redzams, ka virsmas negludumu skaits, kas iegūts saskaņā ar iepriekšminēto aprēķinu modeli, pie augstiem  $\gamma$  līmeņiem ir tuvs eksperimentālajiem datiem. Lielākās novirzes nepārsniedz 5 %, kas ļauj secināt ka teorētiskā aprēķina formula var tikt izmantota izciļņu skaita aprēķinam pie  $\gamma \geq 2,5$ .

Ņemot vērā iepriekšminētās sakarības un veicot matemātiskos aprēķinus ar formulām, kas dotas [66,67], berzes rezultātā atdalīto izciļņu summārais tilpums  $V_{\Sigma}$  tiek rēķināts sekojoši:

$$V_{\Sigma} = V_i \cdot N_{\gamma} = \frac{Sq}{10 \cdot \pi \cdot \gamma^2}. \quad (2.21.)$$

kur  $V_i$  - viena atdalītā i-tā izciļņa tilpuma vērtība;

$N_{\gamma}$  - deformēto izciļņu skaits uz laukuma vienību.

Izsakot no formulas (2.1.) vidējo kvadrātisko novirzi  $Sq$  un ievietojot to formulā (2.21.), galarezultātā iegūstam vienādojumu izciļņu summārā tilpuma uz laukuma vienību aprēķinam:

$$V_{\Sigma} = \frac{Sa \cdot \sqrt{\pi}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \gamma^2}. \quad (2.22.)$$

## 2.6. Nodiluma aprēķina pamatsakarības

Izmantojot formulu (2.3.) un ievietojot tajā (2.4.), (2.12.) un (2.22.) vienādojumus, iegūsim lineārā nodiluma aprēķina formulu:

$$U_l = \frac{5 \cdot m!}{N_0} \cdot \frac{Sa \cdot \sqrt{\pi}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \gamma^2} \cdot \left( \frac{E}{\sigma_0} \right)^m \cdot \left( \frac{Sa}{RSm_l} \right)^m \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot \frac{L_b}{RSm_2^a}. \quad (2.23.)$$

Formula (2.23.) bez iepriekš zināmiem detaļu fizikāli-mehāniskiem parametriem, vēl satur parametru  $\gamma$ , kas tiek noteikts detaļu kontaktā kā relatīvais virsmas deformācijas līmenis. Šo līmeni nosakām dilumam pakļautajai virsmai, izmantojot kontaktteorijas formulas [66]:

$$q = \frac{k_q \cdot Sa}{RSm_l \cdot \theta} \cdot F_l(\gamma). \quad (2.24.)$$

kur  $q$  – slodze uz kontaktējošām virsmām;

$k_q$  – koeficients, kas ir atkarīgs no raupjas virsmas anizotropijas parametra  $Str$ ;

$F_l(\gamma)$  - funkcija, kas ir atkarīga no deformācijas līmeņa  $\gamma$ .

Savukārt slodzi uz kontaktējošām virsmām var atrast, izmantojot sekojošu sakarību:

$$q = \frac{P}{A_a}. \quad (2.25.)$$

kur  $A_a$  – berzes virsmu nominālais kontakta laukums, to nosaka detaļas nominālie izmēri, mm<sup>2</sup>;

$P$  - spēks, kas darbojas uz detaļas kontakta laukumu, N.

Apskatīsim sīkāk kontaktteorijas pamatsakarības (2.24.) piemērošanu nodiluma aprēķiniem. Šajā formulā precizējamie lielumi ir  $F_l(\gamma)$ . Kā rāda eksperimentālie pētījumi, berzes virsmām pēc piestrādes  $\gamma$  atrodas robežās no  $\approx 1,4$  līdz  $\approx 2,7$ , tādējādi aprēķinu vienādojumā varam pieņemt  $\gamma=2$ .

Saskaņā ar [66] berzes virsmām pie  $\gamma=2$ :

$$F_l(\gamma) = \frac{I}{40 \cdot \gamma}. \quad (2.26.)$$

Savukārt  $k_q$  ir atkarīgs no virsmas anizotropijas parametra  $Str$  [66].

Ievietojot iegūtās vērtības formulā (2.24.) varam izteikt  $\gamma$ , kas ir vienāds:

$$\gamma = \frac{k_q \cdot Sa \cdot \pi \cdot E}{40 \cdot RSm_1 \cdot q}. \quad (2.27.)$$

Ievietojot iegūtās sakarības formulā (2.23.) un veicot matemātiskos aprēķinus, iegūstam slīdes berzes pāra vidējā lineārā nodiluma  $U_l$  aprēķina formulu:

$$U_l = 32 \cdot \frac{m!}{N_0 \cdot k_q^2} \cdot \frac{E^{m-2}}{\sigma_0^m} \cdot \frac{Sa^{m-1}}{RSm_1^{m-2}} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot \frac{L_b}{RSm_2^a}. \quad (2.28.)$$

Koeficienta  $k_q$  vērtība aprēķinos tiek ņemta no tabulām (skat. 1.pielikumu), sākotnēji veicot dilstošās berzes virsmas tekstūras (3D) mērījumus un nosakot anizotropijas parametru  $Str$ .

Sasaistot lineāro nodilumu ar berzes virsmu kustības parametriem (salāgoto detaļu savstarpējo kustības ātrumu  $v$  un kustības laiku  $t$ ), iegūsim sekojošu vienādojumu:

$$U_l = 32 \cdot \frac{m!}{N_0 \cdot k_q^2} \cdot \frac{E^{m-2}}{\sigma_0^m} \cdot \frac{Sa^{m-1}}{RSm_1^{m-2}} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot \frac{v \cdot t}{RSm_2^a}. \quad (2.29.)$$

kur  $m$  - dilstošās detaļas materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs;

$N_0$  - dilstošās detaļas materiāla izturības ciklu skaits pie asimetriskas slodzes;

$k_q$  - koeficients, kas atkarīgs no virsmas anizotropijas parametra  $Str$ ;

$E$  - dilstošās detaļas materiāla elastības modulis, MPa;

$\sigma_0$  - dilstošās detaļas materiāla ilgizturības robežspriegums, MPa;

$Sa$  - dilstošās detaļas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes,  $\mu\text{m}$ ;

$RSm_1$  - solis perpendikulāri apstrādes virzienam dilstošajai detaļai, mm;

$\pi$  - matemātiskā konstante;

$K(e)$  - 1. kārtas eliptiskais integrālis;

$q$  - slodze, kas pielikta dilstošajai detaļai, MPa;

$L_b$  - berzes ceļš, m;

$RSm_2^a$  - solis apstrādes (vai berzes) virzienā aktīvajai virsmai, t.i., virsmai, kas veicina otrās virsmas dilšanu, mm;

$v$  - berzes pāra savstarpējās kustības ātrums, m/s;

$t$  - berzes pāra savstarpējās kustības laiks, s.

Savukārt lineārais dilšanas ātrums ir nosakāms sekojoši:

$$V_{U_l} = \frac{U_l(t)}{t} = 32 \cdot \frac{m!}{N_0 \cdot k_q^2} \cdot \frac{E^{m-2}}{\sigma_0^m} \cdot \frac{Sa^{m-1}}{RSm_1^{m-2}} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot \frac{I}{RSm_2^a} \cdot v. \quad (2.30.)$$

Zinot lineāro nodilumu un dilšanas ātrumu, var noteikt berzes pāra kalpošanas laiku:

$$T = \frac{U_l}{V_{U_l}}. \quad (2.31.)$$

Redzams, ka vienādojumā (2.29.) un (2.30.) iesaistīti berzes pāra konstruktīvi-kinemātiskie raksturojumi, berzes pāra detaļu materiālu noguruma raksturojumi, detaļu materiāla mehāniskais raksturlielums un virsmas tekstūras (3D) parametri.

Netiek izslēgts, ka dilšanas procesā var darboties ne tikai noguruma deformāciju ietekme, bet arī abrazīvā, adhezīvā u.c. nodilumu ietekme, kā arī smērvielu un temperatūras ietekme, kā rezultātā nodiluma kvantitatīvās vērtības var būtiski atšķirties no šīs teorijas piedāvātajām.

## 2.7. Parametriskā optimizācija

Reālos mehānismos un mašīnās maksimālais pieļaujamais nodilums  $U_l$  var tikt uzdots. Tad no lineārā nodiluma aprēķina matemātiskā modeļa (2.29.) iespējams iegūt berzes pāra kalpošanas laika kritēriju  $T$  dažādās formās, no kurām raksturīgākās ir aplūkotas zemāk. Optimizācijas piemēru ilustrācijai tiek apskatīti vairāki atsevišķu parametru ietekmes varianti. Piemērs ir balstīts uz berzes pāra tērauds (102Cr6) - bronza (CW307G) eksperimentālajos pētījumos izmantotajiem datiem (skat. 4.5. nod.), paplašinot pētāmo lielumu vērtību intervālu noteiktās robežās.

Dotajā gadījumā  $T$  ir laiks kā optimizācijas kritērijs. Papildus tiek definēta un noteikta konstante  $C$ . Kā mainīgie parametri tiek pieņemti  $x$  un  $y$ , kas ir divi mainīgie parametri no formulas (2.29.).

1. Analizējot parametru  $Sa$  un  $RSm_l$  ietekmi uz kalpošanas laiku un pieņemot, ka šajā un turpmākajos gadījumos  $m = 4$  (dilstošās detaļas materiālam), aplūkosim dotos parametrus ( $x$ ,  $y$  sekojošā formā:

$$T = C_l \cdot \frac{y^2}{x^3}. \quad (2.31.)$$

kur  $x = Sa$ ;

$y = RSm_l$ .

Izsakot  $T$ , iegūstam sekojošu izteiksmi:

$$T = \frac{U_l \cdot N_0 \cdot k_q \cdot \sigma_0^m \cdot RSm_l^{m-2} \cdot RSm_2^a}{32 \cdot m! \cdot E^{m-2} \cdot Sa^{m-1} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot v}. \quad (2.32.)$$

Konstantes  $C_l$  skaitliskā vērtība, pieņemot, ka  $N_0 = 5 \times 10^6$ ,  $k_q = 0,15$ ,  $q = 0,87$  MPa,  $v = 450$  mm/s,  $E = 1,15 \times 10^5$  MPa,  $\sigma_0 = 300$  MPa,  $Sa = 0,00083$  mm,  $RSm_l = 0,017$  mm,  $RSm_2^a = 0,065$  mm:

$$C_l = \frac{U_l \cdot N_0 \cdot k_q^2 \cdot \sigma_0^m \cdot RSm_2^a}{32 \cdot m! \cdot E^{m-2} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot v} = 1,772 \cdot 10^{-2} [\text{mm} \cdot \text{s}]. \quad (2.33.)$$

Parametru  $Sa$  un  $RSm_l$  robežvērtības:

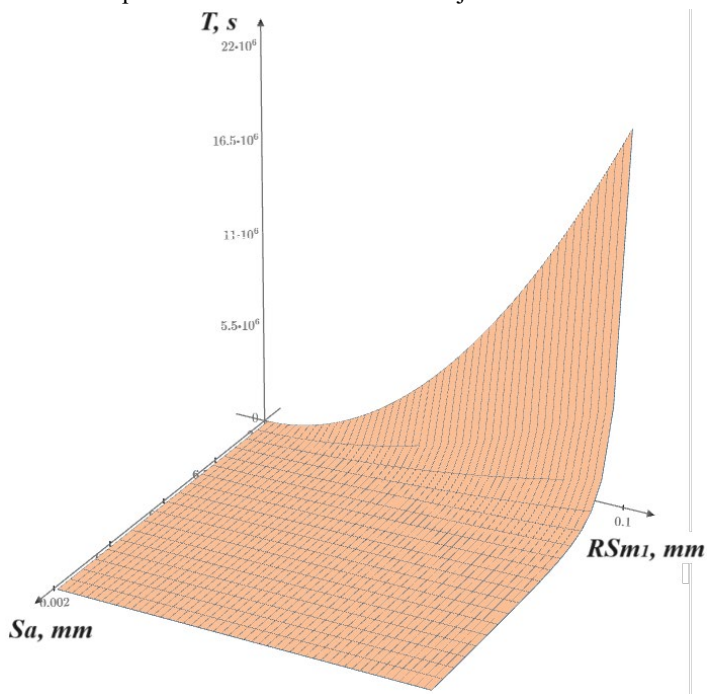
$Sa = 0,0002 \dots 0,002$  mm;

$RSm_l = 0,001 \dots 0,1$  mm.

Ņemot vērā izteiksmi (2.31.),  $T$  aprēķins tiek veikts sekojoši:

$$T(Sa, RSm_l) = \frac{C_l \cdot RSm_l^2}{Sa^3}. \quad (2.34.)$$

2.10. attēlā parādītais grafiks ilustrē slīdes berzes pāra maksimālo kalpošanas laiku, kas var tikt sasniegts pie konkrētām parametru  $Sa$  un  $RSm_I$  skaitliskajām vērtībām.



2.10. att. Maksimālā kalpošanas laika ekstrēms ( $T = 22 \times 10^6$  s) pie  $Sa$  un  $RSm_I$  kā mainīgajiem parametriem.

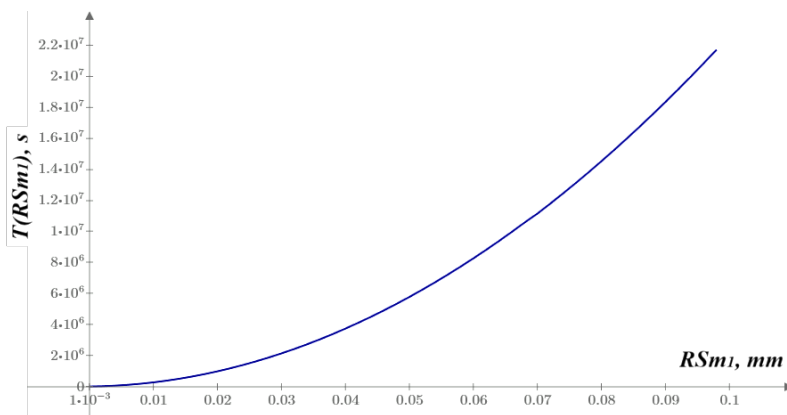
Saskaņā ar ekstrēmu meklēšanas teoriju divu parametru  $x, y$  plaknē varam atrast kritērija parciālos atvasinājumus  $\frac{\partial K}{\partial x}, \frac{\partial K}{\partial y}$  pēc katra mainīgā lieluma  $x$  un  $y$ :

$$\frac{d}{dx} C_I \cdot \frac{y^2}{x^3} = \frac{-3 \cdot C_I \cdot y^2}{x^4}. \quad (2.35.)$$

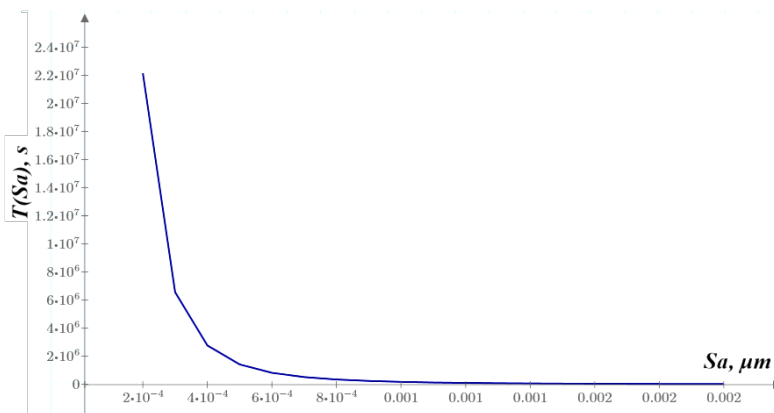
$$\frac{d}{dy} C_I \cdot \frac{y^2}{x^3} = \frac{2 \cdot C_I \cdot y}{x^3}. \quad (2.36.)$$

No izteiksmēm 2.35. un 2.36. seko, ka atvasinājumi pēc  $x$  un  $y$  kā mainīgajiem ir ar pretējām zīmēm, tādējādi optimālais atrisinājums būs uz parametra  $x$  minimālās un parametra  $y$  maksimālās robežām:  $x = x_{\min}, y = y_{\max}$ , t.i., slīdes berzes pāra kalpošanas laiks pie  $Sa = 0,0002$  mm un  $RSm_I = 0.1$  mm veidos  $2,2 \times 10^7$  sekundes, t.i., 6111 stundas.

Berzes pāra kalpošanas laika aprēķina vizualizācijas piemērs, analizējot katru parametru atsevišķi, t.i., pieņemot, ka  $Sa$  parametrs ir ar minimālo vērtību, parādīts 2.11. attēlā un gadījums, kad  $RSm_I$  ir ar maksimālo vērtību - 2.12. attēlā.



2.11. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no  $RSm_I$ .



2.12. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no  $Sa$ .

Dotā analīze rāda, ka nodrošinot mehānisma izstrādes procesā atbilstošās salāgojamo detaļu kontaktvirsmu tekstūras parametru  $Sa$  un  $RSm_I$  vērtības, t.i., samazinot  $Sa$  un palielinot  $RSm_I$ , iespējams panākt lielāku berzes pāra kalpošanas resursu vai arī atrast tādas optimālās vērtības, pie kurām būs panākts kompromiss starp kalpošanas laiku un virsmas tekstūras parametru ( $Sa$  un  $RSm_I$ ) lielumiem.

2. Analizējot ātruma  $v$  un slodzes  $q$  ietekmi uz kalpošanas laiku, aplūkosim dotos parametrus ( $x, y$ ) sekojošā formā:

$$T = C_2 \frac{I}{x^2 \cdot y}. \quad (2.37.)$$

kur  $x = q$ ;

$y = v$ .

Konstantes  $C_2$  skaitliskā vērtība, saglabājot vienādojumā (2.32.) izejas datus, kas ir analogiski iepriekšējā punktā noteiktajiem:

$$C_2 = \frac{U_I \cdot N_0 \cdot k_q^2 \cdot \sigma_0^m \cdot RSm_I^{m-2} \cdot RSm_2^a}{32 \cdot m! \cdot E^{m-2} \cdot Sa^{(m-1)} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m} = 3,05 \cdot 10^6 [\text{mm} \cdot \text{MPa}^2]. \quad (2.38.)$$

Parametru  $q$  un  $v$  robežvērtības tika izvēlētas tādā diapazonā, lai iekļautu vērtības, kas tika izmantotas eksperimentālajos pētījumos (4. nod.):

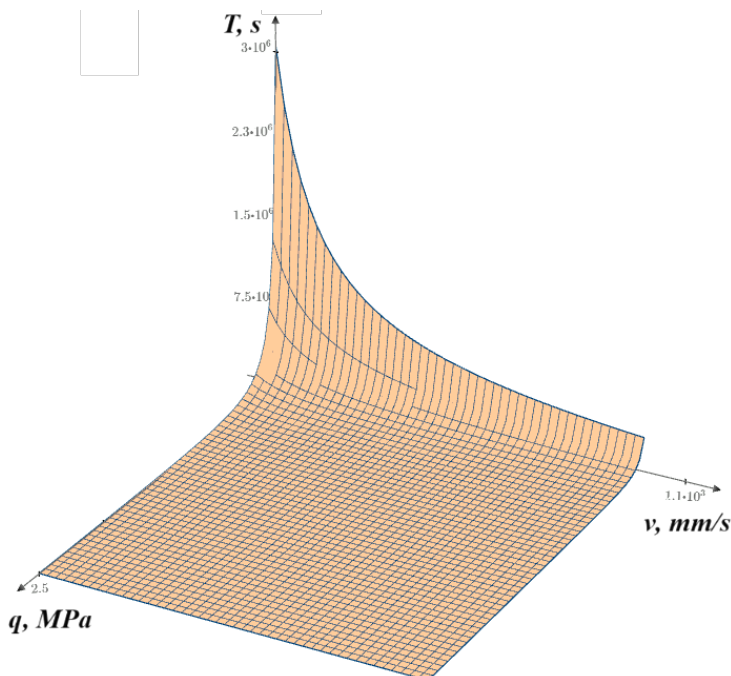
$q=0.1...2,5$  MPa;

$v=100...1000$  mm/s.

Ņemot vērā 2.37. izteiksmi,  $T$  aprēķins tiek veikts sekojoši:

$$T(q, v) = \frac{C_2}{q^2 \cdot v}. \quad (2.39.)$$

2.13. parādītais grafiks ilustrē maksimālo kalpošanas laiku, mainot parametru  $q$  un  $v$  skaitliskās vērtības.



2.13. att. Maksimālā kalpošanas laika ekstrēms ( $T = 3 \times 10^6$  s) pie  $q$  un  $v$  kā mainīgajiem parametriem.

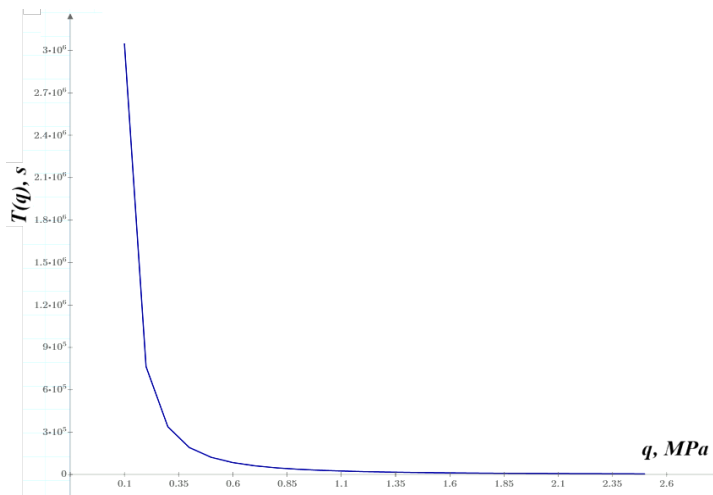
Saskaņā ar ekstrēmu meklēšanas teoriju divu parametru  $x, y$  plaknē varam atrast kritērija parciālos atvasinājumus  $\frac{\partial K}{\partial x}, \frac{\partial K}{\partial y}$  pēc katra mainīgā lieluma  $x$  un  $y$ :

$$\frac{d}{dx} \frac{C_2}{x^2 \cdot y} = \frac{-2 \cdot C_2}{x^3 \cdot y}. \quad (2.40.)$$

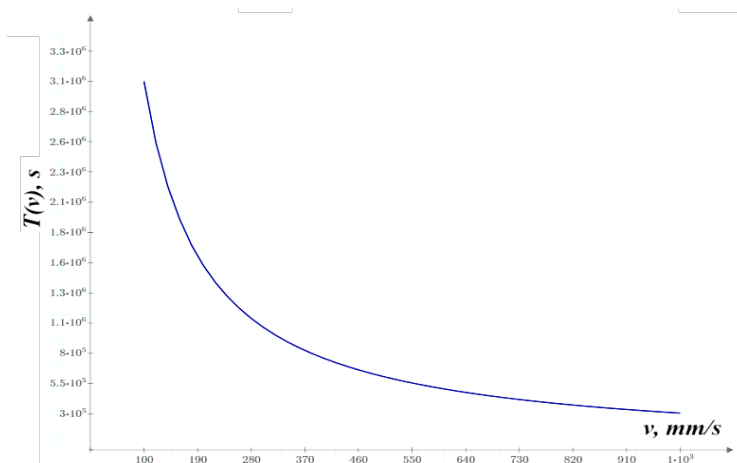
$$\frac{d}{dy} \frac{C_2}{x^2 \cdot y} = \frac{-C_2}{x^2 \cdot y^2}. \quad (2.41.)$$

No izteiksmēm 2.40. un 2.41. seko, ka atvasinājums pēc  $x$  un  $y$  kā mainīgajiem abos gadījumos ir negatīvs, tādējādi optimālais atrisinājums būs uz parametra  $x$  un  $y$  minimālām robežām:  $x = x_{\min}, y = y_{\min}$ , t.i., slīdes berzes pāris pie  $q = 0,1$  MPa un  $v = 100$  mm/s nokalpos  $3 \times 10^6$  sekundes, t.i., 833 stundas.

Berzes pāra kalpošanas laika aprēķina vizualizācijas piemērs, kad parametrs  $q$  ir ar minimālo vērtību, parādīts 2.14. attēlā un kad  $v$  ir ar minimālo vērtību - 2.15. attēlā.



2.14. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no  $q$ .



2.15.att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no  $v$ .

Kā redzams, maksimālo kalpošanas laiku berzes pāris var sasniegt pie nosacījumiem, kad tiek samazināts berzes pāra kontaktvirsmu slīdēšanas ātrums  $v$  un slodze  $q$ .

3. Analizējot parametru  $Sa$  un  $RSm_2^a$  ietekmi uz kalpošanas laiku, aplūkosim dotos parametrus  $(x, y)$  sekojošā formā:

$$T = C_3 \cdot \frac{y}{x^3}. \quad (2.42.)$$

kur  $x = Sa$ ;

$$y = RSm_2^a.$$

Konstantes  $C_3$  skaitliskā vērtība:

$$C_3 = \frac{U_l \cdot N_0 \cdot k_q^2 \cdot \sigma_0^m \cdot RSm_1^{m-2}}{32 \cdot m! \cdot E^{m-2} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot \nu} = 7,878 \cdot 10^{-5} [\text{mm}^2 \cdot \text{s}]. \quad (2.43.)$$

Arī dotajā gadījumā parametru  $Sa$  un  $RSm_2^a$  robežvērtības tika izvēlētas, ņemot vērā eksperimentālos datus, paplašinot šo parametru vērtību diapazonu:

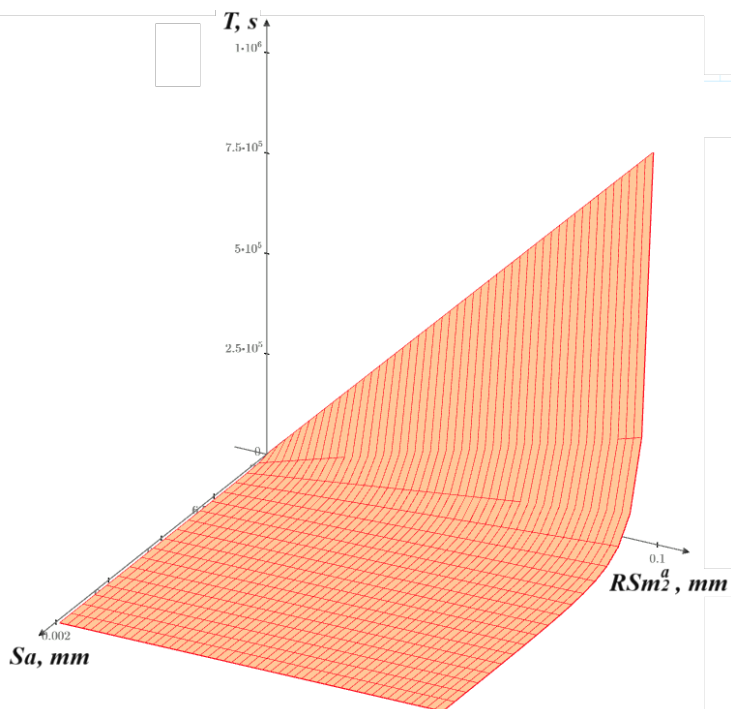
$Sa = 0,2 \dots 2 \mu\text{m};$

$RSm_2^a = 0,001 \dots 0,1 \text{ mm}.$

Ņemot vērā izteiksmi 2.42.,  $T$  aprēķins tiek veikts sekojoši:

$$T(Sa, RSm_2^a) = \frac{C_3 \cdot RSm_2^a}{Sa^3}. \quad (2.44.)$$

2.16. attēlā parādītais grafiks ilustrē maksimālo kalpošanas laiku, mainot parametru  $Sa$  un  $RSm_2^a$  skaitliskās vērtības.



2.16. att. Maksimālā kalpošanas laika ekstrēms ( $T=9,8 \times 10^5 \text{ s}$ ) pie  $Sa$  un  $RSm_2^a$  kā mainīgajiem parametriem.

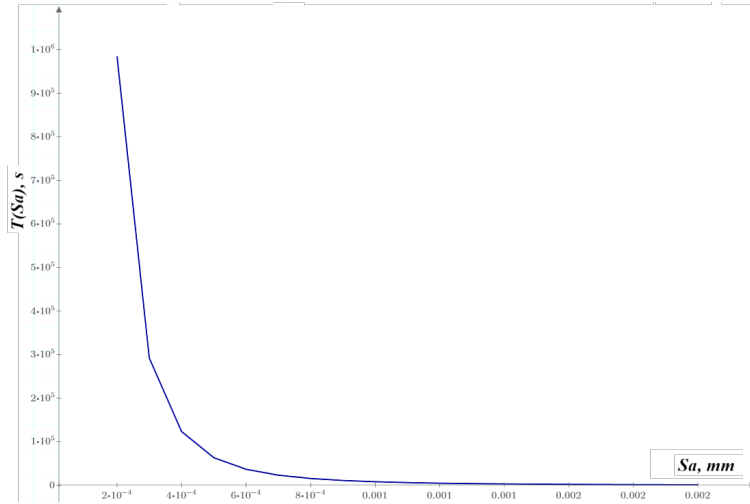
Saskaņā ar ekstrēmu meklēšanas teoriju divu parametru  $x, y$  plaknē varam atrast kritērija daļiālos atvasinājumus  $\frac{\partial K}{\partial x}, \frac{\partial K}{\partial y}$  pēc katra mainīgā lieluma  $x$  un  $y$ :

$$\frac{d}{dx} \frac{C_3 \cdot y}{x^3} = \frac{-3 \cdot C_3 \cdot y}{x^4}. \quad (2.45.)$$

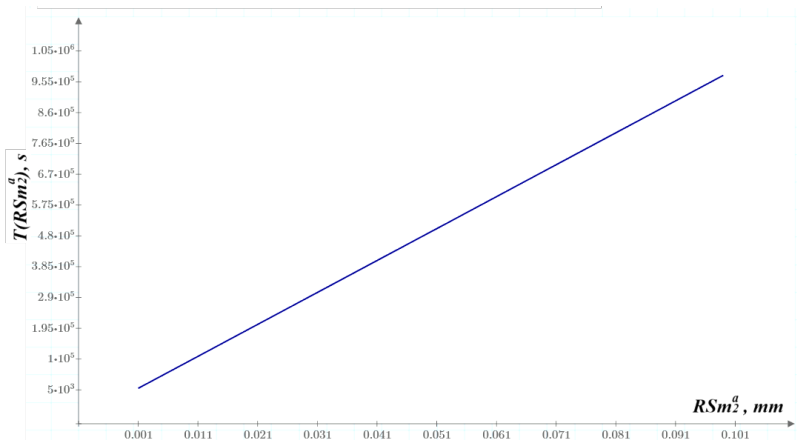
$$\frac{d}{dy} \frac{C_3 \cdot y}{x^3} = \frac{C_3}{x^3}. \quad (2.46.)$$

No izteiksmēm 2.45. un 2.46. seko, ka atvasinājumi pēc  $x$  un  $y$  kā mainīgajiem ir ar pretējām zīmēm, tādējādi optimālais atrisinājums būs uz parametra  $x$  minimālās un parametra  $y$  maksimālās robežām:  $x = x_{\min}$ ,  $y = y_{\max}$ , t.i., slīdes berzes pāris pie  $Sa = 0,0002$  mm un  $RSm_2^a = 0,1$  mm nokalpos  $9,8 \times 10^5$  sekundes, t.i., 272 stundas.

Berzes pāra kalpošanas laika aprēķina vizualizācijas piemērs, kad  $Sa$  parametrs ir ar minimālo vērtību, parādīts 2.17. attēlā un gadījums, kad  $RSm_2^a$  ir ar maksimālo vērtību - 2.18. attēlā.



2.17. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no  $Sa$  vērtībām.



2.18. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no  $RSm_2^a$  vērtībām.

Līdzīgi kā iepriekš apskatītajā 1.variantā, samazinot  $Sa$  nodilums samazinās, t.i., pieaug kalpošanas laiks. Palielinot soli  $RSm_2^a$  berzes virsmai, kas aktivizē dilumu, kalpošanas laiks arī pieaug, jo lielāks ir šis solis, jo retākiem triecieniem kustības laikā tiek pakļauti dilstošās virsmas izciļņi.

## 2.8. Secinājumi

1. Lai palielinātu berzes pāra kalpošanas laiku, tika veikta parametriskā optimizācija, izmantojot izstrādāto berzes pāra nodiluma prognozēšanas analītisko modeli, analizējot virsmas tekstūras (3D) parametru, ātruma un slodzes ietekmi uz berzes pāra kalpošanas laiku.
2. Secināts, ka, par galveno kritēriju nosakot kalpošanas laiku un apskatot 3D tekstūras parametrus un to dažādas kombinācijas, kā arī ātrumu un slodzi, iespējams atrast tādas optimālās parametru vērtības, pie kurām slīdes berzes pārim tiks nodrošināts maksimālais kalpošanas laiks pie berzes pāra nodiluma prognozēšanas matemātiskajā modelī iekļauto pārējo parametru konstantiem lielumiem. Parametriskās optimizācijas analīze rāda, ka, samazinot  $Sa$ ,  $v$ ,  $q$  un palielinot  $RSm_1$  un  $RSm_2^a$ , iespējams palielināt berzes pāra kalpošanas resursu vai arī atrast tādas optimālās vērtības, pie kurām būs panākts kompromiss starp kalpošanas laiku un iepriekš minētajiem parametriem.
3. Optimizējot parametru vērtības un redzot, kā tās ietekmē nodiluma lielumu, iespējams jau projektēšanas etapā izvēlēties atbilstošos virsmas tekstūras (3D) parametrus, slodzes un ātruma parametrus, pie kuriem varēs nodrošināt mazāko berzes pāra nodilumu. Līdz ar to izstrādāto berzes pāra nodiluma prognozēšanas analītisku modeli var izmantot gan tiešajam uzdevumam, t. i., izejot no zināmiem parametriem, aprēķināt prognozējamo nodilumu, gan apgrieztam uzdevumam – veikt parametrisko optimizāciju ar mērķi sasniegt maksimālo kalpošanas laiku konkrētam berzes pārim.

### 3. PIRMĀ POSMA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

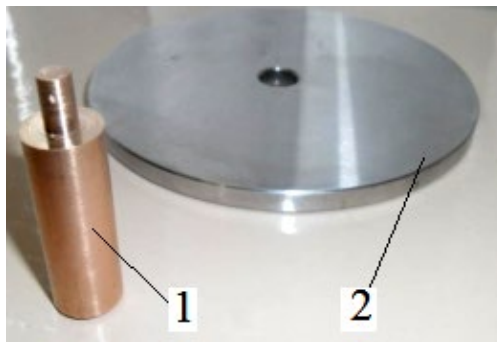
Pirmā posma priekšizpētes eksperimentālo pētījumu mērķis ir pārbaudīt analītiskā aprēķina vienādojuma (1.22.) iegūto rezultātu atbilstību eksperimentam un novērtēt nodiluma aprēķina modeļa atbilstību praktisko inženieruzdevumu risināšanā, veicot nodiluma prognozēšanu, kas iepriekš netika veikts.

#### 3.1. Materiāla izvēle un paraugu sagatavošana

Eksperimentālajiem pētījumiem berzes un nodiluma procesa realizācijai tika izvēlēta shēma “rullītis-disks”, kas nodrošina ērtu iespēju veikt mērījumus paraugiem pirms eksperimenta, nosakot kontakta laukumu, kā arī ļauj pētījumu laikā veikt kontrolmērījumus un noteikt nodiluma lielumu.

Nodiluma pētījumiem tika izvēlēti šādi paraugi:

- 1) Cilindriskas formas piespiedējrullītis (3.1.att.) ar diametru 12 mm, kas nepieciešamā kontakta laukuma nodrošināšanai var tikt apvirpots uz nepieciešamo diametru (dotajā eksperimentā piespiedējrullīša diametrs kontakta vietā sastāda 6,5 mm). Piespiedējrullīša materiāls - bronza (CuSn8, DIN 2.1030).
- 2) Disks ar diametru 100 mm un biezumu 6 mm. Diska materiāls - tērauds (42Cr4, DIN 17212).



3.1. att. Slīdes berzes paraugi.

Paraugu materiāla izvēles pamatojums ir saistīts ar to, ka līdzīga veida berzes pāri tiek izmantoti detaļu salāgojumos virknē mašīnbūves iekārtu, automobiļa iekšdedzes motoros (kloķvārpstas pamatrēdze/klaņa rēdze un pamatgultnis/klaņa gultnis), kā arī citos mehānismos, kur nepieciešams nodrošināt slīdes tipa kontaktu gan sausa veida, gan arī eļļotām virsmām.

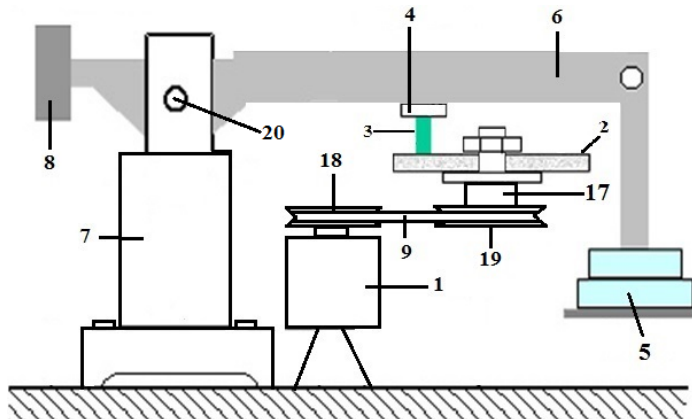
Pirms eksperimenta paraugi tika apstrādāti ar smilšpapīru ar dažādu abrazīvo graudu gradāciju, tādējādi panākot nepieciešamo paraugu kontaktējošo virsmu raupjumu. Pēc paraugu virsmas slīpēšanas operāciju pabeigšanas abi paraugi tika notīrīti ar acetona iemērkto salveti, panākot paraugu virsmas atbrīvošanu no metāla skaidiņām un smilšpapīra abrazīva.

Pēc slīpēšanas abiem paraugiem tika veikti virsmas raupjuma parametru kontrolmērījumi atbilstoši EN ISO 4287 standartam (mērījumu rezultāti parādīti turpmāk). Bronzas piespiedējrullītim tika veikta arī garuma kontrole ar digitālo mikrometru ar precizitāti 0,001 mm, kā arī noteikta masa.

### 3.2. Izmantotās iekārtas, mērinstrumenti un programmatūra

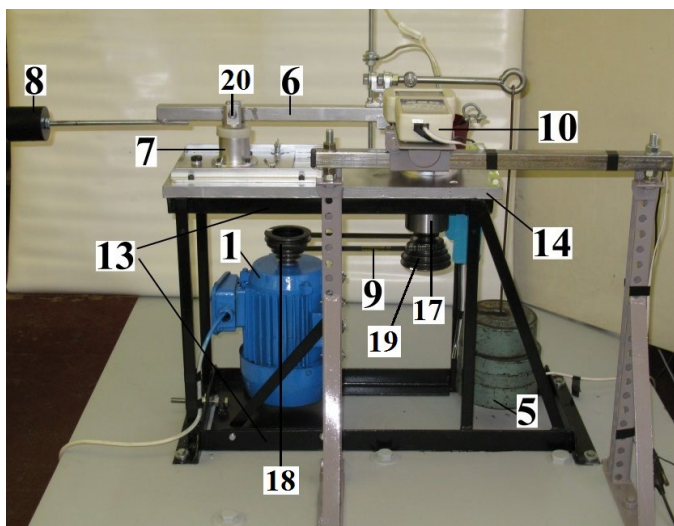
Šajā etapā dilšanas procesa eksperimentālajiem pētījumiem tika izmantota promocijas darba autora projektēta un pašizgatavota berzes un dilšanas procesa pētījumu iekārta ar 300 N lielu maksimālo parauga slogošanas spēku. Iekārta ir paredzēta promocijas darba uzdevuma risināšanai, var tikt izmantota arī turpmākos pētījumos.

Iekārtas principiālā shēma un kopskats ir parādīti attēlos 3.2., 3.3. un 3.4.



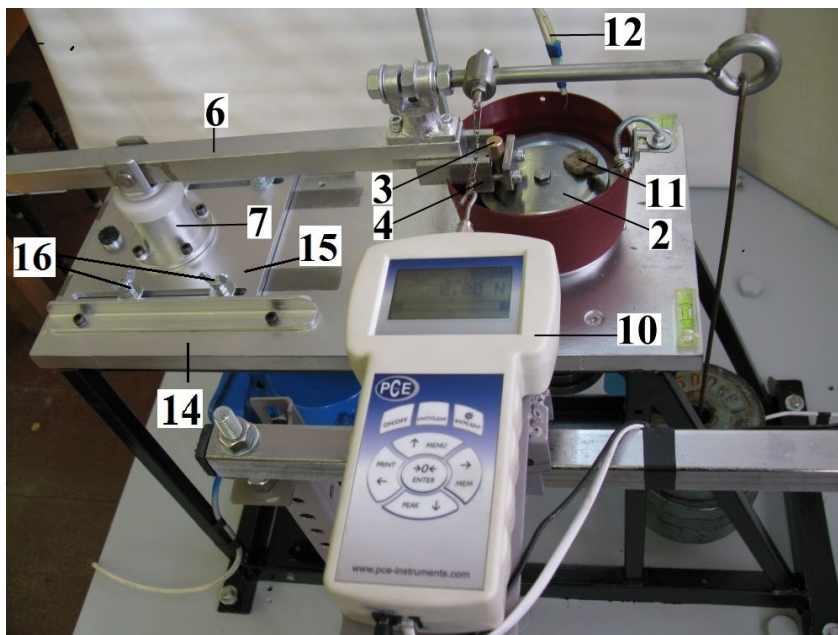
3.2. att. Berzes un dilšanas procesa pētījumu iekārtas principiālā shēma:

1-elektromotors, 2-rotējošs disks, 3-piespiedējruļītis (pārbaudāmais materiāls), 4-piespiedējruļīša turētājs, 5-slogošanas atsvari, 6-slogošanas svārstsvira, 7-slogošanas svārstsviras fiksācijas ass gultņu korpus, 8-atsvars, 9-siksnas pārvads, 17-vārpstas gultņu korpus, 18-dzenošais skriemelis, 19-dzītais skriemelis, 20-slogošanas svārstsviras pagrieziens ass.



3.3. att. Berzes un dilšanas procesa pētījumu iekārtas kopskats:

1-elektromotors, 5-slogošanas atsvari, 6-slogošanas svārstsvira, 7- slogošanas svārstsviras fiksācijas ass gultņu korpus, 8-atsvars, 9-siksnas pārvads, 10-spēka mērīšanas iekārta PCE-FG50, 13-nesošais rāmis, 14-plāksne, 17-vārpstas gultņu korpus, 18-dzenošais skriemelis, 19-dzītais skriemelis, 20-slogošanas svārstsviras pagrieziens ass.



3.4. att. Berzes un dilšanas procesa pētījumu iekārta (tuvplāns):

2-rotējošs disks, 3-piespiedējrullītis (pārbaudāmais materiāls), 4-piespiedējrullīša turētājs, 6-svārstsvira, 7-svārstsviras atbalsts, 10-spēka mērīšanas iekārta *PCE-FG50*, 11-eļļošanas izkliedētājšvammīte; 12-eļļas padeves kanāls, 14-plāksne, 15-slogošanas svārstsviras pārvietošanas plāksne, 16-pārvietošanas plāksnes fiksatori.

Berzes un dilšanas procesa pētījumu iekārta (turpmāk - berzes iekārta) sastāv no nesošā rāmja (13), uz kura tiek stiprinātas pārējās detaļas un mezgli. Iekārtas darbība ir sekojoša: elektromotors (1) ar siksnas pārvadu (9) piedzen korpusā (17) iegultu vārpstu, uz kuras atbalstatloka stiprina rotējošu disku (2). Rotējošā diska apgriezienus iespējams mainīt izvēloties attiecīgos dzenošā (18) un dzītā (19) skrimeļa diametrus. Pret rotējošo disku (2) eksperimentu laikā tiek piespiests cilindrisks piespiedējrullītis (3), kas dotajā gadījumā ir pārbaudāmais bronzas paraugs. Rotējošais disks (2) un piespiedējrullītis (3) veido berzes pāri. Piespiedējrullītis (3) tiek stiprināts piespiedējrullīša turētājā (4), kas ir uzmontēts uz slogošanas svārstsviras (6). Slogošanas svārstsvira (6) var svārstīties ap savu asi (20) gan vertikālā virzienā, gan arī rotēt horizontālā virzienā, ko nodrošina svārstsviras fiksācijas ass (20), kas ir iegultā korpusā (7). Rullīša (3) piespiešana tiek nodrošināta izmantojot atsvarus (5).

Lai izmērītu berzes spēku, kas rodas starp rotējošo disku (2) un piespiedējrullīti (3), svārstsvira (6) tiek savienota ar spēka mērīšanas iekārtu *PCE-FG50* (10). Spēka mērīšanas iekārta (10) ir savienota ar datoru, izmantojot *USB* pieslēgumu, tādējādi eksperimenta laikā uzņemtie mērījumi tiek saglabāti. Slogošanas svārstsvira (6) ir uzstādīta uz pārvietojamas plāksnes (15), kas ļauj mainīt berzes pāra darbības rādiusu kontaktvietā, tādējādi, variējot ar apgriezieniem un berzes pāra kontaktdiametru, iespējams iestatīt nepieciešamo slīdes ātrumu. Berzes iekārta ļauj veikt pētījumus gan sausā berzes pāra kontakta gadījumā, gan arī nodrošinot eļļošanu. Lai nodrošinātu nepieciešamo berzes koeficienta lielumu, berzes pāra kontakta vietā pa eļļas padeves kanālu (12) caur eļļošanas izkliedētājšvammīti tiek vienmērīgi pievadīta eļļa zonā, kur notiek berzes pāra kontakts. Izmantotā eļļa kopā ar nodiluma produktiem tiek novadīta uz eļļas savācējvertni.

Berzes spēka mērīšanai un berzes koeficienta noteikšanai tika izmantota spēka mērīšanas iekārta *PCE-FG50* ar mērīšanas precizitāti 0.01 N (spēka mērīšanas robežas – 0...50 N). Izmērītie parametru dati tika apkopoti, izmantojot datu apstrādes programmatūru *PCE-FG*.

Nepieciešamo raupjuma parametru mērījumi tika veikti izmantojot portatīvo profilometru *Taylor Hobson SURTRONIC 25* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija).

Piespiedējruļlīša garuma kontrolei pirms eksperimenta un eksperimenta attiecīgajos posmos tika izmantots digitālais mikrometrs *Mitutoyo* (*Mitutoyo*, Japāna) ar precizitāti 0.001 mm (mērīšanas robežas - 25...50 mm).

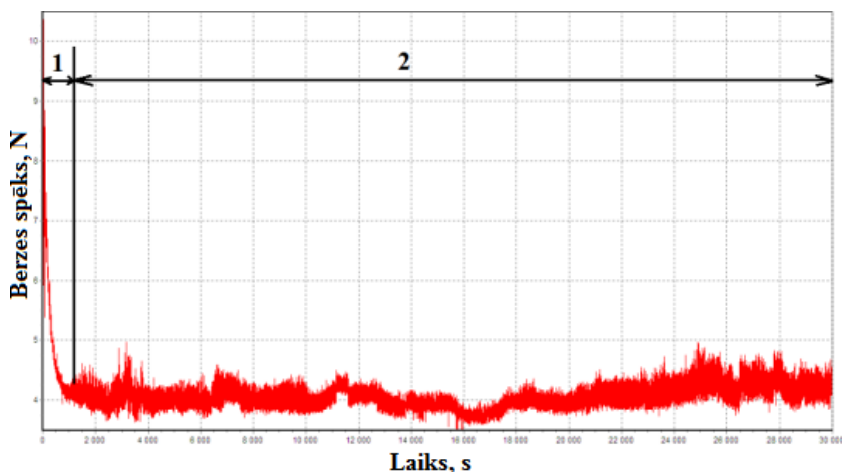
Rotējošās vārpstas, uz kuras tika stiprināts disks, apgriezienu kontrolei tika izmantota apgriezienu mērīšanas iekārta *Alluris SMF-50*.

Eksperimenta gaitā iegūto datu turpmākai apstrādei un analīzei tika pielietotas datu apstrādes un analīzes programmas *Microsoft Excel* un *MathCad*.

### 3.3. Eksperimenta darbu secība un mērījumu veikšana

Pēc 3.1. nodaļā aprakstītajiem paraugu sagatavošanas darbiem, abi paraugi tika nostiprināti berzes iekārtā. Pēc iepriekš veiktajiem eksperimentālajiem priekšizpētes darbiem, tika izvēlēts un iestatīts slogošanas spēks, kas nodrošināja uz bronzas parauga pētāmās un dilumam pakļautās virsmas 11 MPa lielu spiedienu. Izvēloties berzes iekārtā nepieciešamo siksnas pārvada attiecību un eksperimentālo paraugu kontakta diametru, tika iestatīts 5 m/s liels slīdes ātrums uz bronzas parauga kontakta virsmas un tika uzsākts eksperiments. Berzes koeficienta nodrošināšanai robežās  $<0,1$  starp abu paraugu virsmām eksperimentu laikā tika pievadīta eļļa (SAE 10W-40), kas tika pilināta uz eļļošanas izklieģētājšvammītes un pakāpeniski uzmērēta uz virsmas, tādējādi panākot berzes virsmas vienmērīgu eļļošanu.

Pamatojoties uz to, ka 1.22. formula paredz analītiskajam aprēķinam virsmas raupjuma parametrus noteikt pēc piestrādes procesa beigām, tad pētījumā piestrādes process tika kontrolēts vadoties pēc berzes koeficienta nostabilizēšanās (3.5.att.).



3.5. att. Berzes spēks laikā:  
1-piestrādes periods; 2-normālais dilšanas periods.

Pēc piestrādes paraugiem tika veikti virsmas raupjuma parametru mērījumi. Bronzas piespiedējruļlītim tiek veikts arī garuma mērījums un noteikts piestrādes periodā izveidojies nodilums. Pēc mērījumu veikšanas tiek turpināti uzsāktie eksperimenti un bronzas ruļlīša garums tiek kontrolēts pēc noteikta laika, tādējādi nosakot eksperimentālo nodilumu katrā mērījumu reizē. Dilšanas laiks līdz katram mērījumam ir parādīts 3.2. tabulā.

### 3.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze

Eksperimentā un analītiskajos aprēķinos (1.22. formula) izmantotie lielumi ir apkopoti tabulā 3.1. Sakarā ar to, ka nodiluma pirmajā etapā notiek salāgoto detaļu virsmu piestrāde un berzes procesā ietilpstošie parametri pietiekami strauji maina savas vērtības, vienādojums (1.22.) paredz, ka nodilums tiek rēķināts normālam ekspluatācijas periodam, ņemot vērā nomērītos virsmas raupjuma parametru pēc piestrādes, kad berzes process ir nostabilizējies, par ko šajā gadījumā tika spriests pēc 3.5.att. redzamajām berzes spēka vērtībām.

3.1.tabula

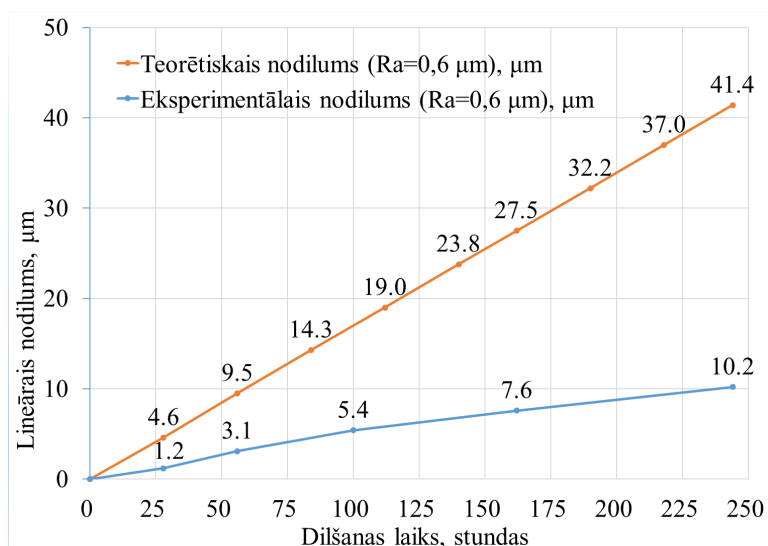
Eksperimentālajā pētījumā iestatītie lielumi un virsmas raupjuma parametri pēc piestrādes

| Parametrs                                                                   |                                                           | Apzīmējums    | Skaitliskā vērtība | Mērvienība    |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Slodze                                                                      |                                                           | $q$           | 11                 | MPa           |
| Slīdes berzes ātrums                                                        |                                                           | $v$           | 5000               | mm/s          |
| Piespiedējruļlīša (bronzā, CuSn8) materiāla noguruma sagraušanas parametri: | Materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs    | $m$           | 4                  | -             |
|                                                                             | Materiāla izturības robeža pie simetriska slogojuma cikla | $\sigma_{-1}$ | 150                | MPa           |
|                                                                             | Materiāla izturības ciklu skaits                          | $N_0$         | $5 \times 10^6$    | -             |
| Piespiedējruļlīša materiāla elastības modulis                               |                                                           | $E$           | $1,15 \times 10^6$ | MPa           |
| Virsmas raupjuma parametri (pēc piestrādes)                                 | Virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze               | $Ra$          | 0,6                | $\mu\text{m}$ |
|                                                                             | Dilstošās detaļas (piespiedējruļlīša) vidējais solis      | $Sm_1$        | 0,060              | mm            |
|                                                                             | Nodilumu aktivizējošās virsmas (diska) vidējais solis     | $Sm_2^a$      | 0,5                | mm            |
| Nodilums pēc piestrādes                                                     |                                                           | $U_p$         | 7                  | $\mu\text{m}$ |

Ņemot vērā tabulā 3.1. apkopotos parametrus un veicot aprēķinu pēc formulas (1.22.), lineārā nodiluma aprēķinātās vērtības ir apkopotas 3.2. tabulā un nodiluma līknes parādītas 3.6. attēlā.

Eksperimentālais un analītiski aprēķinātais lineārais nodilums

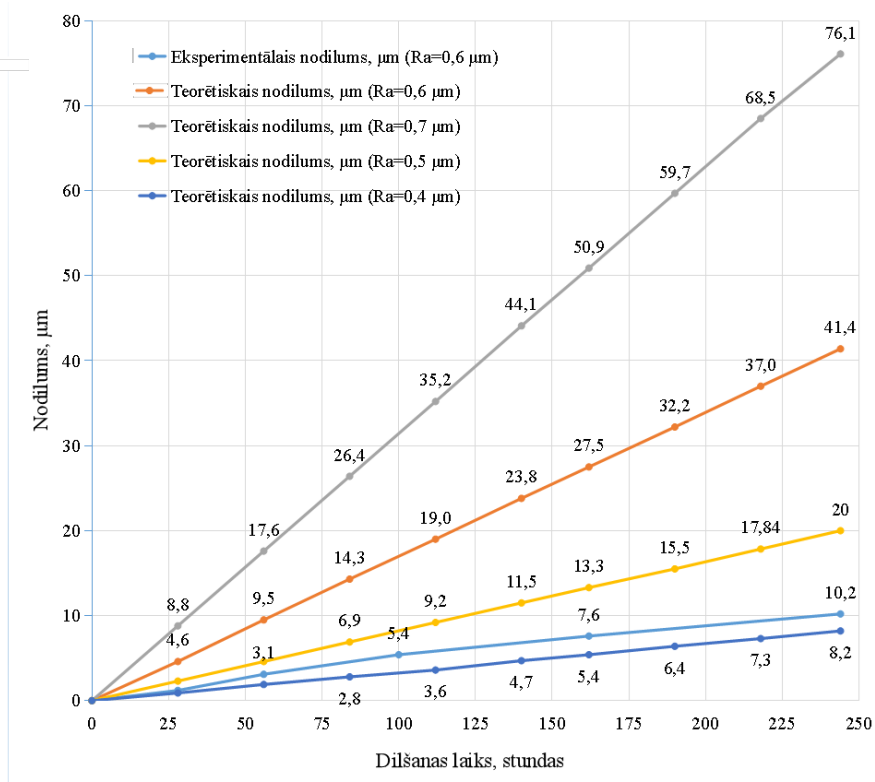
| Mērījuma Nr.                                                    | Laiks, stundas | Vidējais eksperimentālais nodilums pēc piestrādes, $\mu\text{m}$ | Vidējais nodilums (teorija), $\mu\text{m}$ |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Pēc piestrādes (16 stundas), nodiluma lielums - 7 $\mu\text{m}$ |                |                                                                  |                                            |
| 1.                                                              | 28             | 1,2                                                              | 4,6                                        |
| 2.                                                              | 56             | 3,1                                                              | 9,5                                        |
| 3.                                                              | 100            | 5,4                                                              | 17,0                                       |
| 4.                                                              | 162            | 7,6                                                              | 27,5                                       |
| 5.                                                              | 244            | 10,2                                                             | 41,4                                       |



3.6. att. Lineārā nodiluma vidējo eksperimentālo un teorētisko vērtību salīdzinājums.

Konkrētajam berzes pārim piestrādes laiks ir 16 stundas, kas netiek ņemts vērā atliekot nodiluma lielumus 3.6. attēlā parādītajā grafikā, t.i., nodilums normālam periodam tiek rēķināts pēc piestrādes perioda beigām. Tādējādi eksperimenta laiks normālam dilšanas periodam ir 244 stundas (berzes ceļš - 4392 km). 3.6. attēlā parādītā zilā līkne raksturo eksperimentāli iegūtās lineārā nodiluma vērtības, bet oranžā - teorētisko lineāro nodilumu, kas aprēķināts pēc formulas (1.22.).

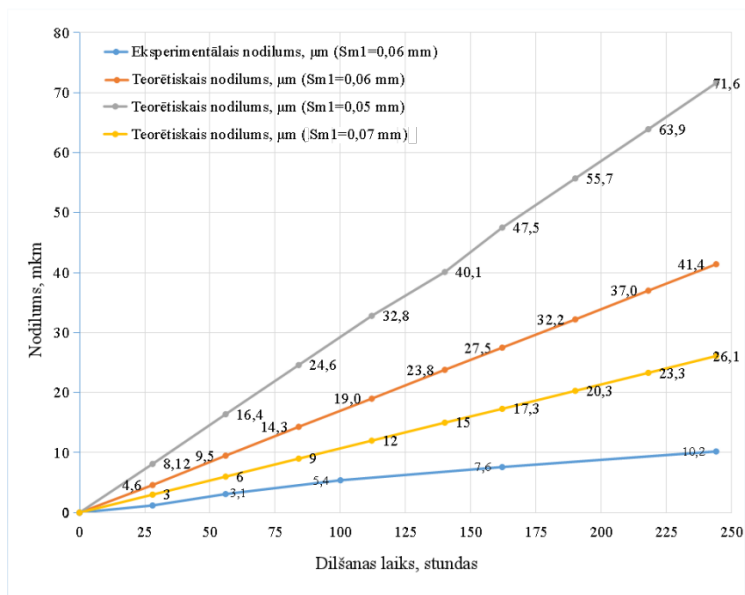
Redzams, ka eksperimenta beigās teorētisko un eksperimentālo nodiluma vērtību atšķirība sastāda 4 reizes. Formulā (1.22.) ietilpstošie 2D raupjuma parametri vairumā gadījumu nedod pilnīgu priekšstatu par reālo berzes virsmas mikrotopogrāfiju. Lai parādītu raupjuma parametru ietekmi uz nodiluma aprēķina iznākumu, tika mākslīgi izvēlētas papildus (atšķirīgas no eksperimenta)  $Ra$ ,  $Sm_1$  un  $Sm_2^a$  vērtības. Šo parametru ietekmē analītiski aprēķinātās nodiluma vērtības ir parādītas 3.7., 3.8. un 3.9. att.



3.7. att. Parametra  $Ra$  ietekme uz lineāro nodilumu rēķinot pēc (1.22.) vienādojuma.

3.7. attēlā parādīta parametra  $Ra$  izmaiņu ietekme uz teorētisko lineārā nodiluma līkni, papildus eksperimentā noteiktajai vērtībai  $Ra=0,6 \mu\text{m}$  (3.7. att. - ar oranžo krāsu), mākslīgi pieņemot  $Ra=0,4 \mu\text{m}$ ;  $Ra=0,5 \mu\text{m}$  un  $Ra=0,7 \mu\text{m}$ . Kā redzams, samazinoties  $Ra$  vērtībai, nodilums samazinās. Tuvāko nodiluma vērtību atbilstību eksperimenta datiem pie izvēlētajām parametra  $Ra$  vērtībām iespējams panākt variantā pie  $Ra=0,4 \mu\text{m}$ , kad rezultātu atšķirība dilšanas posma beigās nepārsniedz 20%. Šīs analīzes mērķis nav piemēklēt tuvāko attiecīgā parametra vērtību, kas dod nodiluma eksperimentālo datu un teorētiski aprēķināto vērtību sakritību, bet gan parādīt, kā dotais parametrs ietekmē nodiluma līknes izmaiņas un to, cik svarīga loma ir šī parametra precīzai noteikšanai berzes pāra dilstošās detaļas kontaktvirsmas mērījumu rezultātā. Piemēram, samazinot  $Ra$  vērtību no  $0,6 \mu\text{m}$  uz  $0,5 \mu\text{m}$ , t.i., par  $0,1 \mu\text{m}$ , analītiski aprēķinātā nodiluma vērtība samazinās par 52 % un, salīdzinot to ar eksperimenta datiem, atšķirība sastāda 50 %. Savukārt palielinot  $Ra$  vērtību, analītiski aprēķinātā nodiluma vērtība arī pieaug. Kā redzams, parametra  $Ra$  skaitliskās vērtības variēšana būtiski ietekmē nodiluma aprēķināto vērtību. Noteikt vidējās aritmētiskās novirzes  $Ra$  vērtību, kas apraksta reālo virsmu maksimāli precīzi, iespējams pielietojot virsmas tekstūras (3D) mērījumus, atbilstoši EN ISO 25178 standartam (šīnā gadījumā vidējā aritmētiskā novirze tiek noteikta virsmai un to apzīmē ar  $Sa$ ).

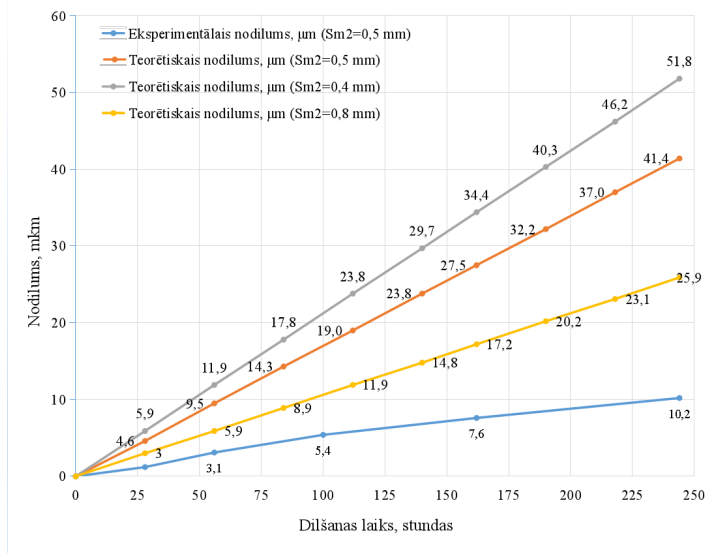
Aplūkojot grafiku (3.8. att.) var secināt, ka palielinoties dilstošās virsmas vidējā soļa  $Sm_1$  vērtībai, nodilums samazinās, t.i., jo lielāks ir solis, jo lielāks ir nelīdzenums uz berzes virsmas un tas ir izturīgāks pret deformācijām.



3.8. att. Parametra  $Sm_1$  ietekme uz lineāro nodiluma rēķinot pēc (1.22.) vienādojuma.

Dotajā eksperimentā soļa  $Sm_1$  vērtība sastāda 0,06 mm. Aprēķinot nodilumu berzes virsmai ar šādu  $Sm_1$  vērtību, redzams, ka nodiluma eksperimentālā un teorētiskā vērtības eksperimenta beigās atšķiras 4 reizes. Pieņemsim, ka soļa  $Sm_1$  vērtība tiek palielināta par 0,01 mm, tad eksperimentālā un teorētiski aprēķinātā nodiluma vērtību atšķirība samazinās un sastāda nedaudz vairāk kā 2 reizes. Palielinot  $Sm_1$  vērtību, nodilums strauji pieaug.

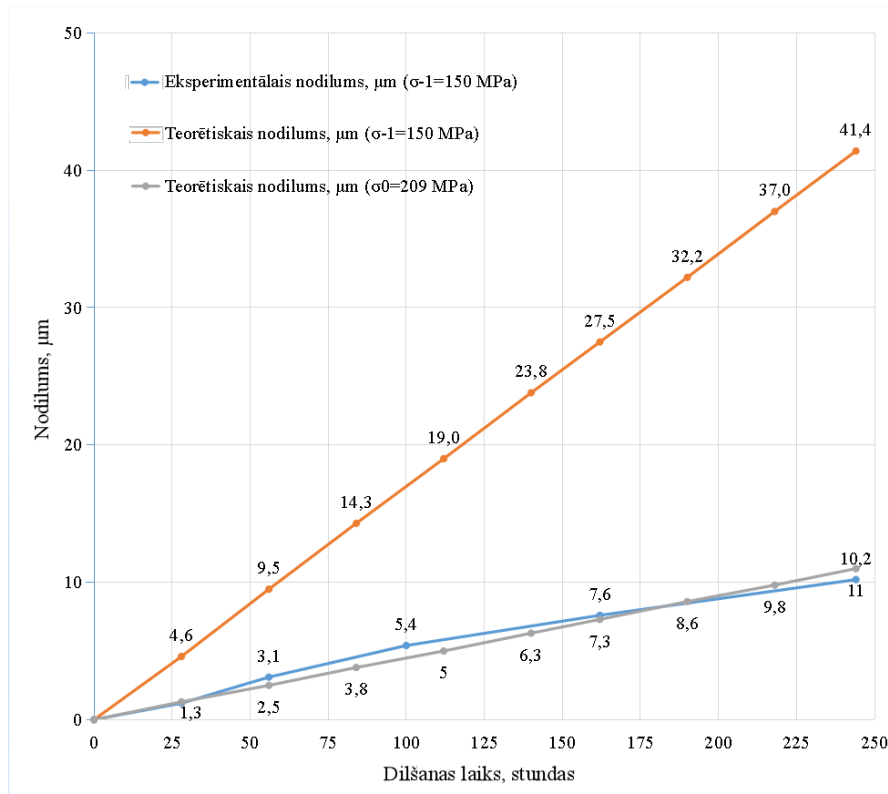
3.9. attēla grafikā parādīta soļa  $Sm_2^a$  vērtību izmaiņu ietekme uz nodiluma lielumu. Eksperimentā nomērītā  $Sm_2^a$  vērtība ir 0,5 mm. Parametrs  $Sm_2^a$  ir aktīvās (dilšanu veicinošās) virsmas raupjuma solis berzes virzienā. Jo lielāks šis solis, jo retākus triecienus slīdes berzes pāra kustības laikā saņem dilstošās virsmas nelīdzenumi, tādejādi nodilums būs mazāks.



3.9. att. Parametra  $Sm_2^a$  ietekme uz lineāro nodilumu rēķinot pēc (1.22.) vienādojuma.

Apkopojot grafikos (3.7., 3.8., 3.9. att.) attēlotās analītiski un eksperimentāli iegūtās nodiluma vērtības, kuras svārstās noteiktās robežās, redzams, ka būtisku ietekmi rada tieši berzes pāra kontaktējošo virsmu raupjuma parametri, kā rezultātā tiek pamatota nepieciešamība mērījumu gaitā noteikt šo parametru vērtības maksimāli precīzi.

Svarīgi ir atzīmēt, ka berzes virsmas parametri  $Ra$ ,  $Sm_1$  un  $Sm_2^a$  savā starpā ir saistīti, t.i., izmainot vienu, automātiski mainās arī pārējie parametri, kas šajā analizē netika ņemts vērā, lai parādītu katra atsevišķi ņemta parametra ietekmi uz kopējo dilšanas procesu un summāro nodilumu.



3.10. att. Materiāla izturības robežas  $\sigma_{-1}$  ietekme uz lineārā nodiluma aprēķinu pēc vienādojuma (1.22.).

3.10. attēlā grafiks ilustrē materiāla izturības robežas  $\sigma_r$  skaitliskās vērtības izmaiņas ietekmi uz analītiski aprēķinātā nodiluma lielumu. Balstoties uz J.Rudzīša nodiluma aprēķina formulu (1.22.),  $\sigma_r = \sigma_{-1}$ . Dotajam bronzas materiālam  $\sigma_{-1}$  vērtība pie simetriska cikla sastāda 150 MPa. Pēc darba autora uzskatiem, šāda tipa slīdes berzes procesā notiek virsmas izciļņu nesimetriskais slogojums. Tādā gadījumā  $\sigma_r = \sigma_0$  (2.3. nodaļa, 2.3. att.).  $\sigma_0$  vērtība nesimetriskam ciklam sastāda 209 MPa. Tā kā dotajā promocijas darbā analizētajos gadījumos slīdes berzes rezultātā radušās virsmas izciļņu sprieguma izmaiņas ir nesimetriskas, tad nodiluma analītiskā aprēķina formulā rekomendēts izmantot sprieguma vērtību tieši nesimetriskam gadījumam. Kā redzams 3.10. attēlā parādītajā grafikā, tad pie sprieguma, kas ir paredzēts nesimetriska slogojuma gadījumā, nodiluma vērtību sakritība ir tuvu 93 %. Jo lielāks  $\sigma_r$ , jo lielāka ir

materiāla noguruma pretestība un nodilums mazāks, kas arī ir redzams grafikā (3.10.att.) - ar pelēko līkni.

### 3.5. Secinājumi

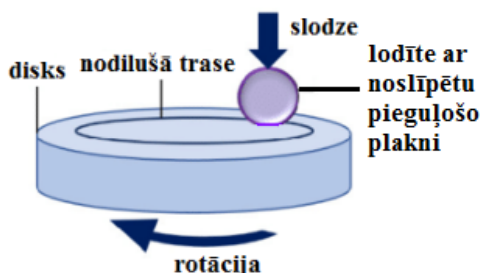
1. Pirmoreiz ir veikta J. Rudzīša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskā modeļa (1.22. formula) eksperimentālā aprobācija. Veicot pirmā posma eksperimentālo pētījumu rezultātu analīzi, ir secināts, ka gan virsmas 2D raupjuma parametru relatīvi nelielās izmaiņas, gan arī materiāla izturības robežas parametra precizēšana dos būtisku ietekmi uz nodiluma teorētiski aprēķināto vērtību un nodrošinās lielāku precizitāti nodiluma aprēķinam, t. sk. inženiertehnisko uzdevumu risināšanā. Turklāt ir secināts, ka J. Rudzīša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskā modeļa (1.22. formula) pamata pieeja nodrošina adekvātu nodiluma prognozi izpētītos parametru diapazonos, lai arī konstatētas būtiskas novirzes no reālām (eksperimentāli noteiktām) nodiluma vērtībām.
2. Konstatēts, ka J. Rudzīša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskajā modelī (1.22. formula) ietilpstošie raupjuma parametri, kas tika nomērīti pēc piestrādes, krasi ietekmē aprēķinātās nodiluma vērtības. Aprēķina rezultātu tuvināšanos reālām (eksperimentāli noteiktām) nodiluma vērtībām ir iespējams nodrošināt, integrējot 3D virsmas tekstūras parametrus, kas nodrošina pilnīgāku un precīzāku 3D berzes virsmas aprakstu nekā 2D raupjuma parametri.
3. J. Rudzīša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskais modelis (1.22. formula) veidots ar pieņēmumu, ka virsmas nelīdzenumi tiek slogoti simetriski, tādējādi izturības robeža pie simetriska cikla  $\sigma_r = \sigma_l$ . Promocijas darba autors uzskata, ka stiepes-spiedes gadījumā virsmas nelīdzenumu spriegošanas laikā izcilnis tiek slogots nesimetriski, tādējādi var pieņemt, ka  $\sigma_r = \sigma_0$ .
4. Promocijas darba autora jaunais sintezētais berzes virsmu nodiluma aprēķina modelis (2.15. formula), kas ietver gan 3D virsmas tekstūras standartizētos parametrus, gan arī materiāla noguruma nodiluma parametrus, tika eksperimentāli aprobēts eksperimentālo pētījumu otrajā posmā (4. nod.).

## 4. OTRĀ POSMA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Otrajā posma eksperimentālo pētījumu mērķis ir pārbaudīt jaunā sintezētā berzes virsmu nodiluma aprēķina modeļa, kas ietver gan 3D virsmas tekstūras standartizētos parametrus, gan arī materiāla noguruma nodiluma parametrus, analītiski iegūto rezultātu sakritību ar eksperimentālajos pētījumos iegūtajiem datiem.

### 4.1. Paraugu materiāla izvēle un sagatavošana

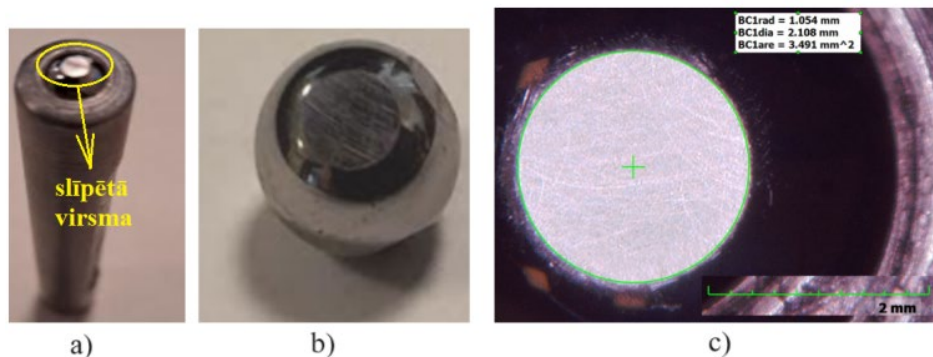
Pētījumiem tika izvēlēta shēma “lodīte ar noslīpētu kontaktplakni - rotējošs disks” (4.1.att.).



4.1. att. Slīdes berzes pāra shēma.

Nodiluma pētījumiem tika izvēlēti sekojoši paraugi un to materiāli:

1) tērauda lodīte (4.2.att.) ar diametru 6 mm. Lodītes materiāls - 102Cr6 (EN 1.2067), cietība - HRC  $\approx$  63. Lodītes paraugam pirms eksperimenta tika veikta apstrāde - slīpēšanas rezultātā iegūta plakne ar noteiktu laukumu, kas eksperimenta gaitā tiek piespiesta ar noteiktu spēku pie rotējošā diska virsmas. Šāds variants tika izvēlēts pamatojoties uz nodiluma aprēķina modeli, kas paredz to, ka nominālais berzes pāra laukums dilšanas procesā ir konstants, kas apaļas lodītes gadījumā (bez virsmas slīpēšanas) nav iespējams. Ņemot vērā eksperimentā sagatavoto kopējo paraugu skaitu un kontaktaukuma mērījumus (4.2. att. c), lodītes slīpētās virsmas vidējais laukums sastāda 2,1 mm.



4.2. att. Lodīte ar noslīpētu virsmu:

lodīte turētājā (a); lodīte tuvplānā (b); lodītes noslīpētās virsmas diametra un laukuma mērījuma paraugs (c).

2) bronzas disks ar diametru 40 mm un biezumu 5,5 mm. Diska virsma tika slīpēta ar smilšpapīru ar dažādu abrazīvo graudu gradāciju līdz virsmai tika sasniegts  $Sa < 0,1$ .

1. grupas paraugu diska materiāls - bronza CW456K (EN 12164).

2. grupas paraugu diska materiāls - bronza CW307G (EN 12163).

Bronzas diska materiāla ķīmiskais sastāvs (4.1. un 4.2. tabula) katra parauga veidam tika noteikts, izmantojot metālu analizatoru *Vulcan Expert+*.

4.1.tabula

1. grupas parauga (bronzas disks) ķīmiskais sastāvs

| Elements | Be,<br>% | Mg,<br>% | Al,<br>% | Si,<br>% | Cr,<br>% | Mn,<br>% | Fe,<br>% | Co,<br>% | Ni,<br>% | Cu,<br>%  | Zn,<br>% | Ag,<br>% | Sn,<br>% | Pb,<br>% | Bi,<br>% |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | 0        | 0        | 0,03     | 0,12     | 0,03     | 0,03     | 0,11     | 0,08     | 1,12     | 86,8<br>5 | 4,94     | 0        | 3,59     | 3,12     | 0        |

4.2.tabula

2. grupas parauga (bronzas disks) ķīmiskais sastāvs

| Elements | Be,<br>% | Mg,<br>% | Al,<br>% | Si,<br>% | Cr,<br>% | Mn,<br>% | Fe,<br>% | Co,<br>% | Ni,<br>% | Cu,<br>%  | Zn,<br>% | Ag,<br>% | Sn,<br>% | Pb,<br>% | Bi,<br>% |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | 0        | 0        | 9,53     | 0,04     | 0,03     | 0,10     | 2,76     | 0,34     | 3,98     | 83,0<br>7 | 0        | 0        | 0,01     | 0,02     | 0,1      |

Pirms eksperimenta visu paraugu kontaktējošās virsmas tika apstrādātas ar smilšpapīru ar dažādu abrazīvo graudu gradāciju, tādējādi nodrošinot  $Sa < 0,1$  robežās. Pēc paraugu virsmas slīpēšanas operāciju pabeigšanas, visi paraugi tika notīrīti ar acetona iemērkta salveti, atbrīvojot virsmu no metāla skaidiņām un smilšpapīra abrazīva.

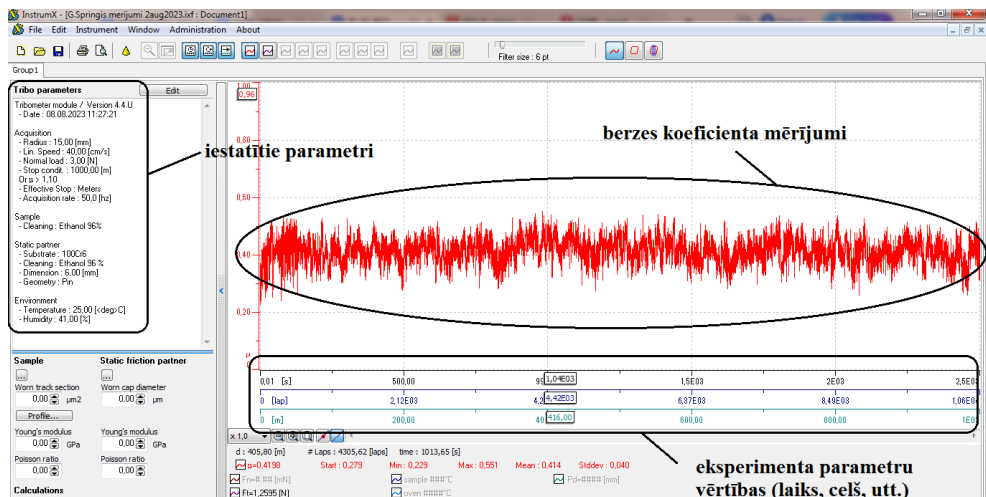
Pēc slīpēšanas visiem paraugiem tika veikti virsmas tekstūras (3D) parametru kontrolmērījumi atbilstoši EN ISO 25178 standartam.

## 4.2. Izmantotās iekārtas, mērinstrumenti un datu apstrādes programmatūra

Eksperimentālo pētījumu veikšanai tika izmantots *CSM* tribometrs (4.3., 4.3.att.) (*CSM Tribometer*, Šveice). *CSM* tribometra parametri:

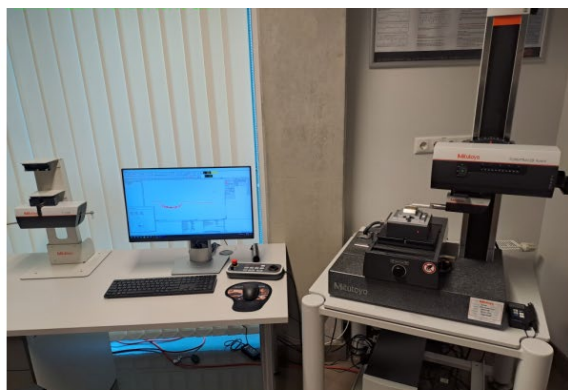
- maksimālais slogošanas spēks - 0,1 - 10 N;
- apgriezīgu skaits - 0,3 - 500 apgr/min.



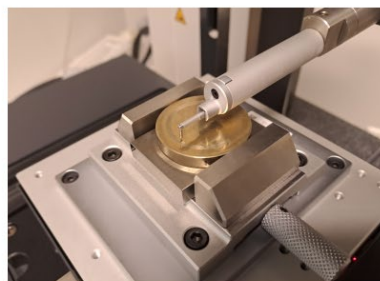


4.5. att. Eksperimentā uzdoto parametru iestatīšanas un datu apstrādes programmatūras *InstrumX* interfeiss.

Virsmas tekstūras (3D) parametru mērijumi tika veikti izmantojot 3D kontūru un virsmas tekstūras mērīšanas sistēmu *Mitutoyo FORMTRACER Avant 3D* (*Mitutoyo*, Japāna) (4.6. att.).



a)



b)

4.6. att. 3D kontūru un virsmas tekstūras mērīšanas sistēmu *Mitutoyo FORMTRACER Avant 3D*: kopskats (a), bronzas diska mērīšanas piemērs (b).

Mērīšanas sistēma aprīkota ar S-3000 raupjuma detektora moduli, augstas precizitātes Y ass galdu un automātiskās līmeņošanas galdu. S-3000 raupjuma detektora moduļa parametri: 0,75 mN detektors un standarta mērīšanas tausts 12AAC731 ar 60 grādu konusa leņķi un 2 mikrometru uzgaļa rādiusu.

Nodilušās trases platuma un šķērsgriezuma laukuma noteikšanai tika izmantots profilometrs *Mitutoyo SURFTEST SJ-500* (*Mitutoyo*, Japāna) (4.7. att.).



4.7. Profilometrs *Mitutoyo SURFTEST SJ-500*.

Lodītes noslīpētās plaknes diametra kontrole pirms un pēc eksperimenta tika veikta pielietojot digitālo mikroskopu *Hirox* (*Hirox*, Japāna) (4.8. att.).



4.8. att. Digitālais mikroskops *Hirox* lodītes noslīpētās plaknes laukuma noteikšanai pirms un pēc eksperimenta.

Eksperimenta gaitā iegūto datu turpmākai apstrādei un analīzei tika pielietotas datu apstrādes programmas *TalyMap Gold*, *MCube Map Ultimate 8*, *MathCad*, *Microsoft Excel*.

### 4.3. Darba secība, mērījumu veikšana un eksperimentu gaita

Abu bronzas materiālu veidiem un katrā no iestatīto parametru (ātrums  $v$ , slodze  $q$ ) variantiem tika veikti 5 eksperimenti. Eksperimentos iegūtās atbilstošo parametru mērījumu vidējās vērtības, kā arī eksperimentam un aprēķinam nepieciešamie lielumi apkopoti 4.4. un 4.9. tabulās. Lai izvairītos un līkņu pārklāšanās nodiluma rezultātu grafikos, no 5 eksperimentu

datiem katrā  $v$  un  $q$  parametru vērtību kombinācijā tika aprēķinātas vidējās vērtības, kas ir atliktas grafikos lineārā nodiluma līkņu izskatā.

Pēc paraugu virsmu attiecīgās sagatavošanas, lodes un bronzas diska paraugi tika nostiprināti tribometra fiksatoros. Pēc iepriekš veiktajiem eksperimentālajiem priekšizpētes darbiem, tika izvēlētas trīs slīdēšanas ātruma un slodzes variantu kombinācijas (4.3. tab.).

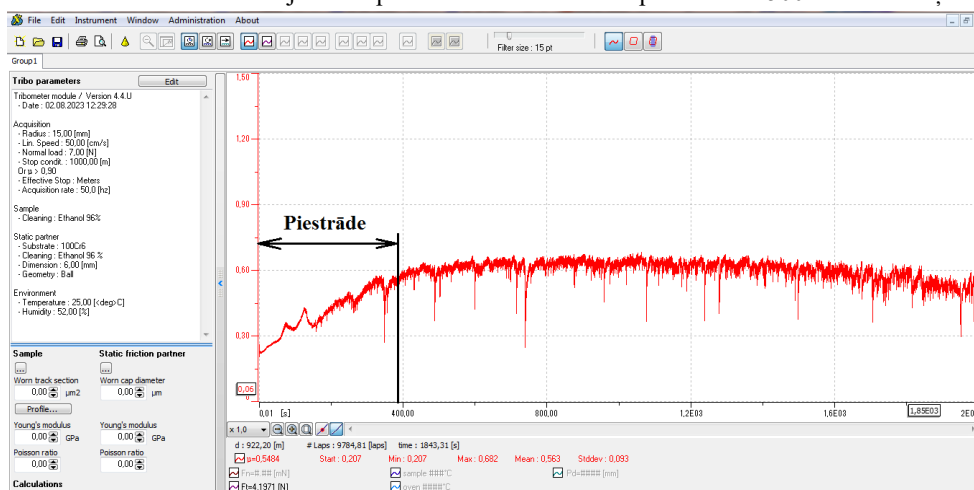
4.3. tabula

Eksperimenta parametru vērtības

| Varianta Nr. | Parametrs        |               |                  |                                                   | Piestrādes periods, m | Kopējais berzes ceļš pēc piestrādes, m |
|--------------|------------------|---------------|------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
|              | Ātrums $v$ , m/s | Spēks $F$ , N | Slodze $q$ , MPa | Lodītes kontaktpvirsmas diametrs, mm <sup>2</sup> |                       |                                        |
| 1.           | 0,7              | 2             | 0,58             | 2,1                                               | 500                   | 6000                                   |
| 2.           | 0,45             | 3             | 0,87             | 2,1                                               | 1000                  | 4000                                   |
| 3.           | 0,3              | 5             | 1,45             | 2,1                                               | 1500                  | 4000                                   |

Berzes pāra kontaktējošo virsmu piestrādes procesā darbojas virkne faktoru, kas pietiekami strauji maina dīlšanas procesā iesaistīto virsmas parametru vērtības, līdz brīdim kamēr berzes process nav nostabilizējies, tādējādi abu paraugu virsmas tekstūras (3D) parametru mērījumi, kas turpmāk tika izmantoti analītisko aprēķinu sakarībās, bija veikti pēc piestrādes procesa beigām. Piestrādes procesa periods tika kontrolēts vadoties pēc berzes koeficienta nostabilizēšanās eksperimenta norises procesā (4.9. att.). Eksperimentālo pētījumu laikā noteiktais piestrādes periods atbilstošajām ātruma  $v$  un slodzes  $q$  kombinācijām ir parādīts 4.3. tabulā. Jāatzīmē, ka vienādojums (2.29.) ir derīgs nodiluma aprēķiniem, veicot mērījumus jebkurā detaļu dīlšanas procesa ceļa/laika brīdī, savukārt piestrādes procesa posma korektai nodiluma vērtību rēķināšanai nepieciešamie virsmas tekstūras (3D) parametri, kas piestrādes laikā cikliski maina savas vērtības, būtu jāmēra pietiekami bieži, kas prasa papildus laika resursus un prognozē nodilumu īsam ceļa/laika intervālam.

Nodiluma vērtību mērījumi eksperimentā tika kontrolēti pēc katriem 500 m berzes ceļa.



4.9. att. Nodiluma procesa piestrādes perioda noteikšana.

#### 4.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6) - bronza (CW456K)

Eksperimentā nomērītie un analītiskajiem aprēķiniem, kas tiek veikti pēc formulas (2.29.), nepieciešamie lielumi slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6) - bronza (CW456K) ir apkopoti 4.4. tabulā. Dotajā gadījumā (atšķirībā no pirmā posma eksperimentālajiem pētījumiem) intensīvai dilšanai tiek pakļauts bronzas disks un tiek pieņemts, ka tērauda lodīte dilst minimāli, tāpēc šajā darbā tās nodilums netiek rēķināts.

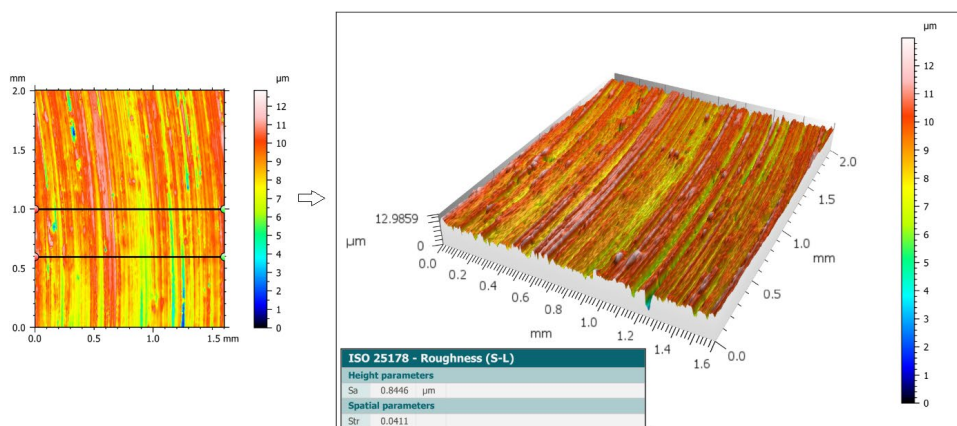
4.4. tabula

1. grupas paraugu eksperimentālajā pētījumā uzdotie lielumi, materiālu īpašības raksturojošie un virsmas tekstūras (3D) parametri pēc piestrādes

| Varianta Nr.                                                                | Ātrums $v$ , m/s | Slodze $q$ , MPa | Virsmas tekstūras (3D) parametru pēc piestrādes vidējās vērtības |                                                       |                                                                        | Vidējais nodilums pēc piestrādes, $\mu\text{m}$ |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                                             |                  |                  | Virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze $Sa$ , $\mu\text{m}$ | Dilstošās detaļas (diska) vidējais solis $RSm_1$ , mm | Nodilumu aktivizējošās virsmas (lodītes) vidējais solis $RSm_2^a$ , mm |                                                 |
| 1.                                                                          | 0,7              | 0,58             | 0,59                                                             | 0,016                                                 | 0,092                                                                  | 2,86                                            |
| 2.                                                                          | 0,45             | 0,87             | 0,62                                                             | 0,032                                                 | 0,088                                                                  | 4,40                                            |
| 3.                                                                          | 0,3              | 1,45             | 1,5                                                              | 0,034                                                 | 0,11                                                                   | 4,50                                            |
| Pirms eksperimenta                                                          |                  |                  | 0,06                                                             | 0,015                                                 |                                                                        | -                                               |
| Materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs $m$                  |                  |                  |                                                                  |                                                       |                                                                        | 4                                               |
| Materiāla izturības robeža pie asimetriska sloģojuma cikla $\sigma_0$ , MPa |                  |                  |                                                                  |                                                       |                                                                        | 225                                             |
| Materiāla izturības ciklu skaits $N_0$                                      |                  |                  |                                                                  |                                                       |                                                                        | $5 \times 10^6$                                 |
| Diska materiāla elastības modulis $E$ , MPa                                 |                  |                  |                                                                  |                                                       |                                                                        | $1,18 \times 10^5$                              |
| Virsmas anizotropijas koeficients $Str$                                     |                  |                  |                                                                  |                                                       |                                                                        | $\sim 0,03$                                     |

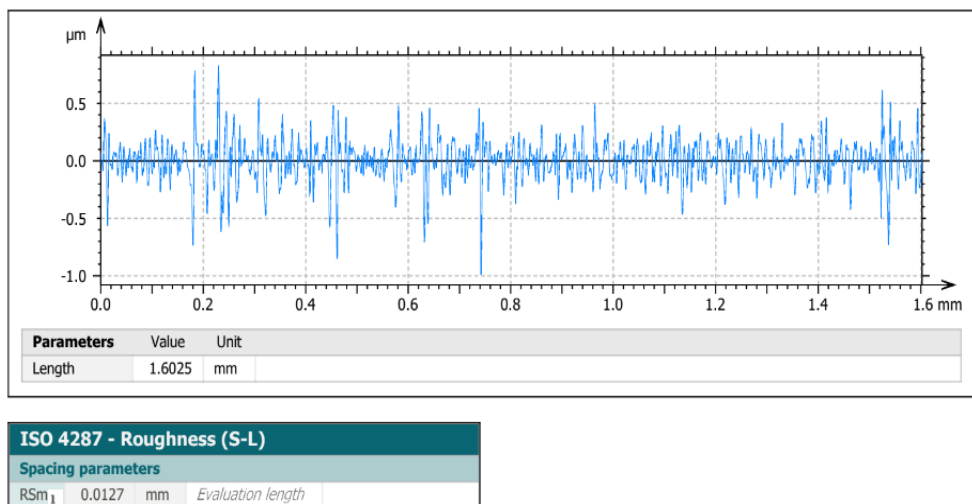
Pēc piestrādes perioda bronzas diskam CW456K (EN 12164) un tērauda lodītēm tiek veikti virsmas tekstūras (3D) mērījumi (atbilstoši EN ISO 25178). Doto mērījumu vidējās vērtības katram izvēlēto ātruma  $v$  un slodzes  $q$  variantam ir redzamas 4.4. tabulā. Mērījumu paraugs ir parādīts 4.10., 4.11., 4.12. attēlos. Mērījumu veikšanas algoritms redzams 2. pielikumā.

Pēc mērījumos iegūtā datu masīva apstrādes rezultātiem un virsmas vizualizācijas (4.10. att.), bronzas diskam pēc piestrādes ir skaidri redzamas izteiktas rievas berzes virzienā, kā rezultātā virsmas anizotropijas koeficienta  $Str$  vidējā vērtība dotajā gadījumā ir mazāka par 0,1.



4.10. att. Nodilušās trases virsmas tekstūras (3D) parametru mērījums pēc piestrādes ( $v=0,7$  m/s un  $q=0,58$  MPa), iegūts ar 3D kontūru un virsmas raupjuma mērīšanas sistēmu *Mitutoyo FORMTRACER Avant*.

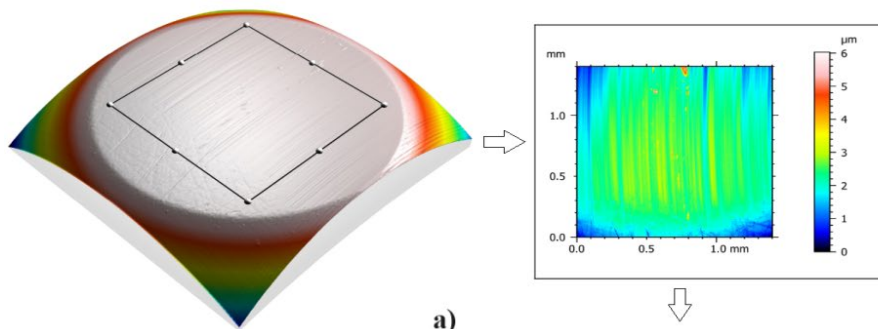
No 3D virsmas bronzas diskam tiek noteikts vidējais solis  $RSm_1$  šķērsām berzes virzienam (4.11. att.), kas turpmāk nepieciešams analītisko aprēķinu veikšanai.



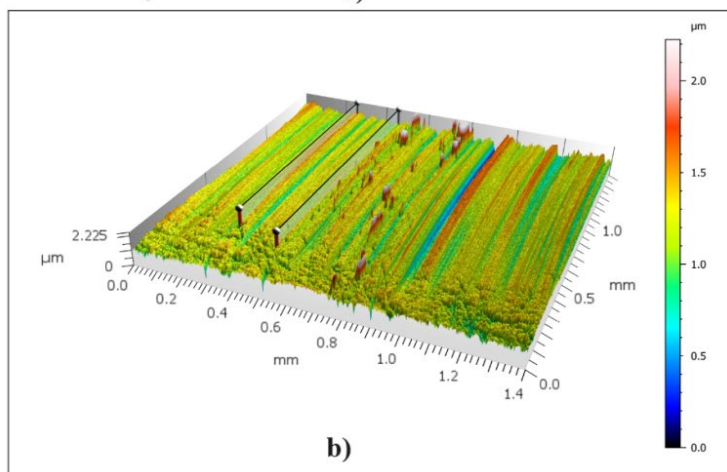
4.11. att. Bronzas diska vidējais solis  $RSm_1$  pēc piestrādes ( $v=0,7$  m/s un  $q=0,58$  MPa) šķērsām berzes virzienam.

Kā redzams 4.11. attēlā, tad solis  $RSm_1$  šķērsām berzes virzienam dotajā mērījumā sastāda 0,0127 mm, savukārt 4.4. tabulā ir norādīta vidējā soļa  $RSm_1$  vērtība veicot trīs mērījumus katram paraugam, kopsummā eksperimenta laikā nomērot piecus paraugus.

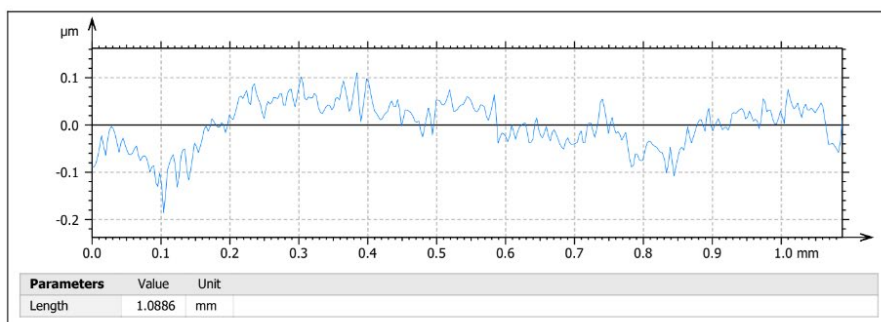
Slīpētās lodītes virsmas ilustratīvs attēls (a), berzes pēdas (b) un virsmas tekstūras (3D) nepieciešamo parametru mērījumu rezultātu piemērs (c) parādīts 4.12. attēlā.



a)



b)



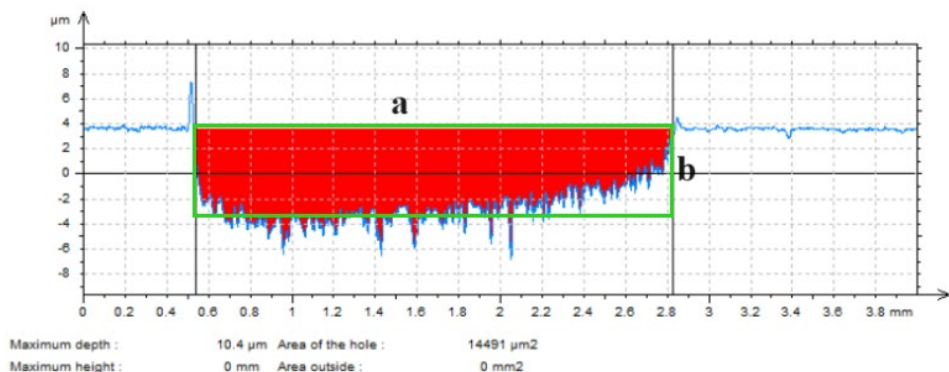
| ISO 4287 - Roughness (S-L) |        |    |                   |
|----------------------------|--------|----|-------------------|
| Spacing parameters         |        |    |                   |
| $RSm_2^a$                  | 0.0968 | mm | Evaluation length |

c)

4.12. att. Slīpētās lodītes virsmas ilustratīvs attēls (a), berzes pēdas (b) un nodilumu aktivizējošās lodītes virsmas vidējā soļa  $RSm_2^a$  berzes pēdu virzienā (c) mērījums pēc piestrādes ( $v=0,7$  m/s un  $q=0,58$  MPa).

Dotajā mērījumā parametra  $RSm_2^a$  vērtība sastāda 0,0968 mm. Tabulā 4.4. ir norādīta soļa  $RSm_2^a$  vidējā vērtība no piecu paraugu mērījumiem, katram paraugam izmērot soli trīs punktos.

Ekspperimentu gaitā nodiluma vērtības tika kontrolētas ik pēc 500 metriem berzes ceļa. Mērījumu rezultāti tika apstrādāti ar *TalyMap Gold* programmatūru, nosakot izdilušās trases šķērsgriezuma laukumu (4.13. att., 4.5. tab.). Katrā nodiluma noteikšanas reizē uz diska izdilušās trases šķērsgriezuma laukums tika mērīts 4 vietās (pēc katrām  $90^\circ$ ), aprēķinot katram paraugam vidējo lineāro nodilumu no četriem mērījumiem. Izdilušās trases viena mērījuma paraugs ir parādīts 4.13. attēlā. Ar sarkano krāsu parādītais izdilušās trases šķērsgriezuma laukums sastāda  $14491 \mu\text{m}^2$ . Lai arī redzams, ka mērījumā iegūtais laukums ir neregulāras formas, aprēķinu vienkāršošanai tiek pieņemts, ka lineārais nodilums tiks rēķināts taisnstūrim ar malu garumiem  $a$  un  $b$ . Zinot lodītes diametru, kas šajā gadījumā sakrīt ar izdilušās trases pieņemtā taisnstūra malu  $a$  pie konkrētā berzes ceļa, iespējams aprēķināt eksperimentā radušos lineāro nodilumu (4.6. tab.).



4.13. att. Bronzas diska nodilušās trases šķērsgriezuma laukuma mērījums pēc 3000 m berzes ceļa ( $v=0,7$  m/s,  $q=0,58$  MPa).

4.5. tabula

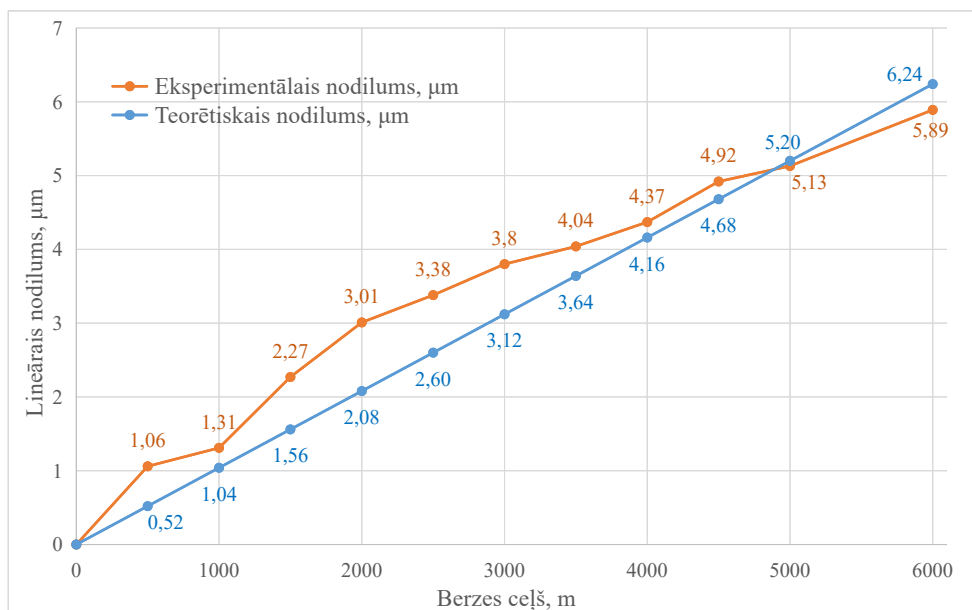
1. grupas paraugiem (bronza CW456K) nodilušās trases šķērsgriezuma laukums,  $\mu\text{m}^2$

| Mērījuma Nr. | Nodilušās trases šķērsgriezuma laukums pēc piestrādes - $6107, \mu\text{m}^2$ | Pēc 500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 1000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 1500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 4000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 4500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 5000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 6000 m, $\mu\text{m}$ |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1.           |                                                                               | 8306                     | 8974                      | 10584                     | 11696                     | 12890                     | 14048                     | 14184                     | 14561                     | 15689                     | 16725                     | 17656                     |
| 2.           |                                                                               | 8230                     | 8655                      | 11658                     | 12846                     | 12984                     | 13987                     | 14580                     | 15596                     | 16769                     | 16951                     | 17363                     |
| 3.           |                                                                               | 8255                     | 8452                      | 10358                     | 11987                     | 12795                     | 13235                     | 14178                     | 15189                     | 16190                     | 16670                     | 16672                     |
| 4.           |                                                                               | 8165                     | 8964                      | 10504                     | 12757                     | 13750                     | 14654                     | 14984                     | 15354                     | 16721                     | 16789                     | 16446                     |

4.6. tabulā un 4.14. attēla grafikā parādītas eksperimentālās un analītiski aprēķinātās lineārā nodiluma vērtības pie  $v=0,7$  m/s,  $q=0,58$  MPa.

1. grupas paraugiem (bronzā CW456K) eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības,  $\mu\text{m}$

| Eksperimentālais lineārais nodilums, μm |                                            |               |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mērījuma Nr.                            | Piestrādes beigas<br>(vid. nod. - 2,86 μm) | Pēc 500 m, μm | Pēc 1000 m, μm | Pēc 1500 m, μm | Pēc 2000 m, μm | Pēc 2500 m, μm | Pēc 3000 m, μm | Pēc 3500 m, μm | Pēc 4000 m, μm | Pēc 4500 m, μm | Pēc 5000 m, μm | Pēc 6000 m, μm |
| 1.                                      |                                            | 1,10          | 1,41           | 2,18           | 2,71           | 3,28           | 3,83           | 3,89           | 4,07           | 4,61           | 5,10           | 6,02           |
| 2.                                      |                                            | 1,06          | 1,26           | 2,69           | 3,26           | 3,32           | 3,80           | 4,08           | 4,57           | 5,13           | 5,21           | 6,07           |
| 3.                                      |                                            | 1,07          | 1,16           | 2,07           | 2,85           | 3,23           | 3,44           | 3,89           | 4,37           | 4,85           | 5,08           | 6,03           |
| 4.                                      |                                            | 1,03          | 1,41           | 2,14           | 3,21           | 3,69           | 4,12           | 4,28           | 4,45           | 5,10           | 5,13           | 5,45           |
| Vidējais                                |                                            | 1,06          | 1,31           | 2,27           | 3,01           | 3,38           | 3,80           | 4,04           | 4,37           | 4,92           | 5,13           | 5,89           |
| Teorētiskais lineārais nodilums, μm     |                                            |               |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|                                         |                                            | 0,52          | 1,04           | 1,56           | 2,08           | 2,6            | 3,12           | 3,64           | 4,16           | 4,68           | 5,2            | 6,24           |



4.14. att. Eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības 1. grupas paraugiem.

Dotajā gadījumā slīdes berzes pāris tērauds (102Cr6) - bronza (CW456K) tika pakļauts vismazākajai slodzei  $q=0,58$  MPa, bet vislielākajam kontaktdrībumu slīdes ātrumam - 0,7 m/s. Kopējais berzes ceļš eksperimentā sastādīja 7500 m, no kuriem 1500 m - piestrāde un 6000 m normālās dilšanas periods. Virsmas tekstūras (3D) parametru vidējās vērtības pēc piestrādes:  $Sa=0,59$   $\mu\text{m}$ ,  $RSm_I=0,016$  mm,  $RSm_2^a=0,092$  mm.

Apskatot 4.14. attēla grafiku redzams, ka vistuvākā eksperimentālo un analītiski rēķināto nodiluma vērtību sakritība slīdes berzes pārim ir vērojama sākot no 4000 m berzes ceļa. Pie 5000 metriem analītisko aprēķinu un eksperimentālo nodiluma vērtību atšķirība sastāda tikai 1,3 %, savukārt pie 4500 metriem - tikai 4,9 %. Eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 18,3 %. Summārais teorētiskais lineārais nodilums, neņemot vērā piestrādi, sastāda 6,24  $\mu\text{m}$  un eksperimentālais - 5,89  $\mu\text{m}$ , t.i., rezultātu atšķirība pēc 6000 m nepārsniedz 5,6 %. Berzes koeficienta

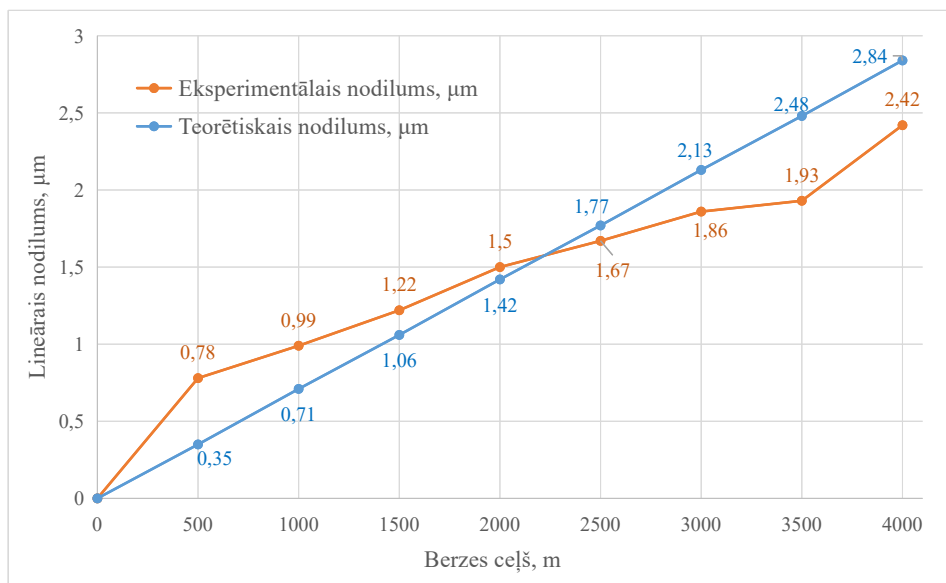
nostabilizēšanās process bija noteikts pēc 1500 m, tādējādi dotā berzes ceļa robežvērtība tika pieņemta par piestrādes procesa beigām, tomēr jāatzīmē, ka eksperimentu turpmākajā gaitā atsevišķiem paraugiem tika novērotas berzes koeficienta svārstības, kas var liecināt par nodilumu ietekmējošu parametru cikliskām izmaiņām noteiktās robežās, kā rezultātā var izskaidrot eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību.

4.7. tabulā un 4.15. attēla grafikā parādītas nodiluma vērtības pie sekojošiem parametriem:  $v=0,45$  m/s un  $q=0,87$  MPa.

4.7. tabula

1. grupas paraugiem (bronza CW456K) eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības,  $\mu\text{m}$

| Eksperimentālais lineārais nodilums, μm |                                      |               |                |                |                |                |                |                |                |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mērijuma Nr.                            | Piestrādes beigas (vid.nod. 3,96 μm) | Pēc 500 m, μm | Pēc 1000 m, μm | Pēc 1500 m, μm | Pēc 2000 m, μm | Pēc 2500 m, μm | Pēc 3000 m, μm | Pēc 3500 m, μm | Pēc 4000 m, μm |
| 1.                                      |                                      | 0,66          | 1,11           | 1,14           | 1,49           | 1,65           | 1,80           | 1,87           | 2,27           |
| 2.                                      |                                      | 0,72          | 0,91           | 1,13           | 1,48           | 1,82           | 1,83           | 1,85           | 2,24           |
| 3.                                      |                                      | 0,76          | 0,86           | 1,36           | 1,65           | 1,66           | 2,01           | 2,06           | 2,55           |
| 4.                                      |                                      | 0,97          | 1,08           | 1,26           | 1,38           | 1,57           | 1,79           | 1,95           | 2,62           |
| Vidējais                                |                                      | 0,78          | 0,99           | 1,22           | 1,50           | 1,67           | 1,86           | 1,93           | 2,42           |
| Teorētiskais lineārais nodilums, μm     |                                      |               |                |                |                |                |                |                |                |
|                                         |                                      | 0.35          | 0.71           | 1.06           | 1.42           | 1.77           | 2.13           | 2.48           | 2.84           |



4.15. att. Eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības 1. grupas paraugiem.

Kopējais berzes ceļš eksperimentā sastādīja 5000 m, no kuriem 1000 m - piestrāde un 4000 m normālās dilšanas periods. Virsmas tekstūras (3D) parametru vidējās vērtības pēc piestrādes:  $Sa=0,62$   $\mu\text{m}$ ,  $RSm_1=0,032$  mm,  $RSm_2^a=0,088$  mm. Pie doto parametru kombinācijas redzams, ka eksperimentā iegūtās nodiluma vērtības ir lielākas par analītiski aprēķinātajām līdz berzes

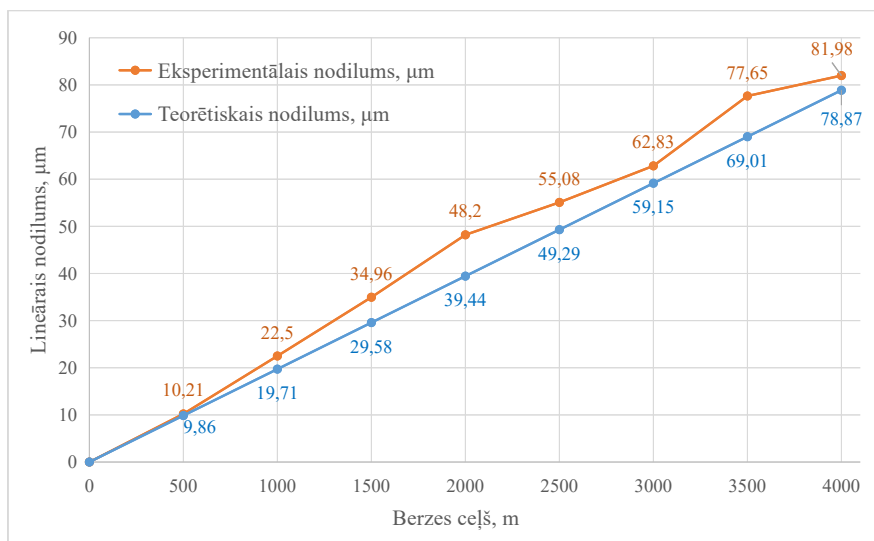
ceļš sasniedz 2250 m, savukārt pēc 2250 m nodiluma vērtību līkne rāda, ka eksperimentālās vērtības kļūst mazākas par analītiski aprēķinātajām. Eksperimentālo un analītisko nodiluma līkņu krustpunkts ir pie 2250 m, savukārt tuvākā vērtību sakritība vērojama pie 2000 m un 2500 m berzes ceļa un sasniedz 94%. Līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā, lielākās nodiluma vērtību atšķirības ir vērojamas pie 500 m, ko var izskaidrot ar parametru mainīgajām vērtībām dilšanas procesa laikā dotajam berzes pārim, kā arī iespējamo berzes procesa turpināšanos. Summārais teorētiskais lineārais nodilums eksperimenta beigās, neņemot vērā piestrādi, sastāda 2,84  $\mu\text{m}$  un eksperimentālais - 2,18  $\mu\text{m}$ . Salīdzinot abas vērtības, atšķirība nepārsniedz 15 % robežu.

4.8. tabulā un 4.16. attēla grafikā parādītas nodiluma vērtības trešajam parametru izvēles variantam - mazākā ātruma ( $v=0,3$  m/s) un lielākās slodzes ( $q=1,45$  MPa).

4.8. tabula

1. grupas paraugiem (bronzā CW456K) eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības,  $\mu\text{m}$

| Eksperimentālais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                                                |               |               |               |               |               |               |               |               |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Mērījuma Nr.                                       | Piestrādes beigas (vidnod. 4,5 $\mu\text{m}$ ) | Pēc 500 m,    | Pēc 1000 m,   | Pēc 1500 m,   | Pēc 2000 m,   | Pēc 2500 m,   | Pēc 3000 m,   | Pēc 3500 m,   | Pēc 4000 m,   |
|                                                    |                                                | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ | $\mu\text{m}$ |
| 1.                                                 |                                                | 11,7          | 19,8          | 33,7          | 47,2          | 57,2          | 58,3          | 78,8          | 85,0          |
| 2.                                                 |                                                | 10,8          | 26,0          | 31,8          | 45,3          | 49,7          | 67,6          | 73,2          | 77,5          |
| 3.                                                 |                                                | 8,8           | 21,3          | 33,4          | 53,6          | 60,2          | 65,0          | 77,9          | 80,3          |
| 4.                                                 |                                                | 9,5           | 22,8          | 41,0          | 46,7          | 53,2          | 60,4          | 80,7          | 85,0          |
| Vidējais                                           |                                                | 10,21         | 22,50         | 34,96         | 48,20         | 55,08         | 62,83         | 77,65         | 81,98         |
| Teorētiskais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$     |                                                |               |               |               |               |               |               |               |               |
|                                                    |                                                | 9,86          | 19,71         | 29,58         | 39,44         | 49,29         | 59,15         | 69,01         | 78,87         |



4.16. att. Eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības 1. grupas paraugiem.

Kopējais berzes ceļš eksperimentā sastādīja 5000 m, no kuriem 1000 m - piestrāde un 4000 m normālās dilšanas periods. Virsmas tekstūras (3D) parametru vidējās vērtības pēc piestrādes:  $Sa=1,5$   $\mu\text{m}$ ,  $RSm_1=0,034$  mm,  $RSm_2^a=0,110$  mm. Dotajā gadījumā eksperimentālo un

teorētisko nodiluma vērtību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 10 %. Summārais aprēķinātais lineārais nodilums, neņemot vērā piestrādi, sastāda 78,87  $\mu\text{m}$ , eksperimentālais - 81,98  $\mu\text{m}$ , t.i., vērtību atšķirība nepārsniedz - 3,8 %. Analizējot 4.16. att. redzamos datus, var secināt ka pie dotajā variantā uzdotajiem parametriem, teorētisko un eksperimentālo nodiluma vērtību novirze ir vismazākā, salīdzinot ar iepriekš apskatītajiem gadījumiem.

#### 4.5. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6) - bronza (CW307G)

Dotajai slīdes berzes pāra tērauds (102Cr6) - bronza (CW307G) materiālu kombinācijai eksperimentu veikšanas kārtība, eksperimentā uzdotie parametri un mērījumu veikšana ir identiska 4.4. nodaļā aprakstītajai. Pēc piestrādes nomērītie un turpmāk analītiskajos aprēķinos iekļautie lielumi ir apkopoti 4.9. tabulā.

4.9. tabula

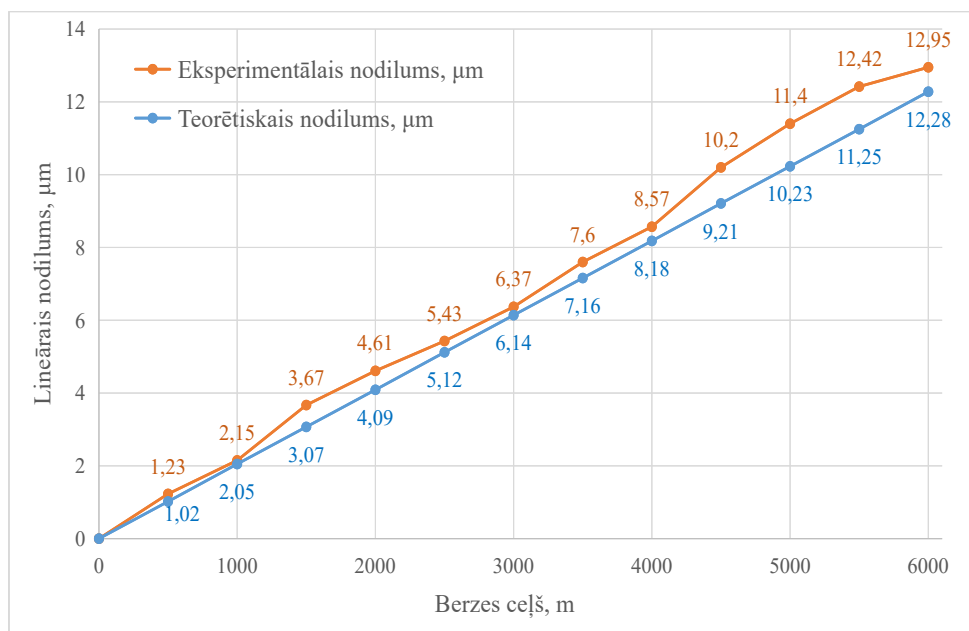
2. grupas paraugiem (bronza CW307G) eksperimentālajā pētījumā uzdotie lielumi, materiālu īpašības raksturojošie un virsmas tekstūras (3D) parametri pēc piestrādes

| Varianta<br>Nr.                                                             | Ātrums<br>$v$ , m/s | Slodze<br>$q$ , MPa | Virsmas tekstūras (3D) parametri pēc<br>piestrādes vidējās vērtības              |                                                                   |                                                                                       | Vidējais<br>nodilums<br>pēc<br>piestrādes,<br>$\mu\text{m}$ |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                                                                             |                     |                     | Virsmas<br>raupjuma<br>vidējā<br>aritmētiskā<br>novirze $S_a$ ,<br>$\mu\text{m}$ | Dilstošās<br>detaļas<br>(diska)<br>vidējais solis<br>$RSm_1$ , mm | Nodilumu<br>aktivizējošās<br>virsmas<br>(lodītes)<br>vidējais solis<br>$RSm_2^a$ , mm |                                                             |
| 1.                                                                          | 0,7                 | 0,58                | 0,79                                                                             | 0,012                                                             | 0,060                                                                                 | 1,7                                                         |
| 2.                                                                          | 0,45                | 0,87                | 0,83                                                                             | 0,017                                                             | 0,065                                                                                 | 2,88                                                        |
| 3.                                                                          | 0,3                 | 1,45                | 1,70                                                                             | 0,035                                                             | 0,170                                                                                 | 5,44                                                        |
| Pirms eksperimenta                                                          |                     |                     | 0,06                                                                             | 0,015                                                             |                                                                                       | -                                                           |
| Materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs $m$                  |                     |                     |                                                                                  |                                                                   |                                                                                       | 4                                                           |
| Materiāla izturības robeža pie asimetriska slokojuma cikla $\sigma_0$ , MPa |                     |                     |                                                                                  |                                                                   |                                                                                       | 300                                                         |
| Materiāla izturības ciklu skaits $N_0$                                      |                     |                     |                                                                                  |                                                                   |                                                                                       | $5 \times 10^6$                                             |
| Diska materiāla elastības modulis $E$ , MPa                                 |                     |                     |                                                                                  |                                                                   |                                                                                       | $1,15 \times 10^5$                                          |
| Virsmas anizotropijas koeficients $Str$                                     |                     |                     |                                                                                  |                                                                   |                                                                                       | ~0,03                                                       |

4.10. tabulā un 4.17. attēla grafikā parādītas eksperimentālā un analītiski aprēķinātā lineārā nodiluma vērtības dotajai materiālu kombinācijai pie  $v=0,7$  m/s,  $q=0,58$  MPa.

2. grupas paraugiem (bronza CW307G) eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības,  $\mu\text{m}$

| Mērījuma Nr.                                   | Piestrādes beigas (vid.nod. 1,7 $\mu\text{m}$ ) | Eksperimentālais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                                |                                                 | Pēc 500 m, $\mu\text{m}$                           | Pēc 1000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 1500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 4000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 4500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 5000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 5500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 6000 m, $\mu\text{m}$ |
| 1.                                             |                                                 | 1,62                                               | 2,85                      | 4,11                      | 5,12                      | 5,55                      | 6,54                      | 8,19                      | 8,22                      | 10,70                     | 12,31                     | 12,62                     | 12,79                     |
| 2.                                             |                                                 | 1,09                                               | 2,00                      | 3,52                      | 4,49                      | 5,12                      | 6,78                      | 7,02                      | 8,37                      | 9,82                      | 11,84                     | 12,34                     | 13,14                     |
| 3.                                             |                                                 | 1,12                                               | 1,62                      | 3,23                      | 4,11                      | 4,85                      | 5,51                      | 7,30                      | 9,11                      | 10,07                     | 10,41                     | 12,50                     | 13,20                     |
| 4.                                             |                                                 | 1,11                                               | 2,14                      | 3,81                      | 4,71                      | 6,20                      | 6,65                      | 7,87                      | 8,60                      | 10,22                     | 11,05                     | 12,22                     | 12,69                     |
| Vidējais                                       |                                                 | 1,23                                               | 2,15                      | 3,67                      | 4,61                      | 5,43                      | 6,37                      | 7,60                      | 8,57                      | 10,20                     | 11,40                     | 12,42                     | 12,95                     |
| Teorētiskais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                                                 |                                                    |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|                                                |                                                 | 1,02                                               | 2,05                      | 3,07                      | 4,09                      | 5,12                      | 6,14                      | 7,16                      | 8,18                      | 9,21                      | 10,23                     | 11,25                     | 12,28                     |



4.17. att. Eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības 2. grupas paraugiem.

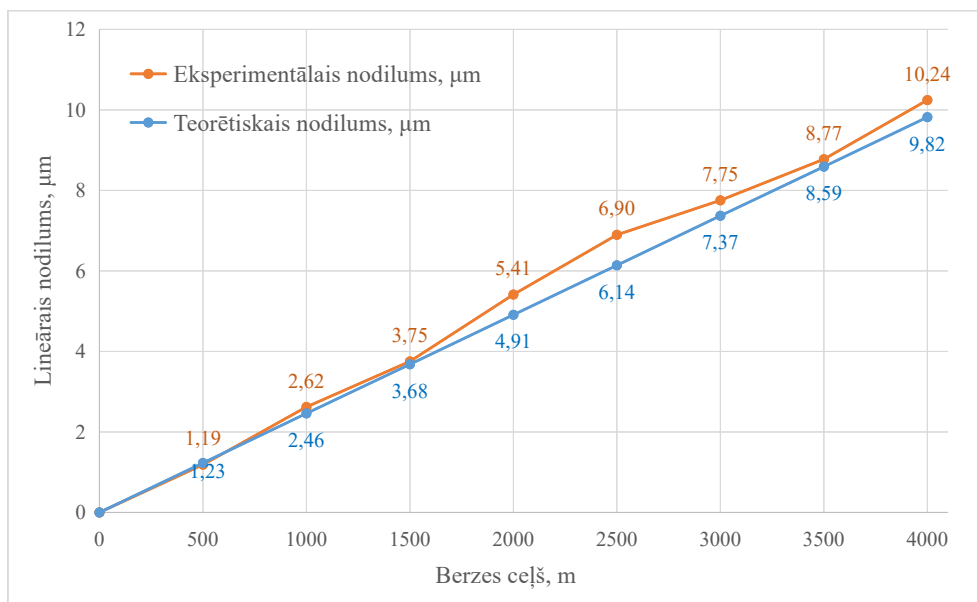
Identiski kā gadījumā ar 1. grupas paraugiem, slīdes berzes pāra tērauds (102Cr6) - bronza (CW307G) nodilums sākotnēji tika pētīts pie vismazākās slodzes  $q=0,58$  MPa un vislielākā kontaktvirsmu slīdes ātruma - 0,7 m/s. Kopējais berzes ceļš eksperimentā sastādīja 7500 m, (1500 m - piestrāde un 6000 m - normālā nodiluma periods). Virsmas tekstūras (3D) parametru vidējās vērtības pēc piestrādes:  $Sa=0,79$   $\mu\text{m}$ ,  $RSm_I=0,012$  mm,  $RSm_2^a=0,060$  mm.

Kā redzams no 4.17. attēla grafika, lineārā nodiluma analītiski aprēķināto un eksperimentālo vērtību atšķirība nepārsniedz 5 % robežu pie 1000 m, 3000 m un 4000 m berzes ceļa, kā arī nepārsniedz 6 % atšķirību pie 2500 m, 3500 m un 6000 m. Eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 8,6 %, savukārt salīdzinot analītiski aprēķināto un eksperimentā iegūto nodiluma vērtību atšķirību eksperimenta beigās, redzams, ka tā nepārsniedz 5,2 % robežu.

Nodiluma vērtības pie  $v=0,45$  m/s un  $q=0,87$  MPa ir parādītas 4.11. tabulā un 4.18. attēlā.

2. grupas paraugiem (bronza CW307G) eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības,  $\mu\text{m}$

| Mērījuma Nr.                                   | Piestrādes beigas (vid.nod. 2,88 $\mu\text{m}$ ) | Eksperimentālais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                                |                                                  | Pēc 500 m, $\mu\text{m}$                           | Pēc 1000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 1500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 4000 m, $\mu\text{m}$ |
| 1.                                             |                                                  | 1,14                                               | 2,51                      | 3,88                      | 5,30                      | 7,30                      | 8,05                      | 9,37                      | 10,19                     |
| 2.                                             |                                                  | 1,21                                               | 2,85                      | 3,87                      | 5,92                      | 6,73                      | 6,99                      | 8,55                      | 10,23                     |
| 3.                                             |                                                  | 1,11                                               | 2,39                      | 3,72                      | 5,58                      | 6,72                      | 7,66                      | 8,64                      | 9,87                      |
| 4.                                             |                                                  | 1,29                                               | 2,74                      | 3,54                      | 4,86                      | 6,83                      | 8,31                      | 8,54                      | 10,68                     |
| Vidējais                                       |                                                  | 1,19                                               | 2,62                      | 3,75                      | 5,41                      | 6,90                      | 7,75                      | 8,77                      | 10,24                     |
| Teorētiskais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                                                  |                                                    |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|                                                |                                                  | 1,23                                               | 2,46                      | 3,68                      | 4,91                      | 6,14                      | 7,37                      | 8,59                      | 9,82                      |



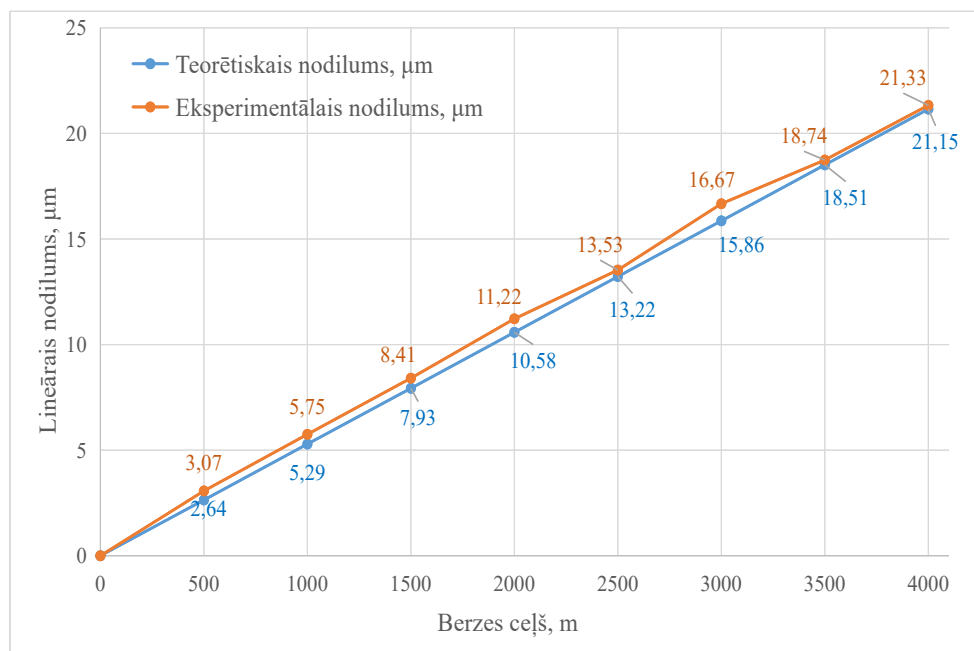
4.18. att. Eksperimentālā un teorētiskā lineārā nodiluma vidējās vērtības 2. grupas paraugiem.

Virsmas tekstūras (3D) parametru vidējās vērtības pēc piestrādes:  $Sa=0,83 \mu\text{m}$ ,  $RSm_1=0,017 \text{ mm}$ ,  $RSm_2^a=0,065 \text{ mm}$ . Analizējot 4.18. grafikā attēlotās nodiluma līknes, redzams, ka teorētisko un eksperimentālo nodiluma lielumu tuvākās vērtības ir pie 1500 m (atšķirība nepārsniedz 2 %) un 3500 m (atšķirība nepārsniedz 2,2 %). Eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 5,4 %. Nodiluma vērtību atšķirība eksperimenta beigās (pēc 4000 m berzes ceļa) sastāda ne vairāk par 4,2 %, t.i., tikai 0,42  $\mu\text{m}$ .

4.12. tabulā un 4.19. attēla grafikā redzamas eksperimentālā un teorētiskā lineārā nodiluma vērtības konkrētajai materiālu kombinācijai ja  $v=0,3 \text{ m/s}$ ,  $q=1,45 \text{ MPa}$ .

2. grupas paraugiem (bronzā CW307G) eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās,  $\mu\text{m}$

| Mērījuma Nr.                                   | Piestrādes beigas (vid.nod. 5,44 $\mu\text{m}$ ) | Eksperimentālais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                                                |                                                  | Pēc 500 m, $\mu\text{m}$                           | Pēc 1000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 1500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 2500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3000 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 3500 m, $\mu\text{m}$ | Pēc 4000 m, $\mu\text{m}$ |
| 1.                                             |                                                  | 2,94                                               | 5,79                      | 8,05                      | 11,51                     | 13,52                     | 16,94                     | 18,93                     | 21,32                     |
| 2.                                             |                                                  | 2,89                                               | 5,65                      | 8,40                      | 11,22                     | 13,76                     | 16,84                     | 18,33                     | 21,50                     |
| 3.                                             |                                                  | 3,18                                               | 5,53                      | 8,54                      | 10,98                     | 13,71                     | 16,44                     | 19,26                     | 21,29                     |
| 4.                                             |                                                  | 3,27                                               | 6,02                      | 8,66                      | 11,18                     | 13,14                     | 16,47                     | 18,45                     | 21,19                     |
| Vidējais                                       |                                                  | 3,07                                               | 5,75                      | 8,41                      | 11,22                     | 13,53                     | 16,67                     | 18,74                     | 21,33                     |
| Teorētiskais lineārais nodilums, $\mu\text{m}$ |                                                  |                                                    |                           |                           |                           |                           |                           |                           |                           |
|                                                |                                                  | 2,64                                               | 5,29                      | 7,93                      | 10,58                     | 13,22                     | 15,86                     | 18,51                     | 21,15                     |



4.19. att. Eksperimentālā un analītiski aprēķinātā lineārā nodiluma vidējās vērtības pēc pieciem eksperimentiem 2. grupas paraugiem (CW307G) ( $\nu=0,3$  m/s,  $q=1,45$  MPa).

Kopējais berzes ceļš - 5000 m, no kuriem 1000 m - piestrāde un 4000 m normālā nodiluma periods. Virsmas tekstūras (3D) parametru vidējās vērtības pēc piestrādes:  $Sa=1,70$   $\mu\text{m}$ ,  $RSm_1=0,035$  mm,  $RSm_2^a=0,170$  mm. Kā redzams, eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 5,4 %. Eksperimenta beigās aprēķinātā teorētisko un eksperimentālo nodiluma vērtību rezultātu sakritība sastāda 99 %.

## 4.6. Secinājumi

1. Analizējot promocijas darbā izstrādātā nodiluma aprēķina modeļa analītiski aprēķinātās un eksperimentāli iegūtās nodiluma vērtības slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6)-bronzā (CW456K), var secināt, ka:
    - ja  $v = 0,7$  m/s un  $q = 0,58$  MPa, analītiski aprēķināto un eksperimentā nomērīto nodiluma vērtību sakritība eksperimenta beigās veido ne mazāk par 94,4 %;
    - ja  $v = 0,45$  m/s un  $q = 0,87$  MPa, analītiski aprēķināto un eksperimentā nomērīto nodiluma vērtību sakritība eksperimenta beigās veido ne mazāk par 85 %;
    - ja  $v = 0,3$  m/s un  $q = 1,45$  MPa, analītiski aprēķināto un eksperimentā nomērīto nodiluma vērtību sakritība eksperimenta beigās veido ne mazāk par 96,2 %.
  2. Analizējot iegūtās virsmas tekstūras (3D) parametru vērtības 1. grupas slīdes berzes pārim pēc piestrādes, redzams, ka, samazinot slīdes ātrumu, bet palielinot slodzi, tās pieaug:
    - $Sa$  trešajā variantā (lielākā slodze un mazākais ātrums) pieaug par 61 %, salīdzinot ar pirmo variantu, un par 59 %, salīdzinot ar otro variantu;
    - $RSm_1$  trešajā variantā pieaug par 53 %, salīdzinot ar pirmo variantu, un par 6 %, salīdzinot ar otro variantu;
    - $RSm_2^a$  trešajā variantā pieaug par 16,4 %, salīdzinot ar pirmo variantu, un par 20 %, salīdzinot ar otro variantu.
- Aplūkoto parametru ietekme uz nodilumu ir šāda: parametra  $Sa$  pieaugums sekmē nodiluma vērtību palielināšanos, t. i., jo augstāks berzes virsmas izcilnis, jo vājāka ir tā pretestība deformācijām, savukārt soļa parametri  $RSm_1$  un  $RSm_2^a$  rada pretēju efektu – jo lielākas ir soļu vērtības, jo lielāks ir berzes virsmas nelīdzenums, un tā rezultātā tas ir izturīgāks pret deformācijām, tādējādi samazinot nodilumu.
3. Analizējot iegūtās nodiluma vērtības slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6)-bronzā (CW307G), redzams, ka:
    - ja  $v = 0,7$  m/s un  $q = 0,58$  MPa, analītiski aprēķināto un eksperimentā nomērīto nodiluma vērtību sakritība eksperimenta beigās veido ne mazāk par 94,8 %;
    - ja  $v = 0,45$  m/s un  $q = 0,87$  MPa, analītiski aprēķināto un eksperimentā nomērīto nodiluma vērtību sakritība eksperimenta beigās veido ne mazāk par 95,8 %;
    - ja  $v = 0,3$  m/s un  $q = 1,45$  MPa, analītiski aprēķināto un eksperimentā nomērīto nodiluma vērtību sakritība eksperimenta beigās veido ne mazāk par 99,1 %.
  4. 2. grupas slīdes berzes pāra (tērauds (102Cr6)-bronzā (CW307G)) materiālu kombinācijā var novērot līdzīgu tendenci ar 1. grupas materiāliem virsmas tekstūras (3D) parametru mērījumos pēc piestrādes, t. i., palielinot slodzi un samazinot ātrumu,  $Sa$ ,  $RSm_1$  un  $RSm_2^a$  vērtības pieaug:
    - $Sa$  trešajā variantā pieaug par 53 %, salīdzinot ar pirmo variantu, un par 51 %, salīdzinot ar otro variantu;
    - $RSm_1$  trešajā variantā pieaug par 66 %, salīdzinot ar pirmo variantu, un par 51 %, salīdzinot ar otro variantu;
    - $RSm_2^a$  trešajā variantā pieaug par 65 %, salīdzinot ar pirmo variantu, un par 62 %, salīdzinot ar otro variantu.
  5. Eksperimentālo pētījumu gaitā 1. grupas paraugu materiāliem gandrīz visa berzes ceļa laikā bija vērojamas berzes koeficienta svārstības 20 % robežās, kas apgrūtināja piestrādes

procesa beigu posma noteikšanu. Šādā gadījumā arī virsmas tekstūras parametru vērtībām piemīt cikliskas izmaiņas ar plašāku vērtību diapazonu nekā tad, ja berzes process ir nostabilizējies, kad šīs izmaiņas ir minimālas. Analizējot iegūtos datus, tiek pieļauts, ka šis fakts varēja sekmēt 1. grupas paraugu teorētiskā un eksperimentālā lineārā nodiluma vērtību atšķirības pieaugumu, kas ir novērojams lineārā nodiluma līkņu grafikos (4.14., 4.15., 4.16. att.).

6. Lai iegūtu nodiluma aprēķina vērtības, kas maksimāli tuvas eksperimentālajiem datiem, rekomendēts eksperimentu norisē precīzi noteikt piestrādes procesa beigas, kā rezultātā berzes procesā iesaistīto virsmas tekstūras parametru ( $Sa$ ,  $RSm_1$ ,  $RSm_2^a$ ) skaitliskās vērtības pēc piestrādes perioda svārstīsies minimālā diapazonā un ļaus precīzāk noteikt nodilumu, izmantojot analītisko aprēķinu.

7. Nodiluma analītiski aprēķinātās un eksperimentālās vērtības pie iestatītajiem kinemātiskajiem, pieliktās slodzes, virsmas tekstūras (3D) un noguruma parametriem, ļauj apgalvot, ka piedāvātais nodiluma aprēķina modelis ir derīgs nodiluma rēķiniem praktiskos inženiertehniskos uzdevumos. Redzams, ka piedāvātais nodiluma aprēķina vienādojums (2.29. vienādojums) ļauj iegūt ticamas nodiluma vērtības, t. i., eksperimentālo un analītiski aprēķināto nodiluma vērtību atšķirība visos aplūkotos variantos, izņemot vienu, nepārsniedza 5,6 % robežu. Nodiluma aprēķins ir pietiekami vienkāršs, ietaupot laiku, finansīalos, kā arī tehniskos resursus, kas nepieciešami ilgtermiņa dilšanas eksperimentiem.

8. Tiek uzsvērts, ka ir nepieciešami turpmākie pētījumi ar mērķi detalizētāk izanalizēt nodiluma aprēķina modeli un noteikt vienādojumā (2.29.) iekļauto parametru korelāciju dilšanas procesā citiem materiāliem pie atšķirīgām slodzēm, ātrumiem un virsmas tekstūras (3D) parametriem – detalizēti lūdzu sk. sadaļā “*Turpmāko pētījumu virzieni*”.

## 5. SLĪDES BERZES PĀRA NODILUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKA

Izstrādātā slīdes berzes pāra nodiluma prognozēšanas metodika paredzēta metālisku virsmu lineārā nodiluma un/vai lineārā dilšanas ātruma noteikšanai slīdes berzes pāriem, neveicot laikietilpīgus un nestandarta eksperimentus, kā to paredz līdz šim zināmās metodikas (skat. 1.sadaļu). Dotā metodika var tikt izmantota pētniecībā, kā arī praktisko inženieruzdevumu aprēķinos, konstruējot mehānismus, kuru detaļas ir pakļautas slīdes berzes kustībai un dilšanai. Pielietojot doto metodiku iespējams prognozēt salāgojuma kalpošanas laiku konstruēšanas gaitā, piemeklējot attiecīgos berzes pāra materiālus un detaļu virsmu apstrādes tehnoloģiskās operācijas.

Slīdes berzes pāra nodiluma prognozēšanas metodika ietver šādus secīgus posmus (5.1. att.):

1. Jānosaka berzes pāra konstruktīvi-kinemātiskos parametrus:
    - a) Slodzi  $q$  [MPa].
    - b) Slīdes kustības ātrumu  $v$  [m/s].
    - c) Berzes pāra kustības laiku  $t$  [s].
  2. Izmantojot tehnisko literatūru, jānosaka berzes pāra dilstošās detaļas materiāla noguruma un fizikāli-mehāniskos parametrus:
    - a) Ciklu skaitu līdz materiāla sagraušanai  $N_0$ .
    - b) Noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītāju -  $m$ .
    - c) Materiāla ilgizturības robeža stiepes-spiedes gadījumam -  $\sigma_0$  [MPa]:
 
$$\sigma_0 \approx 0,5 \cdot \sigma_{st}, \quad (5.1.)$$
- kur  $\sigma_{st}$  - materiāla stiprības robeža, MPa.
- d) Materiāla elastības modulis  $E$  [MPa].
  3. Jānosaka virsmas tekstūras (3D) parametri\* atbilstoši EN ISO 25178 standartam:
    - a) Vidējā aritmētiskā lauka novirze no vidusplaknes -  $Sa$ .
    - b) Solis dilstošajai detaļas virsmai perpendikulāri apstrādes virzienam -  $RSm_l$ .
    - c) Solis dilumu aktivizējošajai detaļas virsmai apstrādes virzienā -  $RSm_2^a$ .
    - d) Dilstošās detaļas virsmas anizotropijas koeficients  $Str$ .
  4. Vadoties pēc  $Str$  jāizvēlas  $k_q$  koeficients elastīga kontakta gadījumam.
  5. Veic lineārā nodiluma aprēķinu pie uzdotajiem parametriem izmantojot berzes virsmas nodiluma aprēķina modeli (2.29).
  6. \*Dilšanas ātruma aprēķins tiek veikts pēc vienādojuma (2.30.).
  7. \*\*Slīdes berzes pāra kalpošanas laiku nosaka vadoties pēc sakarības:

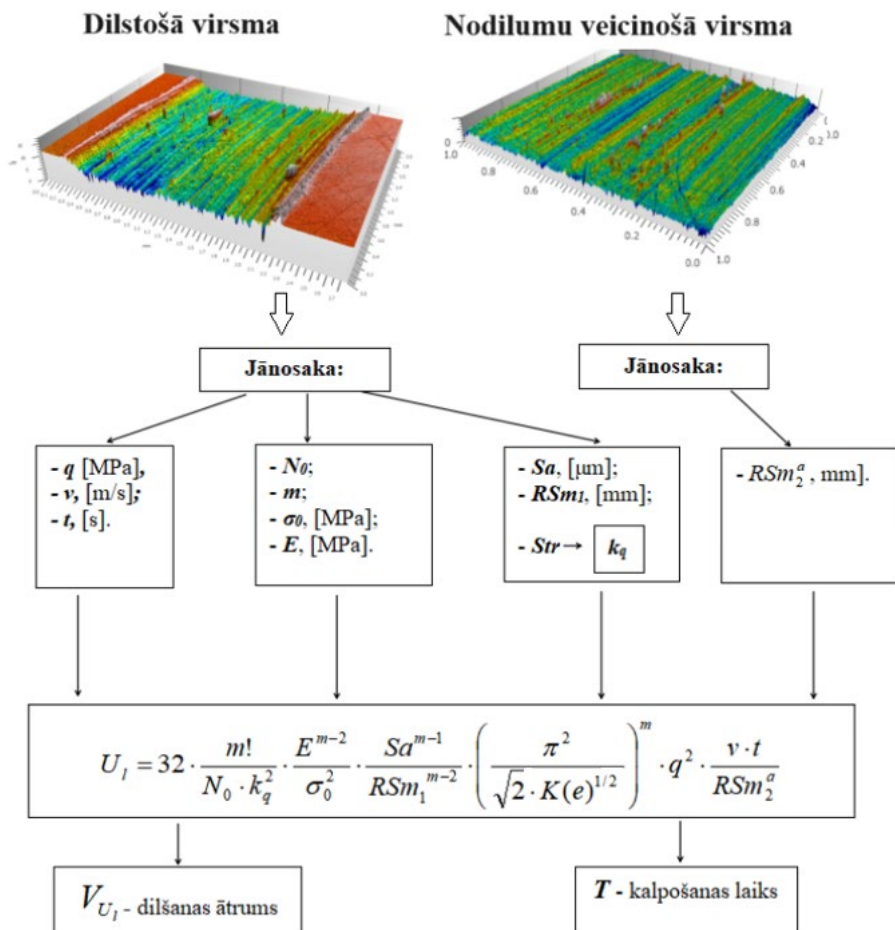
$$T = \frac{U_l}{V_{U_l}}, \quad (5.2.)$$

kur  $U_l$  - lineārais nodilums;

$V_{U_l}$  - lineārais dilšanas ātrums.

\*Metodikas 3.punktā ietvertos virsmas tekstūras (3D) parametru mērījumus berzes pāra virsmām rekomendēts veikt pēc piestrādes perioda beigām, kad salāgoto detaļu virsmas lielākie izciļņi piestrādes procesā ir atdalījušies un faktiskais kontakta laukums ir nostabilizējies. Kā rāda detaļu piestrādes procesa analīze, ja piestrādes process nav pabeigts, tajā darbojas liels skaits grūti prognozējamo parametru [65]. Pamatojoties uz iepriekšminēto, pastāv risks, ka virsmas raupjuma nomērītie parametri piestrādes procesā cikliski maina savas vērtības, tādējādi aprēķinātā nodiluma lielums var būt neprecīzs.

\*\*Slīdes berzes pāra dilšanas ātruma un kalpošanas laika aprēķins tiek veikts pēc nepieciešamības.



5.1. att. Slīdes berzes pāra nodiluma prognozēšanas īstenošanas algoritms

## ***Slīdes berzes pāra tērauds (102Cr6) - bronza (CW307G) aprēķina piemērs.***

### **1. Dots:**

1.1. berzes pāra konstruktīvi-kinemātiskie parametri:  $q = 1,45 \text{ MPa}$ ;  $v = 0,3 \text{ m/s}$ ;  $t = 13334 \text{ s}$ .

1.2. Dilstošās detaļas materiāla noguruma un fizikāli-mehāniskie parametri:  $N_0 = 5 \times 10^6$ ;  $m = 4$ ;  $\sigma_0 = 300 \text{ MPa}$ ;  $E = 1,15 \times 10^5 \text{ MPa}$ .

1.3. Berzes pāra virsmu tekstūras parametri:  $Sa = 1,7 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $RSm_l = 0,035 \text{ mm}$ ,  $RSm_2^a = 0,17 \text{ mm}$ ,  $Str = 0,03$ .

1.4. Ņemot vērā  $Str$ , nosakām  $k_q = 0,15$  (skat. 1.pielikumu).

2. **Jānosaka** dotā berzes pāra lineārais nodilums  $U_l$  un dilšanas ātrums  $V_{U_l}$ .

### **3. Aprēķins:**

Ievietojam dotās vērtības formulā (2.29.) un atrodam lineāro nodilumu :

$$U_l = 32 \cdot \frac{4!}{5 \cdot 10^6 \cdot 0,15} \cdot \frac{(1,15 \cdot 10^5)^{4-2}}{300^4} \cdot \frac{0,0015^3}{0,034^2} \cdot \left( \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 500^{1/2}} \right)^4 \cdot 1,45^2 \cdot \frac{300 \cdot 13334}{0,11} =$$
$$= 0,02115[\text{mm}] = 21,15[\mu\text{m}]$$

Pie uzdotajiem ieejas datiem, berzes pāra lineārais nodilums sastāda  $21,15 \text{ }\mu\text{m}$ .

Zinot lineāro nodilumu, pēc formulas (2.30.) atrodam dilšanas ātrumu:

$$V_{U_l} = \frac{U_l(t)}{t} = \frac{21,15}{13334} = 0,001586[\mu\text{m/s}]$$

## PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Patlaban nav vienotas un pilnīgas nodiluma aprēķina pieejas – lielā vairumā pētījumu nodiluma analītiskajam aprēķinam joprojām lieto Dž. F. Arčarda klasisko vienādojumu, masas un enerģijas bilances nezūdamības likuma integrēšanu berzes pāra nodiluma aprēķinā; zinātnieku A. Proņikova, kā arī I. Kraģeļska izstrādātos nodiluma aprēķina modeļus, kur formulās iekļautie atsevišķie lielumi bieži vien ir sākotnēji nosakāmi ilgstošos eksperimentos, tādējādi zaudējot analītiskā aprēķina jēgu. Šajos modeļos virsmas mikrotopogrāfija vai nu netiek apskatīta vispār, vai arī tiek raksturota ar nestandartizētiem raupjuma parametriem. J. Rudziša *et al.* nodiluma aprēķina modelis daļēji novērš iepriekš minēto modeļu nepilnības, taču tajā joprojām tiek izmantoti 2D raupjuma parametri. Virknē pēdējo 10 gadu pētījumos ir pierādīts, ka trīsdimensiju virsmas aprakstam ir jāizmanto virsmas tekstūras (3D) parametri, kas nodrošina pilnīgāku un precīzāku virsmas aprakstu, kas ir kritiski svarīgi berzes virsmas nodiluma aprēķinam.

Līdz ar to promocijas darba hipotēze ir apstiprināta, uzdevumi ir izpildīti un **rezultāti** ir sasniegti.

1. Sintezēts jauns berzes detaļu virsmu kontakta modelis, kas balstās normālā gadījuma lauka teorijā. Modelī berzes virsmas aprakstam izmantoti virsmas tekstūras (3D) parametri – augstuma parametrs ( $S_a$ ) un divi virsmas raupjuma soļu parametri ( $RSm_1$  un  $RSm_2$ ) atbilstoši *EN ISO 25178* standartam. Šie trīs parametri pilnībā nodrošina berzes virsmas mikrotopogrāfijas aprakstu berzes nodiluma aprēķinam.
2. Sintezēts nodiluma aprēķina modelis slīdes-berzes pārim metāliskām virsmām, izmantojot eksperimentāli teorētisko aprēķina principu. Jauns berzes virsmas nodiluma aprēķina modelis balstās jaunā berzes detaļu virsmu kontakta modelī. Sintezētais berzes virsmas nodiluma aprēķina modelis nodrošina iespēju analītiski noteikt nodiluma vērtību, kā arī analizēt un optimizēt nodilumu ietekmējošos parametrus mehānisma projektēšanas procesā.
3. Izstrādāta jauna berzes pāra kalpošanas laika aprēķinu metodika, kas balstās materiālu noguruma teorijā berzes un dilšanas procesam un ietver standartizētu parametru noteikšanu (t. sk. virsmas tekstūras (3D) parametru noteikšanu).
4. Uzprojektēta un izgatavota berzes un dilšanas procesa pētīšanas eksperimentālā iekārta, kas izmantota analītiskajās sakarībās un eksperimentālajos pētījumos iegūto nodiluma vērtību atbilstības priekšizpētei (1. posma eksperimentālie pētījumi).
5. Veikta jaunā berzes virsmas nodiluma aprēķina modeļa eksperimentālā aprobācija (2. posma eksperimentālie pētījumi), kas parādīja tuvu nodiluma aprēķināto un eksperimentāli noteikto vērtību sakritību, kas vairumā gadījumu bija ne mazāka par 94,4 %.
6. Eksperimentālo un analītisko aprēķinu rezultātu analīze parādīja, ka nepieciešami turpmākie pētījumi, kas attiecas uz nodiluma aprēķina vienādojumā neiekļauto parametru ietekmi un parametru savstarpējo korelāciju.
7. Izvēlēta teorētiski eksperimentālā aprēķinu metode praktisks lietota SIA “Naco” darbu izpildei līgumprojektā Nr. 1/22.05.2013-3.

8. Aprēķina metodika tika aprobēta Mašīnbūves un metālapstrādes rūpniecības uzņēmumos, ievievojot šo metodiku Mašīnbūves un metālapstrādes asociācijas interneta vietnē (sadaļā, kas ir pieejama MASOC biedriem).
9. Kopumā var secināt, ka promocijas darba pētījuma hipotēze “Virsmas tekstūras (3D) parametru ieviešana, kā arī atsevišķu materiāla noguruma parametru vērtību precizēšana slīdes berzes pāra nodiluma aprēķinā ļaus palielināt aprēķina precizitāti, sintezējot jaunu nodiluma aprēķina matemātisko modeli un izstrādājot berzes pāra kalpošanas laika prognozēšanas metodiku” ir apstiprināta.

## REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI

1. Nepieciešama berzes pāra nodiluma matemātiskā modeļa turpmākā izpēte un analīze paplašinot pētāmo materiālu klāstu, kā arī nodilumu ietekmējošo parametru vērtību diapazonu.
2. Turpmākos pētījumos rekomendēts veikt detalizētāku nodiluma aprēķina formulā (2.29.) iekļauto parametru savstarpējo korelācijas analīzi un šo parametru korelācijas ietekmi uz dīlšanas procesu.
3. Eksperimentālo pētījumu procesā nepieciešams atrast sakarības starp detaļu kontaktējošo virsmu raupjuma parametru izmaiņu tendenci sākumā (pirms eksperimenta) un pēc piestrādes procesa, kas var samazināt nodiluma aprēķinam nepieciešamo ieejas parametru noteikšanai vajadzīgo laiku un resursus.

## INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Wujiao Xu, Wuhua Li, Yusong Wang. *Experimental and theoretical analysis of wear mechanism in hot-forging die and optimal design of die geometry*, Volume 318, Issues 1–2, 15 October 2014, Pages 78–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.021>.
2. Adrian A. Schmidt, Timo Schmidt, Oliver Grabherr, Dirk Bartel. *Transient wear simulation based on three-dimensional finite element analysis for a dry running tilted shaft-bushing bearing*, Volumes 408–409, 15 August 2018, Pages 171–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.008>.
3. S. Reichert, B. Lorentz, S. Heldmaier, A. Albers. *Wear simulation in non-lubricated and mixed lubricated contacts taking into account the microscale roughness*, Volume 100, August 2016, Pages 272–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.02.009>.
4. Wenjun Gong, Yunxia Chen, Mengwei Li, Rui Kang. *Coupling fractal model for adhesive and three-body abrasive wear of AISI 1045 carbon steel spool valves*, Volumes 418–419, 15 January 2019, Pages 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.019>.
5. Wan-Gi Cha, Tobias Hammer, Florian Gutknecht, Roland Golle, A. Erman Tekkaya, Wolfram Volk. *Adaptive wear model for shear-cutting simulation with open cutting line*, Volumes 386–387, 15 September 2017, Pages 17–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.05.019>.
6. Gao Deli, Sun Lianzhong and Lian Jihong. *Prediction of casing wear in extended-reach drilling*, Pet.Sci.(2010)7:494–501 DOI: 10.1007/s12182-001-0098-6.
7. José A. Brandão, Ramiro Martins, Jorge H.O. Seabra, Manuel J.D. Castro. *Calculation of gear tooth flank surface wear during an FZG micropitting test*, Volume 311, Issues 1–2, 15 March 2014, Pages 31–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.025>.
8. [8] Fei Lyu, Junhui Zhang, Guangming Sun, Bing Xu, Min Pan, Xiaochen Huang, Haogong Xu. *Research on wear prediction of piston/cylinder pair in axial piston pumps*, Volumes 456–457, 15 September 2020, 203338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203338>.
9. Li Zhang, Hongli Gao, Dawei Dong, Guoqiang Fu and Qi Liu. *Wear Calculation-Based Degradation Analysis and Modeling for Remaining Useful Life Prediction of Ball Screw*, Volume 2018, Article ID 2969854, 18 pages. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2969854>.
10. Kurt Frischmuth, Dirk Langemann. *Numerical calculation of wear in mechanical systems*, Volume 81, Issue 12, August 2011, Pages 2688–2701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2011.05.011>.
11. Heinz Kloss, Rolf Wasche. *Analytical approach for wear prediction of metallic and ceramic materials in tribological applications*, Volume 266, Issues 3–4, 5 February 2009, Pages 476–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.034>.
12. Jonaki Mukherjee, Sujun Ghosh, Arnab Ghosh, Ashok Ranjan, Arvind K. Saxena, Probal K. Das, Rajat Banerjee. *Enhanced nano-mechanical and wear properties of polycarbosilane derived SiC coating on silicon*, Volume 325, 15 January 2015, Pages 39–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.086>.
13. Shirin Dehgahi, Rasool Amini, Morteza Alizadeh. *Corrosion, passivation and wear behaviors of electrodeposited Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiC nano-composite coatings*, Volume 304, 25 October 2016, Pages 502–511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.007>.

14. Lin Ding, Shengsun Hu. *Effect of nano-CeO<sub>2</sub> on microstructure and wear resistance of Co-based coatings*, Volume 276, 25 August 2015, Pages 565-572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.014>.
15. Pengbo Mi, Hongjian Zhao, Teng Wang, Fuxing Ye. *Sliding wear behavior of HVOF sprayed WC-(nano-WC-Co) coating at elevated temperatures*, Volume 206, 15 February 2018, Pages 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.09.066>.
16. Arash Yazdani, Taghi Isfahani. *Hardness, wear resistance and bonding strength of nano structured functionally graded Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings fabricated by ball milling method*, Volume 29, Issue 5, May 2018, Pages 1306-1316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.02.025>.
17. J. C. Walker, S. R. Saranu, A. H. Kean, R. J. K. Wood. *Fe nano-particle coatings for high temperature wear resistance*. *Wear*, Volume 271, Issues 9–10, 29 July 2011, Pages 2067-2079. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.056>.
18. Xu Bin-shi, Wang Hai-dou, Dong Shi-yun, Jiang Bin. *Fretting wear-resistance of Ni-base electro-brush plating coating reinforced by nano-alumina grains*, *Materials Letters* 60 (2006) 710–713. DOI: [10.1016/j.matlet.2005.10.021](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.10.021).
19. Wenfang Cui, Gaowu Qin, Jingzhu Duan, Huan Wang. *A graded nano-TiN coating on biomedical Ti alloy: Low friction coefficient, good bonding and biocompatibility*, Volume 71, 1 February 2017, Pages 520-528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.10.033>.
20. Sajjad Ghasemi, Ali Shanaghi, Paul K. Chu. *Nano mechanical and wear properties of multi-layer Ti/TiN coatings deposited on Al 7075 by high-vacuum magnetron sputtering*, Volume 638, 30 September 2017, Pages 96-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.07.049>.
21. S.M. Lari Baghal, M. Heydarzadeh Sohi, A. Amadeh. *A functionally gradient nano-Ni–Co/SiC composite coating on aluminum and its tribological properties*, Volume 206, Issues 19–20, 25 May 2012, Pages 4032-4039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.084>.
22. Hadi NasiriVatan, Reza Ebrahimi-Kahrizsangi, Masoud Kasiri Asgarani. *Tribological performance of PEO-WC nanocomposite coating on Mg Alloys deposited by Plasma Electrolytic Oxidation*, Volume 98, June 2016, Pages 253-260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.02.029>.
23. Alexey A. Vereschaka, Sergey N. Grigoriev, Nikolay N. Sitnikov, Gaik V. Oganyan, Andre Batako. *Working efficiency of cutting tools with multilayer nano-structured Ti-TiCN-(Ti,Al)CN and Ti-TiCN-(Ti,Al,Cr)CN coatings: Analysis of cutting properties, wear mechanism and diffusion processes*, Volume 332, 25 December 2017, Pages 198-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.027>.
24. Praveenkumar Kiranagi, V.R. Kabadi. *Realistic Approach to Pin-on-Disc Wear Testing Measurement*, *IJAPIE-SI-IDCM* 610 (2017) 47–53 ISSN: 2455–8419.
25. Mohanad Bahshwan, Connor W. Myant, Tom Reddyhoff, Minh-Son Pham. *The role of microstructure on wear mechanisms and anisotropy of additively manufactured 316L stainless steel in dry sliding*, Volume 196, November 2020, 109076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109076>.
26. Iyas Khader, Dominik Kürten, Andreas Kailer. *A study on the wear of silicon nitride in rolling–sliding contact*, Volume 296, Issues 1–2, 30 August 2012, Pages 630-637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.08.010>.

27. B. Dirks, R. Enblom. *Prediction model for wheel profile wear and rolling contact fatigue*, Volume 271, Issues 1–2, 18 May 2011, Pages 210–217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.028>.
28. Yuanpei Chen, Fanming Meng. *Numerical study on wear evolution and mechanical behavior of steel wires based on semi-analytical method*, Volume 148, November 2018, Pages 684–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.030>.
29. Robert Tandler, Niels Bohn, Ulrich Gabbert, Elmar Woschke. *Analytical wear model and its application for the wear simulation in automotive bush chain drive systems*, Volumes 446–447, 15 April 2020, 203193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203193>.
30. Weijun Tao, Yang Zhong, Hutian Feng, Yulin Wang. *Model for wear prediction of roller linear guides*, Volume 305, Issues 1–2, 30 July 2013, Pages 260–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.047>.
31. Valentin L. POPOV, Roman POHRT. *Adhesive wear and particle emission: Numerical approach based on asperity-free formulation of Rabinowicz criterion*, Friction 6(3): 260–273 (2018), ISSN 2223-7690 DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0236-4>.
32. Valentin Popov. *GENERALIZED ARCHARD LAW OF WEAR BASED ON RABINOWICZ CRITERION OF WEAR PARTICLE FORMATION*, Series: Mechanical Engineering Vol. 17, No1, 2019, pp. 39 – 45. DOI: <https://doi.org/10.22190/FUME190112007P>.
33. Tongyan Yue and Magd Abdel Wahab. *A Review on Fretting Wear Mechanisms, Models and Numerical Analyses*, CMC, vol.59, no.2, pp.405–432, 2019. DOI: [10.32604/cmc.2019.04253](https://doi.org/10.32604/cmc.2019.04253).
34. J. SEQUARD-BASE, C. LENAUER, V. LAZAREV, K. GAVRILOV, A. DOIKIN & G. VORLAUFER. *A MODIFIED ENERGY-BASED MODEL FOR DESCRIBING WEAR PROCESSES APPLIED TO AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE*, Vol. 3, No. 2 (2015) 150–164. ISSN: 2046-0546 (paper format), ISSN: 2046-0554 (online) DOI: [10.2495/CMEM-V3-N2-150-164](https://doi.org/10.2495/CMEM-V3-N2-150-164).
35. H.K. Ishmuratov, N.N. Mirzaev, B. Abdullaeva, M.I. Mamasalieva. *Energy analysis of wear sliding friction units*, E3S Web of Conferences Volume 383, 2023 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304019>.
36. Ivan Argatov. *A Fractional Time-Derivative Model for Severe Wear: Hypothesis and Implications*, Volume 8 – 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.905026>.
37. John J. Truhana, Jun Qub, Peter J. Blaub. *A rig test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants\**, Volume 38, Issue 3, March 2005, Pages 211–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.003>.
38. Fedor I. Stepanov and Elena V. Torskaya. *Modeling of Fatigue Wear of Viscoelastic Coatings*, Materials 2021, 14, 6513. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216513>.
39. John J. Truhan, Jun Qu, Peter J. Blau. *A rig test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants*, Volume 38, Issue 3, March 2005, Pages 211–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.003>.
40. Yanfei Liu, Tomasz W. Liskiewicz, Ben D. Beake. *Dynamic changes of mechanical properties induced by friction in the Archard wear model*, Volumes 428–429, 15 June 2019, Pages 366–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.004>.
41. J. Musil, F. Kunc, H. Zeman, H. Polakova *Relationships between hardness, Young's modulus and elastic recovery in hard nanocomposite coatings*, PII: S0257-8972Ž 0 1. 01714-5.

42. Wenfang Cui, Gaowu Qin, Jingzhu Duan, Huan Wang. *A graded nano-TiN coating on biomedical Ti alloy: Low friction coefficient, good bonding and biocompatibility*, Volume 71, 1 February 2017, Pages 520-528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.10.033>
43. Oskars Linins, Juris Krizbergs, Irina Boiko. *Wear Estimation using 3D Surface Roughness Parameters*, Vol. 527 (2013) pp 167-172. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.527.167.
44. Didzis Rags, Andris Kamols, Oskars Linins, Irina Boiko. *Influence of Material Internal Stresses to the Coefficient of Friction*, Vol. 604 (2014) pp 79-82. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.604.79
45. Ernests Jansons, Janis Lungevics, Karlis Agris Gross. *SURFACE ROUGHNESS MEASURE THAT BEST CORRELATES TO EASE OF SLIDING*, Jelgava, 25.-27.05.2016.
46. Natalija Bulaha, Janis Rudzitis. *ANALYSIS OF MODEL AND ANISOTROPY OF SURFACE WITH IRREGULAR ROUGHNESS*, Jelgava, 24.-26.05.2017. DOI: 10.22616/ERDev2017.16.N241.
47. Natalija Bulaha. *CALCULATIONS OF SURFACE ROUGHNESS 3D PARAMETERS FOR SURFACES WITH IRREGULAR ROUGHNESS*, Jelgava, 23.-25.05.2018. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N256 .
48. Ernests Jansons , Janis Lungevics, Uldis Kandars, Armands Leitans, Guna Civcisa, Oskars Linins, Karlis Kundzins and Irina Boiko. *Tribological and Mechanical Properties of the Nanostructured Superlattice Coatings with Respect to Surface Texture*, . Lubricants 2022,10, 285. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants10110285>.
49. A. Kromanis, J. Krizbergs. *3D SURFACE ROUGHNESS PREDICTION TECHNIQUE IN ENDMILLING USING REGRESSION ANALYSIS* 6th International DAAAM Baltic Conference INDUSTRIAL ENGINEERING , 2008, Tallinn.
50. T. Torims, J.Vilcans, K.Kravalis, M.Zarins, A.Ratkus. *A NOVEL GRINDING TECHNOLOGY AND 3D SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OF CRANKSHAFT BEARINGS*.
51. Krzysztof ZAK. *INFLUENCE OF GRINDING CONDITIONS ON THE TOPOGRAPHIC CHARACTERISTIC OF MACHINED SURFACES*, Journal of Machine Engineering, Vol. 14, No. 2, 2014.
52. W. Habrat, M. Motyka, K.Topolski, J. Sieniawski. *Evaluation of the cutting force components and the surface roughness in the milling process of micro- and nanocrystalline titanium*, Vol. 61 (2016), No 3, p. 1379–1384. DOI: 10.1515/amm-2016-0226.
53. Juris Krizbergs, Artis Kromanis. *DEVELOPMENT OF 3D SURFACE ROUGHNESS PREDICTION TECHNIQUE IN FINE TURNING*, Barcelona-Lloret de Mar, Spain 11-15 September, 2006.
54. Andris Logins, Toms Torims. *The Influence of High-Speed Milling Strategies on 3D Surface Roughness Parameters*, Volume 100, 2015, Pages 1253-1261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.491>.
55. Kumermanis M. *Cietu ķermeņu neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi*. Rīga, RTU Izdevniecība, 2011. 119. lpp. ISBN 2-86272-389-4.
56. Małgorzata Kowalczyk. *APPLICATION OF TAGUCHI AND ANOVA METHODS IN SELECTION OF PROCESS PARAMETERS FOR SURFACE ROUGHNESS IN PREC*, Vol. 38, No. 2, 2014. DOI: 10.2478/amst-2014-0008.
57. Lorena Deleanu, Constantin Georgescu, Cornel Suciu. *A COMPARISON BETWEEN 2D AND 3D SURFACE PARAMETERS FOR EVALUATING THE QUALITY OF SURFACES*, 2012, ISSN 1221- 4566.

58. Kenneth G. Budinski. *Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing*, ASTM International, Stock Number: MNL56. 2007. ISBN 978-0-8031-4269-5.
59. Jibin Boban, Afzaal Ahmed. *Improving the surface integrity and mechanical properties of additive manufactured stainless steel components by wire electrical discharge polishing*, Volume 291, May 2021, 117013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117013>.
60. Mohammad Rezayat, Mojtaba Karamimoghadam, Mahmoud Moradi, Giuseppe Casalino, Joan Josep Roa Rovira and Antonio Mateo. *Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels*, Metals 2023, 13(7), 1268. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071268>.
61. G. Springis, J. Rudzitis, J. Lungevics, K. Berzins. *Wear Calculation Approach for Sliding-Friction Pairs*, 6th International Conference on Fracture Fatigue and Wear, Journal of Physics, Conf. Series 843 (2017) 012072. 2017, pages 1-8. ISSN 1742-6588. DOI: 10.1088/1742-6596/843/1/012072.
62. G. Springis, J. Rudzitis, A. Avisane, A. Leitans. *Wear Calculation For Sliding Friction Pairs*, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Vol. 2, 2014, pp 41-54, DOI: 10.2478/lpts-2014-0012.
63. Oskars Linins, Armands Leitans, Guntis Springis, Janis Rudzitis. *Determining the Number of Peaks of Rough Surfaces Necessary for Wear Calculation*, Trans Tech Publications, Switzerland, Key Engineering Materials, Vol. 604, 2014, pp 59-62, DOI:10.4028.
64. Рудит Я. *Контактная механика поверхностей 1-ая часть*. Параметры профиля шероховатости поверхности. Рига, Рижский технический университет, 2007. 193 с. ISBN 978-9984-9964-1-7. (krievu valodā)
65. Рудит Я.А. *Контактная механика поверхностей 2-ая часть*. Микротопография профиля шероховатости поверхности. Рига, Рижский технический университет, 2007. 217 с. ISBN 978-9984-9964-2-4. (krievu valodā)
66. Rudzītis J. *Virsmas kontaktmehānika, 3.daļa. Slīdes virsmu diluma aprēķini*. Rīga, RTU Izdevniecība, 2007. 80.lpp. ISBN 9984-32-863-5.
67. Konrads G. *Mašīnu detaļu slīdes virsmu dilšana*. - Rīga, RTU Izdevniecība, 2006. 80.lpp. ISBN 9984-32-863-5.
68. Б.П. САФОНОВ, А.В.БЕГОВА. *Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений*, учебное пособие, Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И.Менделеева, 2004. УДК 621.891 ББК 34.41 И 622. (krievu valodā)
69. В.Л. ПОПОВ. *Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений*. Москва ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352с. ISBN 978-5-9221-1443-1. (krievu valodā)
70. А.С.ПРОНИКОВ. *Параметрическая надежность машин*, Москва: Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2002. 560с. ISBN 5-7038-1996-2. (krievu valodā)
71. Д.Н.ГАРКУНОВ. *Триботехника (конструирование, изготовление, эксплуатация машин): Учебник*. Издательство МСХА, 2002. 632с. ISBN 5-94327-093-0. (krievu valodā)
72. К. Х. Махкамов. *РАСЧЕТ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАШИН*, учебное пособие, Ташкент, 2002, 144 с. (krievu valodā).
73. Л.И.КУКСЕНОВА, В.Г.ЛАПТЕВА, А.Г.КОЛМАКОВ, Л.М.РЫБАКОВА. *Методы испытаний на трение и износ, справочное издание*, Москва «Интермет инжиниринг» 2001. 152с. ISBN 5-89594-059-5. (krievu valodā)

74. И.В.КРАГЕЛЬСКИЙ, М.Н.ДОБЫЧИН, В.С.КОМБАЛОВ Основы расчетов на трение и износ. Москва «Машиностроение» 1977. 526с.
75. Н.К.МЫШКИН, М.И.ПЕТРОКОВЕЦ Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. Москва ФИЗМАТЛИТ, 2007. (krievu valodā)
76. К.В.Фролов, авторский коллектив. Современная трибология. Итоги и перспективы. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 480с. ISBN 978-5-382-00518-8. (krievu valodā)
77. И.И.БЕРКОВИЧ, Д.Г.ГРОМАКОВСКИЙ, под ред. Д.Г. Громаковского ТРИБОЛОГИЯ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕХАНИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ, Учебник для вузов, Самар. гос. техн. ун-т., Самара, 2000. 268 с. ISBN 5-7964-0164-5. (krievu valodā)
78. А.В. Чичинадзе. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов, Москва «Машиностроение» 2001. 664с. ISBN 5-217-03053-4. (krievu valodā)
79. И.В. Крагельский и В.В.Алишина. Основы Трение, изнашивание и смазка. Москва «Машиностроение» 1978. 400с. (krievu valodā)
80. Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. ВВЕДЕНИЕ В ТРИБОФАТИКУ. Минск: БГУ, 2010. – 77 с. ISBN 978-985-518-401-1. (krievu valodā)
81. И.Д. ИБАТУЛЛИН. КИНЕТИКА УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.(krievu valodā)
82. В.С.КОМБАЛОВ. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов. Москва «Машиностроение» 2008. 384с. ISBN 978-5--217-03370-6. (krievu valodā)
83. В.М. Мусалимов, А.А. Сизова, Е.К. Иванов, Н.А. Крылов, А.Л. Ткачёв. ОСНОВЫ ТРИБОНИКИ, учебное пособие, Санкт-Петербург, 2009, 77 с. (krievu valodā)
84. И.Д. ИБАТУЛЛИН КИНЕТИКА УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с. (krievu valodā)
85. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология. Учебное пособие, Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. (krievu valodā)
86. Д.Н.ГАРКУНОВ Триботехника износ и безызносность. Учебникб М.: Издательство МСХА, 2001. 616с. ISBN 5-94327-004-3. (krievu valodā)
87. I. Kragelsky, V. Alisin, Tribology – Lubrication, Friction and Wear, Mir publishers, Moscow, 2001.
88. Exploring surface texture, a fundamental guide to the measurement of surface finish, Taylor Hobson Ltd, Leicester, Great Britain, 2003.
89. Y. Quinsata, S. Lavernhea, C. Lartiguea, Characterization of 3D surface topography in 5-axis milling, Wear, 271 (2011) 590–595.
90. Students E. *Slīdes berzes virsmu nodiluma aprēķins*. Rīga, 1996. 135 lpp.
91. Bulaha N., Rudzitis J., Lungevics J., Linins O., Berzins K. *Analysis and calculation of spacing parameters of anisotropic 3D surface roughness*. Latvian journal of physics and technical sciences, vol.54, 2017.
92. LVS EN ISO 25178-2:2012 standard “Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters”.

93. LVS EN ISO 4287:2002 standard “Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters”.

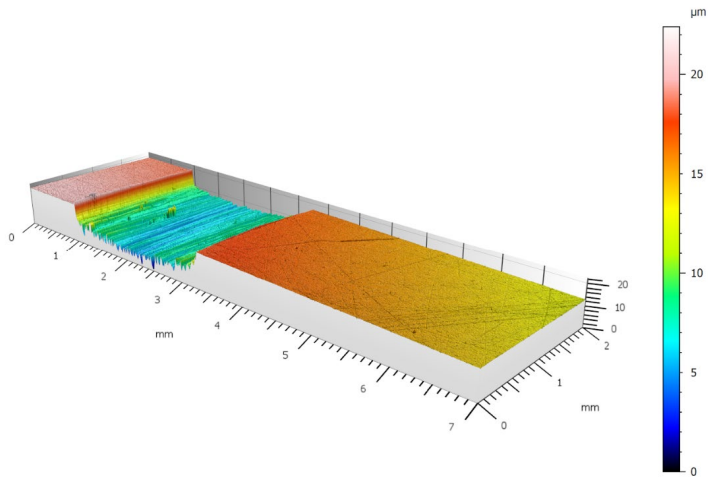
## **PIELIKUMI**

Parametra  $k_q$  vērtības pie dažādiem virsmas anizotropijas parametra  $Str$  lielumiem

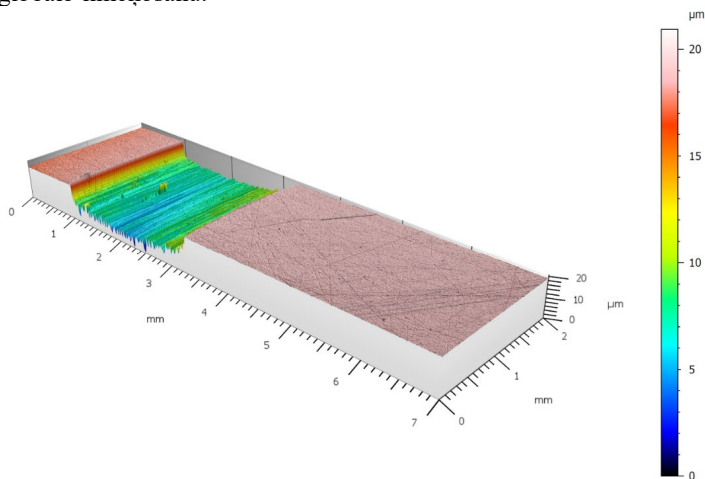
| $Str$ | $k_q$  |
|-------|--------|
| 1,00  | 0,8414 |
| 0,95  | 0,8204 |
| 0,90  | 0,7989 |
| 0,85  | 0,7743 |
| 0,80  | 0,7557 |
| 0,75  | 0,7335 |
| 0,70  | 0,7116 |
| 0,65  | 0,6889 |
| 0,60  | 0,6657 |
| 0,55  | 0,6425 |
| 0,50  | 0,6186 |
| 0,45  | 0,5942 |
| 0,40  | 0,5689 |
| 0,35  | 0,5429 |
| 0,30  | 0,5157 |
| 0,25  | 0,4866 |
| 0,20  | 0,4562 |
| 0,15  | 0,4034 |
| 0,10  | 0,3344 |
| 0,05  | 0,2303 |
| 0,00  | 0,0000 |

## Virsmas raupjuma parametru noteikšanas algoritms

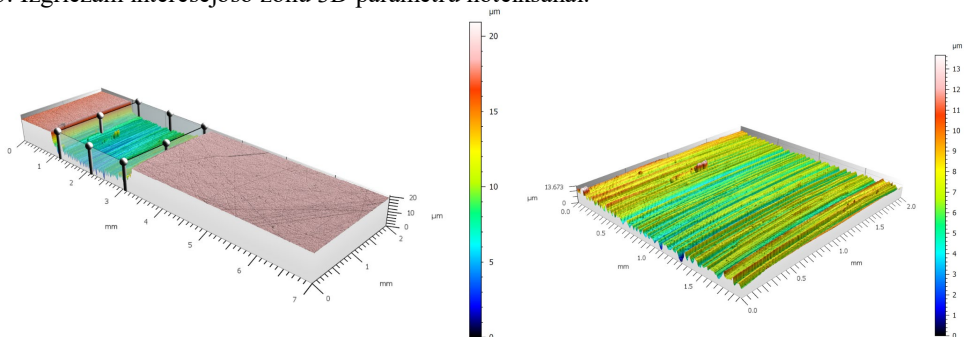
1. Ielādējam mērījumā iegūto 3D virsmu.



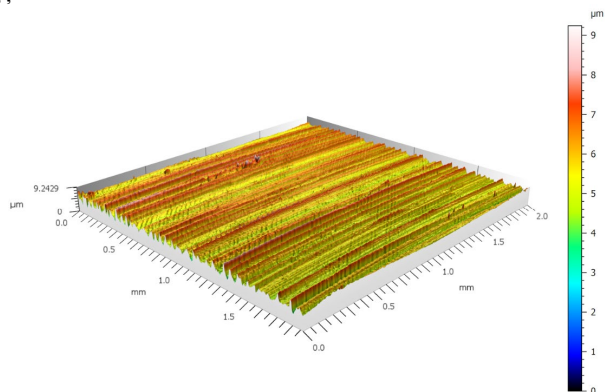
2. Veicam globālo līmeņošanu.



3. Izgriežam interesējošo zonu 3D parametru noteikšanai.



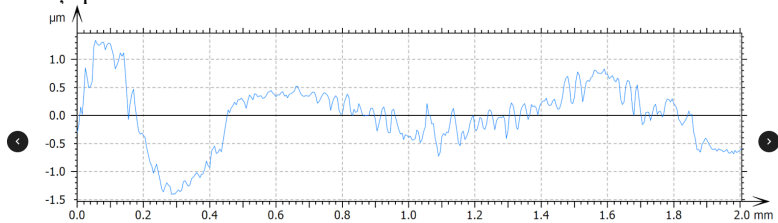
4. Nofiltrējam viļņainību.



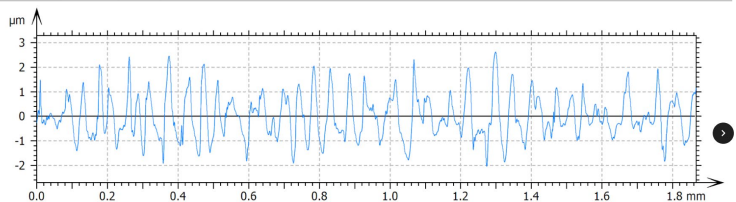
5. Nosakām 3D parametrus.

| ISO 25178 - Primary surface      |         |    |  |
|----------------------------------|---------|----|--|
| F: [Workflow] Leveled (LS-plane) |         |    |  |
| S-filter (As): None              |         |    |  |
| Height parameters                |         |    |  |
| Sq                               | 0.8584  | μm |  |
| Ssk                              | 0.2643  |    |  |
| Sku                              | 2.7953  |    |  |
| Sp                               | 3.9557  | μm |  |
| Sv                               | 5.2872  | μm |  |
| Sz                               | 9.2429  | μm |  |
| Sa                               | 0.6966  | μm |  |
| Functional parameters            |         |    |  |
| Smr                              | 0.0233  | %  |  |
| Smc                              | 1.1551  | μm |  |
| Sxp                              | 1.4379  | μm |  |
| Spatial parameters               |         |    |  |
| Sal                              | 0.0098  | mm |  |
| Str                              | 0.0297  |    |  |
| Std                              | 91.4813 | °  |  |
| Hybrid parameters                |         |    |  |
| Sdq                              | 0.1657  |    |  |
| Sdr                              | 1.3075  | %  |  |

6. Nosakām šo parametrus.



| Parameters | Value  | Unit |
|------------|--------|------|
| Length     | 2.0050 | mm   |



| Parameters | Value  | Unit |
|------------|--------|------|
| Length     | 1.8665 | mm   |



**Guntis Sprīngis** dzimis 1982. gadā Daugavpilī. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu un inženiera kvalifikāciju automobiļu transportā (2009) un inženierzinātņu akadēmisko maģistra grādu mašīnbūves tehnoloģijā (2011).

Strādājis par transportlīdzekļu tehniskās kontroles inspektoru SIA "Auteko&Tūv Latvija". Kopš 2009. gada strādā RTU Daugavpils filiālē (kopš 2020 – RTU Daugavpils studiju un zinātnes centrs; SZC), ieņemot laboranta amatu. Patlaban ir RTU Daugavpils SZC lektors mašīnbūves un mehānikas (mašīnbūves tehnoloģija) nozarē, docē vairākus studiju kursus. Zinātniskās intereses saistītas ar berzes un dilšanas procesiem, to ietekmējošo parametru analīzi un noteikšanu.