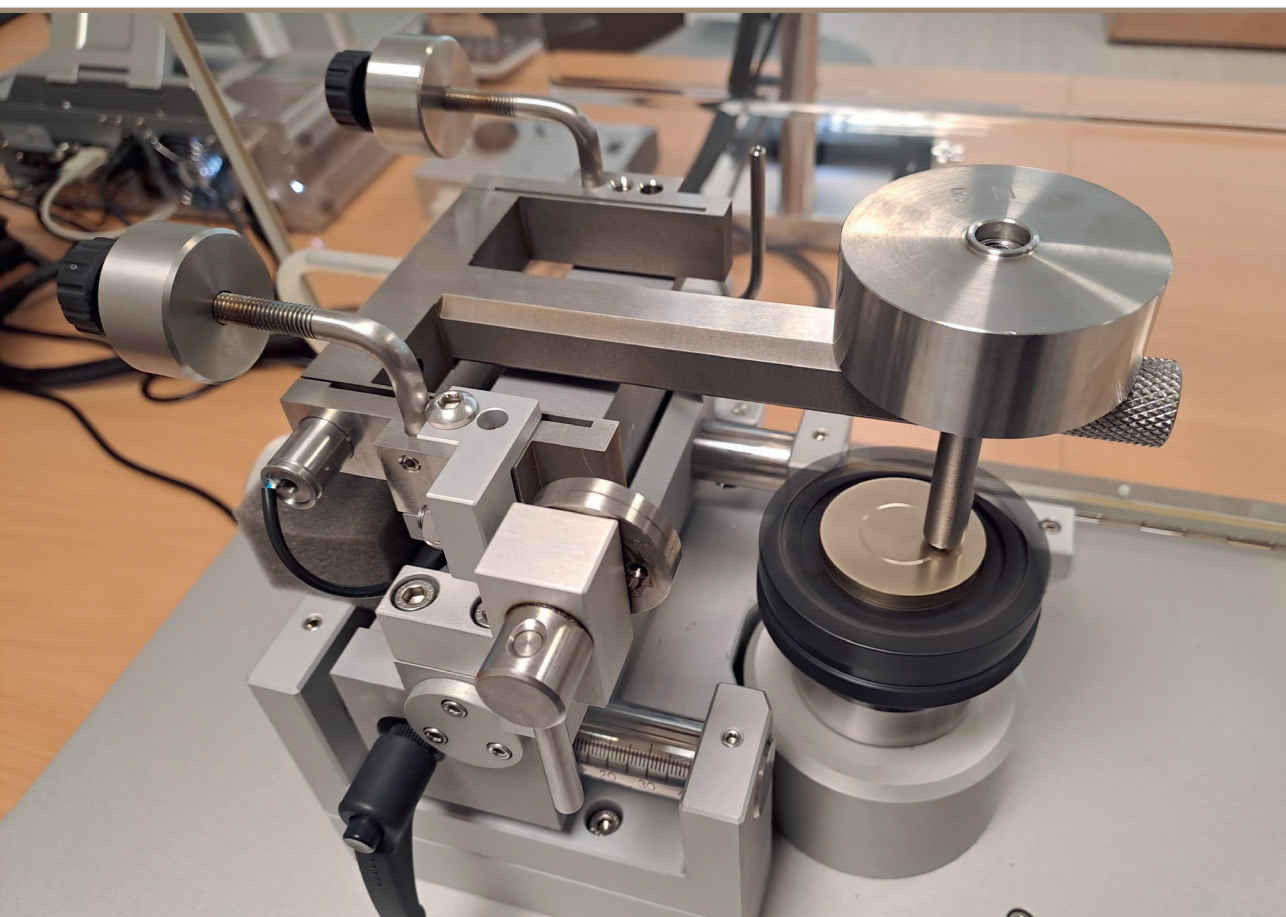


Guntis Spriņģis

SLĪDES BERZES PĀRA DETAĻU NODILUMA ANALĪZE UN NOTEIKŠANA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Guntis SPRINĢIS

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika” doktorants

SLĪDES BERZES PĀRA DETALU NODILUMA ANALĪZE UN NOTEIKŠANA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesore *Dr. sc. ing.*
IRĪNA BOIKO

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

JĀNIS RUDZĪTIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Springis, G. Slīdes berzes pāra detaļu nodiluma analīze un noteikšana. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 49 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-04” 2023. gada 28. novembra lēmumu, protokols Nr. 58.

Promocijas 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” projektā Nr. 8.2.2.0/20/1/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.



Vāka attēla autors – Guntis Springis

<https://doi.org/10.7250/9789934370229>
ISBN 978-9934-37-022-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 29. decembrī plkst. 10 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Igors Tipāns,
Rīgas Tehniskā universitāte

Ph. D. Maksim Antonov,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Profesors *Ph. D. Dariusz Mariusz Perkowski,*
Bjalistokas Tehnoloģiju universitāte, Polija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Guntis Sprinģis (paraksts)

Datums:

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.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Pētījumu metodes	6
Darba zinātniskā novitāte	6
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes	7
Praktiskā nozīmība	7
Darba aprobācija	7
PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI	10
1. LITERATŪRAS APSKATS	11
1.1. Teorētiskās un eksperimentālās nodiluma aprēķinu pieejas	11
1.2. Nodiluma noteikšanas pieeju apkopojums	14
1.3. Secinājumi	15
2. BERZES VIRSMAS APRAKSTS UN DILŠANAS PROCESA ANALĪZES UN OPTIMIZĀCIJAS PAMATPRINCIPI	16
2.1. Berzes virsmas apraksts, kontakta modelis un tā izejas pamatparametri	16
2.2. Nodiluma aprēķina matemātiskais modelis	17
2.3. Detaļu virskārtas sagraušanas modelis	17
2.4. Dilšanas procesa daļiņu tilpuma aprēķins	19
2.5. Deformēto izciļņu skaita noteikšana	19
2.6. Nodiluma aprēķina pamatsakarības	22
2.7. Parametriskā optimizācija	23
2.8. Secinājumi	27
3. PIRMĀ POSMA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI	28
3.1. Materiāla izvēle un paraugu sagatavošana	28
3.2. Izmantotās iekārtas, mērīinstrumenti un programmatūra	28
3.3. Eksperimentu darba secība un mērījumu veikšana	29
3.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze	30
3.5. Secinājumi	33
4. OTRĀ POSMA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI	34
4.1. Paraugu materiāla izvēle un sagatavošana	34
4.2. Darba secība, mērījumu veikšana un eksperimentu gaita	34
4.3. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6)-bronzā (CW456K)	36
4.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6)-bronzā (CW307G)	40
4.5. Secinājumi	42
5. SLĪDES BERZES PĀRA NODILUMA PROGNOZĒŠANAS METODIKA	44
PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	46
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI	47

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

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. [43, 44]. 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.

Darba mērķis un uzdevumi

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

Mērķa sasniegšanai tika definēti 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.

Pētījumu metodes

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 mērīšanas 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 šķērsgriezums 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 tribometers* (*CSM Tribometer*, Šveice) un pašizgatavota berzes un dilšanas procesu pētīšanas iekārta kombinācijā ar elektronisko dinamometru *PCE FG-50* (*PCE Instruments UK Ltd*, Lielbritānija) un apgriezīgu mērierīci *ALLURIS SMF-50* (*Alluris*, Vācija). Pirmā posma eksperimentālajos pētījumos piespiedējrullīša 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 [35–37, 39, 40, 42]) 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”. 64th International Scientific Conference of Riga

- Technical University, *Mechanical engineering technology and heat engineering*, 2023. gada 12. oktobris, Rīga, Latvija. Publicētas tēzes.
2. Springis G., Boiko I. Comparison of Experimental and Theoretical Wear Studies of Sliding Friction Pairs of Metallic Surfaces. Riga Technical University 61st International Scientific Conference *Mechanical Engineering Technology and Heat Engineering*, 2020. gada 14. oktobris, Rīga, Latvija. Publicētas tēzes.
 3. Springis G., Rudzitis J., Gerins E., Bulaha N. Theoretical Approach of Wear for Slide-Friction Pairs. 12th International Conference “Mechatronic Systems and Materials Intelligent Technical Systems”, 2016. gada 3.–8. jūlijs. Bjalistoka, Polija. Publicētas tēzes.
 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, Viļņa, Lietuva. Publicētas tēzes.
 5. Springis G., Rudzitis J., Avisane A., Kumermanis M. Wear Calculation Possibility of Slide-Friction Pair “Shaft-Plain Bearing” for Four-Stroke Engines”. 3rd International Advances In Applied Physics & Materials Science Congress. Antalya, Turkey, AIP Conference Proceedings, 24–28 April 2013. Publicētas tēzes.
 6. Springis G., Rudzitis J. Wear calculation models for slide friction pairs, Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute/RTU Alumni, 2012. gada 11.–12. oktobris, Rīga, Latvija. Publicētas tēzes.

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. Latvia, Jelgava, 22–24 May, 2024, pages 1-6. (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 KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI

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_{Σ} – 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_{σ} – bezdimensionāla (bezizmēra) spriegumu attiecība

m – materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs

σ_0 – materiāla ilgizturības robeža

σ_a – sprieguma amplitūda

$K(e)$ – 1. kārtas eliptiskais integrālis

μ – Puasona koeficients

h_0 – paraboloīda segmenta augstums, mērīts no virsotnes (atdalītās daļiņas biezums)

K_i – raupjuma i -tā izciļņa izliekums

$h_{izc.}$ – izciļņa augstums

u – deformācijas līmenis

$h_{atd.}$ – dilšanas rezultātā atdalītās daļiņas biezums

γ – relatīvais šķēluma augstums, normēts ar Sq

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_{γ} – berzes rezultātā deformēto izciļņu skaits

Sds – raupjas virsmas izciļņu skaits

1. LITERATŪRAS APSKATS

Šajā nodaļā veikts literatūras apskats par nodiluma analītiskā aprēķina un eksperimentālās noteikšanas populārākajām pieejamajām metodēm.

1.1. Teorētiskās un eksperimentālās nodiluma aprēķinu pieejas

Dž. F. Arčarda vienādojumā balstītās nodiluma aprēķina pieejas

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.

Vienu no populārākajām nodiluma aprēķina teorijām izstrādāja britu zinātnieks Dž. F. Arčards (*John F. Archard*). Šīs teorijas pamatā ir ideja, ka būtiskākie parametri, kas ietekmē nodilumu, ir saistīti ar slodzi F , materiāla cietību H un slīdēšanas distanci l , iepriekš zinot nodiluma koeficientu k :

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

Veicot literatūras analīzi [1–3, 5–7, 10, 12, 26–28, 30, 33, 40], tika secināts, ka 1.1. vienādojums, atsevišķos gadījumos to modificējot un pielāgojot atbilstoši virsmas ģeometrijai, materiāliem un dilšanas apstākļiem, joprojām tiek plaši lietots. *Xu Wujiao et al.* [1] pētīja karstās kalšanas presformas nodiluma mehānismu un, pilnveidojot 1.1. vienādojumu, piedāvāja nodiluma aprēķina sakarības, kas paredz iespēju prognozēt presformas nodilumu un lietot presformas ģeometrijas optimizācijas metodi ar mērķi pagarināt presformas kalpošanas laiku. *A. Adrians et al.* [2] lietoja Dž. F. Arčarda izstrādāto metodi, izmantojot to sausās slīdes nodiluma prognozēšanai automobiļa turbokompresora vārpstas un bukses salāgojumam, savukārt *S. Reichert et al.* [3] pētīja dažādus vārpstas gultņu materiālus kombinācijā ar tērauda vārpstu, pievēršot uzmanību nodilumizturībai, novērtējot nodilumu ar Dž. F. Arčarda vienādojumu. *Wan-Gi Cha et al.* [5] modelēja metāla lokšņu sausās griešanas/ciršanas procesā izmantoto instrumenta asmeņu nodilumu, savienojot nodiluma aprēķina 1.1. vienādojumu ar REDSY nodiluma simulācijas rīku, lai noteiktu instrumenta ģeometrijas izmaiņas, ko izraisa nodilums. *Gao Deli et al.* [6], pētot nodiluma rievas dziļumu dziļurbju stiprināšanas iekārtas korpusa iekšpusē, lietoja 1.1. vienādojumā balstītu aprēķina modeli ar tajā veiktajām modifikācijām. *Jose A. Brandao et al.* [7] veica 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 modificēts 1.1. vienādojuma nodiluma modelis. *K. Frischmuth et al.* [10] veica nodiluma matemātisko modelēšanu ātrgaitas vilciena ritenim, integrējot Dž. F. Arčarda modeli matemātiskās sakarībās atbilstoši riteņa darbības apstākļiem. Savukārt *B. Dirks* un *R. Enblom* [27] savos pētījumos izmantoja zinātnieka *Jendel* papildinātā Dž. F. Arčarda nodiluma aprēķina vienādojumu, kurā kontakta laukums tiek sadalīts noteikta lieluma šūnveida elementos. Turpmāk katram elementam tika noteikts nodiluma dziļums. Pētījuma mērķis bija atrast korelāciju starp nodiluma modeli un kontaktnoguruma modeli. *I. Khader et al.* [26] pētīja veltņu, kuru virsma ir no silīcija nitrīda,

nodilumu, pielāgojot Dž. F. Arčarda vienādojumu konkrētam aprēķinam. *Yuanpei Chen et al.* [28], veicot tērauda stieplu nodiluma prognozi, izmantoja *McColl et al.* modificēto Dž. F. Arčarda nodiluma aprēķinu vienādojumu un integrēja to matemātiskajā modelī papildus citiem parametriem (stieplu kontaktspiediens, deformācija un iekšējie spriegumi). *Jonaki Mukherjee et al.* [12] 1.1. vienādojumu vienkāršotā veidā izmantoja, pētot nodiluma īpašības SiC pārklājumiem, savukārt *WeiJun Tao et al.* [30] apskatīja rullīšu lineāro vadotņu nodilumu, ko pa tiešo sasaistīja ar slodzi, kas pielikta vadotnēm. *V. Popovs et al.* [31, 32] analizēja Dž. F. Arčarda vienādojuma modificēšanas iespējas, balstoties zinātnieka E. Rabinoviča izstrādātajā teorijā par dilšanas rezultātā atdalījušos daļiņu veidošanos, ņemot 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. *Yanfei Liu et al.* [40] pētīja materiāla mehānisko īpašību izmaiņas berzes rezultātā, modificējot Dž. F. Arčarda klasisko nodiluma aprēķina modeli.

Jauktie nodiluma aprēķina modeļi

Fei Lyu et al. [8] savā pētījumā apskatīja aksiālā sūkņa virzuļa un cilindra savstarpējo nodilumu un piedāvāja nodiluma prognozēšanas vienādojumus, kuru pamatā ir sakarības starp gultņa sloģošanas spēku un eļļošanas parametriem. Jāatzīmē, ka modelī ietilpstošais berzes koeficients tiek noteikts eksperimentāli un tam nav noteiktas robežas izmantošanai aprēķina formulās. *H. Kloss et al.* [11] savā darbā aplūkoja divas nodiluma prognozēšanas metodes, t. i., masas bilances un enerģijas bilances nodiluma aprēķina metodi. *Sakurai et al.* [11] izmantoja šādu pieeju, 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, bet *Fillot et al.* [11] izmantoja šo koncepciju, lai modelētu granulveida materiālu nodiluma uzvedību dilšanas procesā.

Nodiluma vērtības noteikšana, veicot eksperimentālos pētījumus

Pieeja, kad nodiluma noteikšanai netiek veikti analītiskie aprēķini, bet gan nodiluma vērtība tiek iegūta eksperimentālā veidā, joprojām tiek plaši lietota. *Wenfang Cui et al.* [19], analizējot nano TiN pārklājuma uz Ti sakausējumiem īpašības, nodiluma novērtēšanai veica pētījumus uz lode-disks tipa tribometra un noteica dilšanas intensitāti, nomērot izdilušās trases parametrus. *Sajjad Ghasemi et al.* [20] šāda veida tribometru izmantoja Ti/TiN pārklājumu pētījumiem uz Al 7075 pamatnes, mērot izdilušās trases platumu un dziļumu. *S. M.L ari Baghal et al.* [21], apskatot Ni-Co/SiC pārklājumus uz Al pamatnes, nodilumu novērtēja, operējot ar dilšanas intensitāti un svēršanas rezultātā nosakot atdalītā materiāla masu. *Xu Bin-shi et al.* [18], veicot eksperimentālos pētījumus pārklātai virsmai, nodiluma lielumu noteica, mērot no lodes atstātās izdilušās trases dziļumu. *Hadi Nasiri Vatan et al.* [22], testējot WC nanokompozītu pārklājumu triboloģiskās īpašības uz Mg sakausējumiem, nodiluma novērtēšanai veica gan paraugu svēršanu, gan lodes atstātās izdilušās trases ģeometrisku parametru mērīšanu. *M. Bahshwan et al.* [25] savu uzmanību akcentēja uz tērauda detaļu, kas iegūtas, izmantojot aditīvo ražošanas tehnoloģiju, nodiluma īpašību pētīšanas, veicot eksperimentus un nosakot dilšanas intensitāti eksperimentāli. Atsevišķas uzmanības ir vērts zinātnieka *P. Kiranagi et al.* [24] pētījums, kas apskata nodiluma vērtības novērtēšanas mērvienības, ko zinātnieki izmanto, analizējot nodilumu, kas iegūts, veicot eksperimentus. *Shirin Dehgagi et al.* [13], analizējot korozijas un nodiluma īpašības Ni-Al₂O₃-SiC pārklājumiem, veica nodilumizturības testus.

Iegūto mērījumu datu apstrādes rezultātā tiek secināts par dominējošā nodiluma veidu un dilšanas intensitāti. *Lin Ding et al.* [14], analizējot nano CeO_2 ietekmi uz mikrostruktūru un nodilumizturību pārklājumiem uz Co bāzes, kā vienu no svarīgākajiem izejas parametriem apskatīja svara nodilumu (miligramos), kura skaitliskās vērtības tiek iegūtas tikai eksperimentu rezultātā. *Yazdani et al.* [16], pētot nanostrukturētu funkcionāli graduētu $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ kompozītmateriālu pārklājumu īpašības, apskatīja arī eksperimentāli iegūto dilšanas intensitāti. *J. C. Walker et al.* [17], apskatot Fe nanodaļiņu pārklājumus, kas paredzēti nodilumizturības palielināšanai augstās temperatūrās, nodiluma noteikšanai izmantoja divas metodes – svēršanas metodi vai arī metodi, kas paredz detaļas sākotnējās ģeometriskās formas rekonstruēšanu, kā rezultāta var aprēķināt nodilušo materiāla daudzumu. *Vereschaka et al.* [23] savā darbā, analizējot griezējplāksnīšu ar dažāda veida pārklājumiem $((\text{Ti,Al})\text{CN}, \text{Ti-TiCN}-(\text{Ti, Al, Cr})\text{CN})$ parametrus tērauda apstrādes procesā, īpašu uzmanību pievērša arī nodiluma noteikšanai, nomērot izdilušās plāksnītes attiecīgos parametrus ar instrumentālo mikroskopu.

A. Proņikova *et al.* nodiluma aprēķinu modelis

Viens no ievērojamākajiem zinātniekiem, kurš aprēķinu metodē sasaistīja dilšanas ātrumu γ ar berzes pāra īpatnējiem spiedieniem p un relatīvās slīdes kustības ātrumu v , bija A. Proņikovs [52]. Tiek noteikti divi nodiluma veidi – virsmas nodilums un berzes salāgojuma nodilums. Virsmas nodilums tiek raksturots ar detaļas izmēra izmaiņu virzienā, kas ir perpendikulārs pret berzes virsmu Δh . Šī metode ļauj noteikt nodiluma lielumu (ķermeņa lineāro izmēru izmaiņas) un izdilušās virsmas formu. Šie aprēķini ir balstīti materiālu nodilumu likumsakarībās un novērtē salāgojuma konfigurāciju. Taču svarīgi atzīmēt, ka formulā iekļautie detaļu nodilumizturības koeficienti K_1 un K_2 tiek noteikti tikai ilgstoša eksperimenta gaitā, tādējādi zūd jēga iepriekš veikt nodiluma aprēķinus.

I. Kraģeļska *et al.* nodiluma aprēķina modelis

Citam virzienam piederīgie zinātnieki izmanto aprēķina metodes, kas 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. Aprēķinu formulās tiek ņemti vērā konkrētā materiāla elastības raksturlielumi, detaļas darba režīms (slodze, ātrums), ārējie apstākļi (eļļošana, apkārtējā vide), berzes mezgla konstruktīvās īpatnības, kā arī nestandarta raupjuma parametri – koeficienti b un γ , nelīdzenuma virsmu rādiusi u. c. lielumi, kas apgrūtina nodiluma aprēķina veikšanu [53, 54, 57].

J. Rudziša *et al.* nodiluma aprēķina modelis

Zinātnieku J. Rudziša 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 lietot nodiluma aprēķina vienādojumu inženiertehnisko uzdevumu risināšanai. Dilšanas process tiek raksturots ar trim stadijām – piestrādi, normālo dilšanu un katastrofālo dilšanu. Šajā modelī piestrādes procesā realizētā nodiluma vērtība U_p tiek noteikta eksperimentāli, savukārt normālā eksploataācijas perioda nodiluma vērtība U_n – aprēķinu ceļā. Piedāvāto nodiluma aprēķinu var nosaukt par eksperimentāli teorētisku.

J. Rudziša *et al.* lineārā nodiluma aprēķina formula berzes virsmām [50] ir šāda:

$$E\{U_n\} \approx k_m \cdot K_R \cdot K_{F-M} \cdot \frac{q}{E} \cdot Ra \cdot \frac{L_b}{S_{m2}}. \quad (1.2.)$$

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 raujuma vidējā aritmētiskā novirze;

RSm_2^a – aktīvās virsmas raujuma vidējais solis berzes virzienā.

1.2. Nodiluma noteikšanas pieeju apkopojums

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

1.1. tabula

Nodiluma aprēķinu literatūras apskata kopsavilkums

Atsauce	Teorētiskais pamatojums	Nodiluma teorētiskais aprēķins	Eksperimentālie pētījumi	Nodiluma procesa simulācija	Raujuma profila parametri (2D)	Virsmas tekstūras (3D) parametri	Piezīmes
<i>Xu Wujiao et al.</i> [1]	Dž. F. Arčards	+	Turp- atpakaļ kustība	–	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>A. Adrians et al.</i> [2]	Dž. F. Arčards	+	–	Jā, <i>GEM</i>	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>S. Reichert et al.</i> [3]	Dž. F. Arčards	+	–	Jā, <i>GEM</i>	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>Wan-Gi Cha et al.</i> [5]	Dž. F. Arčards	–	Reāls objekts	Jā, <i>GEM</i> , <i>REDSY</i>	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>Gao Deli et al.</i> [6]	Dž. F. Arčards	+	+	–	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>Jose A. Brandao et al.</i> [7]	Dž. F. Arčards	+	+	+	+	–	Formula tika pilnveidota
<i>K. Frischmuth et al.</i> [10]	Dž. F. Arčards	+	–	–	–	–	Formula tika integrēta matemātiskajā modelī
<i>I. Khader et al.</i> [26]	Dž. F. Arčards	+	+	+	–	–	Formula tika pilnveidota
B. Dirks un <i>R. Enblom</i> [27]	Dž. F. Arčards + <i>Jendel</i>	+	–	+	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>Yuanpei Chen et al.</i> [28]	Dž. F. Arčards	+	–	+	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>Yanfei Liu et al.</i> [40]	Dž. F. Arčards	+	+	–	–	–	Formula tika pilnveidota
<i>WeiJun Tao et al.</i> [30]	Dž. F. Arčards	+	+	–	–	–	Nodiluma apjoms praktiski tiek novērtēts, mērot detaļu brīvkustību
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 neviens parametrs
<i>Fei Lyu et al.</i> [8]	Jaukts	+	+	+	–	–	

<i>H. Kloss 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> [52]	Proņikovs	+	–	–	–	–	Nodilumu nosaka pēc salāgoto detaļu savstarpējā novietojuma izmaiņām
Kraģeļskis <i>et al.</i> [53, 54, 57]	Kraģeļskis	+	–	–	+/-	–	Lieto nestandarta virsmas raupjuma parametrus
Rudzītis <i>et al.</i> [50]	Rudzītis	+	–	–	+	–	Lieto standartizētos virsmas raupjuma parametrus (2D)

1.3. Secinājumi

Nodiluma noteikšanai joprojām tiek lietotas divas pamatpieejas – nodiluma analītiskais aprēķins un nodiluma vērtību noteikšana, veicot eksperimentālos pētījumus, taču eksperimentāliem pētījumiem bieži vien nepieciešams specifisks aprīkojums gan dilšanas procesa nodrošināšanai, gan arī dilšanas rezultātā radušos lielumu noteikšanai un analīzei.

Analizējot mūsdienu zinātnieku pētījumos lietotos nodiluma aprēķinus, tika secināts, ka joprojām tiek izmantotas vairākas nodiluma analītiskā aprēķina metodes. Katra no tām ir balstīta konkrētā dominējošo parametru ietveršanā aprēķinos. Bieži vien nodiluma aprēķina formulās iekļautie koeficienti/parametri ir nosakāmi ilgstošos eksperimentos, un tā rezultātā zūd jēga veikt analītiskos aprēķinus.

Apskatot I. Kraģeļska *et al.* modeli, ir jāatzīmē, ka nodiluma aprēķins ņem vērā virkni parametru, kas darbojas reālā dilšanas procesā, taču joprojām berzes virsmas tiek aprakstīta ar nestandartizētiem raupjuma parametriem un koeficientiem.

J. Rudzīša *et al.* nodiluma aprēķinu modelī tiek ņemti vērā standartizētie virsmas raupjuma profila parametri, modelējot virsmas mikrotopogrāfiju ar varbūtības teorijas atsevišķu sadaļu – gadījuma lauka teoriju un berzes virsmu sagraušana pēc nogurumteorijas likumsakarībām. Patlaban šo modeli var uzskatīt par pilnīgu berzes virsmu aprēķina modeli, taču kā būtisku trūkumu var minēt virsmas raupjuma profila (2D) parametru izmantošanu, kas nesniedz pilnīgu informāciju par berzes virsmas reālo mikrotopogrāfiju, un tā rezultātā samazinās nodiluma aprēķina precizitāte.

Balstoties literatūras apskatā, ir definēta šāda 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.

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

Šajā nodaļā tiek apskatīts berzes virsmas kontakta modelis un tā parametri, nodiluma aprēķina modelis un nodiluma aprēķina formulā ietilpstošo atsevišķo parametru optimizācijas piemēri.

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.

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 [41, 50]. Gadījuma lauks pie nodilušām virsmām tiek pieņemts kā normāls, t. i., tāda lauka ordinātas ir sadalītas pēc normālā sadalījuma likuma [50], un to raksturo augstuma parametrs Sq – vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes, μm .

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 τ_1 un τ_2 , kur τ_1 un τ_2 ir vektora τ , kas savieno divus virsmas punktus, projekcijas uz abscisu un ordinātu ass Dekarta koordinātu sistēmā [41].

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. Patlaban vairāku zinātnieku pētījumi [35–40, 42, 59] 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 iepriekšminētajā, apskatītajā virsmas kontakta modelī tiek integrēti raupjas virsmas definēšanai nepieciešamie 3D tekstūras parametri, kas tiks izmantoti turpmāk apskatītajos nodiluma analītiskajos aprēķinos.

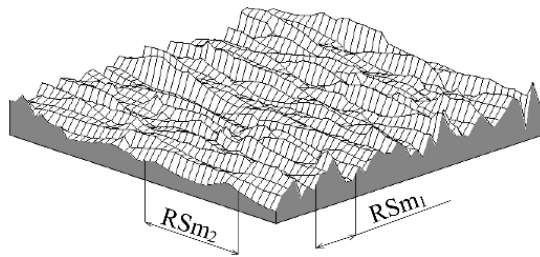
Nemot vērā iepriekšminēto, var definēt neregulāra rakstura berzes virsmas kontakta modeli – virsmas raupjums tiek aprakstīts ar normālo viendabīgo divu mainīgo lielumu x un y gadījuma lauku $h(x, y)$, kura korelācijas funkcija ir nepārtraukta un tai piemīt nepārtraukti atvasinājumi. Gadījuma lauka vidējo vērtību pilda plakne, ko var nosaukt par vidējo plakni [50, 51].

Saskaņā ar [50], 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, μm .

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 [45].

Soļu parametri RSm_1 un RSm_2 dod iespēju noteikt anizotropijas koeficientu Str [45]:

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

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

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 . Piedāvātie virsmas tekstūras (3D) parametri ir tehnoloģiski nodrošināmi virsmas sagatavošanas procesā un viegli nosakāmi ar mūsdienīgiem mēraparātiem, piemēram *Mitutoyo FORMTRACER Avant 3D* utt.

2.2. Nodiluma aprēķina matemātiskais modelis

Lineārā nodiluma U_l , μm , aprēķina procesu var aprakstīt ar 2.3. formulu [46]:

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

kur V_Σ – 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.

Faktisko ciklu skaitu N_{cf} , kas divu virsmu berzes procesā iedarbojas uz virsmas izciļņiem un, tos slogojot, deformē, aprēķina, izmantojot 2.4. formulu [45]:

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

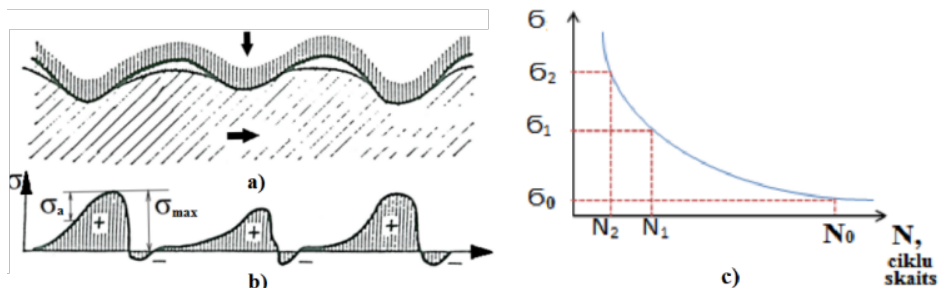
kur L_b – berzes ceļa garums, m;

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

2.3. Detaļu virskārtas sagraušanas modelis

Ir virkne pētījumu, kas apliecina dilšanas procesa noguruma dabu [50, 51, 58], t. i., kontaktējošo materiālu dilšanas procesā notiek noguruma plaisu rašanās un izplatīšanās, kas

galarezultātā izraisa materiāla daļiņu atdalīšanos. To veicina spriegumi, kas veidojas nelīdzenumu virsmas kontaktā un kas rada priekšnoteikumus materiāla sagraušanai (2.2. att.).



2.2. att. a) Neregulāras raupjas virsmas izciļņu savstarpējās iedarbības sloģošanas shēma; b) spriegumu izmaiņas shēma; c) ciklu skaita noteikšanas līkne [45].

Pie savstarpējās kustības katrs izcilnis, kura augstums pārsniedz zināmu līmeni, ko nosaka pēc pretējā izciļņa atrašanās vietas, deformē šo izcilni, radot tajā spriegumu lauku. 2.2. attēlā redzamas sprieguma izmaiņas, kas stiepes-spiedes gadījumā notiek pēc nesimetriska cikla. Ciklu skaitu N_c līdz materiāla sagraušanai, balstoties [90], nosaka, izmantojot 2.5. formulu:

$$N_c = \frac{N_0}{5 \cdot m!} \cdot t_\sigma^m. \quad (2.5.)$$

kur t_σ – bezdimensionāla (bezizmēra) spriegumu attiecība;

N_0 – materiāla izturības ciklu skaits pie asimetriskas slodzes atbilstoši ilgizturības spriegumu vērtībai σ_0 (2.2. c) att.);

m – materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs dīlstošajai virsmai.

Pamatojoties uz [50, 51] un ņemot vērā iepriekš aprakstītās sakarības, formula bezdimensionālās (bezizmēra) spriegumu attiecības t_σ noteikšanai, ir šāda:

$$t_\sigma = \frac{\sigma_0}{\sigma_a}. \quad (2.6.)$$

kur σ_0 – materiāla ilgizturības spriegumu robeža, MPa;

σ_a – sprieguma amplitūda, MPa;

2.6. formula ietver svarīgu parametru – σ_a , kas ir sprieguma amplitūda. Balstoties J. Rudziša [65, 66] un G. Konrāda [67] pētījumos un pieņemot, ka berzes rezultātā virsmai deformējas augstie nelīdzenumi, kuru sadalījuma blīvums ir pakāpes funkcija [66], un uzskatot, ka šie augstie nelīdzenumi atrodas virs līmeņa $\gamma = 2$, kā arī veicot atbilstošos vienkāršojumus, tiek iegūta šāda sakarība:

$$\sigma_a \approx \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E}{[K(e)]^{1/2}} \cdot \frac{Sa}{RSm_1}. \quad (2.7.)$$

2.7. formula raksturo vidējo sprieguma amplitūdu berzes procesā deformētiem nelīdzenumiem. Ievietojot 2.7. formulu materiāla sagraušanas pamatformulā (2.5. formula), tiek iegūta galaformula dīlstošās virsmas materiāla sagraušanai nepieciešamā ciklu skaita aprēķinam:

$$N_c = \frac{N_0}{5 \cdot m!} \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{\sigma_0 \cdot RSm_1 \cdot K(e)^{1/2}}{E \cdot Sa} \right]^m. \quad (2.8.)$$

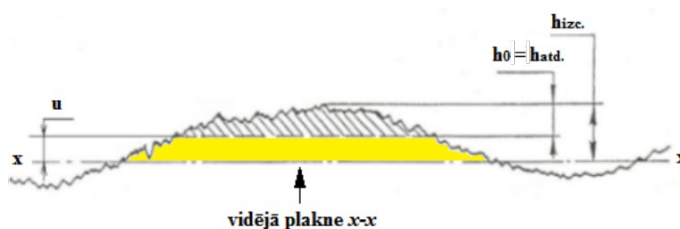
Iegūtās sakarības ļauj noteikt ciklu skaitu, kas nepieciešams materiāla sagraušanai. Šim nolūkam ir jāzina noguruma (Vellera) līknes raksturlielumi N_0 , m , σ_0 un materiāla elastības modulis E , kā arī raupjuma solis berzes šķērsvirzienā RSm_1 .

2.4. Dilšanas procesa daļiņu tilpuma aprēķins

Neregulāra rakstura virsmas raupjums konkrētajā modelī ir aprakstīts ar normālo gadījuma lauku $h(x, y)$, tāpēc šāda lauka augstos izciļņus var aprakstīt ar eliptiskiem paraboloīdiem, kuru segmenta tilpums V_i ir [58]:

$$V_i = \frac{\pi \cdot h_0^2}{K_i^{1/2}}. \quad (2.9.)$$

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



2.3. att. Nodiluma daļiņu iespējamā atdalīšanās no virsmas izciļņa [45].

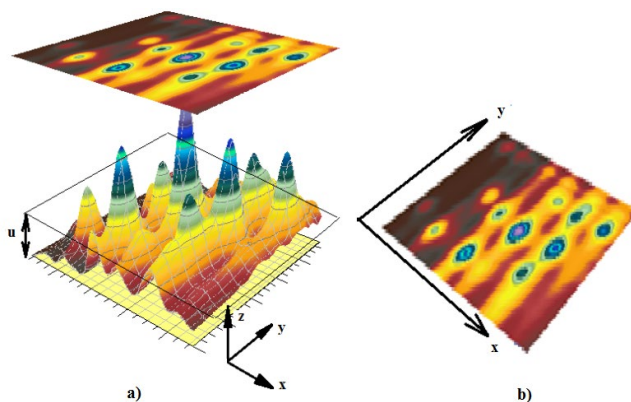
Dilšanas rezultātā atdalītās daļiņas biezums $h_{atd.}$ (2.3. att.) ir atkarīgs no virskārtas stāvokļa, uzkaldes zonas lieluma un citiem fizikāli mehāniskiem faktoriem, kas nosaka daļiņas veidošanos berzes procesā. Ņemot vērā apskatāmā kustīgā kontakta modeļa noteikumus, dilšana var noritēt pēc šādas shēmas: pie cikliskas izciļņu virsotņu slogošanas materiāla zemvirsmas slāņos rodas plaisa; sprieguma lauka ietekmē no slodzes notiek plaisu savienošanās, to augšana un daļiņu atslāņošanās ar biezumu $h_{atd.}$. Tiek pieņemts, ka $h_{atd.} = h_0$. Lielums $h_{atd.}$ novērtēts, balstoties virskārtas slāņa stāvokļa analizē [58]. Spēka ietekmē nelīdzenuma deformācija nonāk līdz līmenim u (līmeņa u normētā vērtība ir $\gamma = u/Sq$). Ņemot vērā iegūtās sakarības, kas tiek analizētas literatūrā [50, 51], un veicot matemātiskos aprēķinus, viena i -tā izciļņa atdalītā tilpuma vidējo vērtību V_i var noteikt šādi:

$$V_i \approx \frac{Sq}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \pi \cdot n_1(0) \cdot n_2(0)}. \quad (2.10.)$$

Lai noteiktu visu izciļņu atdalīto summāro tilpumu V_Σ , nepieciešams viena izciļņa iegūto tilpumu V_i reizināt ar deformēto izciļņu skaitu N_γ .

2.5. Deformēto izciļņu skaita noteikšana

Viens no svarīgākajiem parametriem dilšanas procesā ir 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) (2.4. att.) [47]. Atšķirībā no profila konkrētajā gadījumā šķelšana notiek pa nepārtrauktām līknēm, ko vienkāršotā veidā var redzēt 2.4. b) attēlā (skats uz nošķeltu virsmu no augšas).



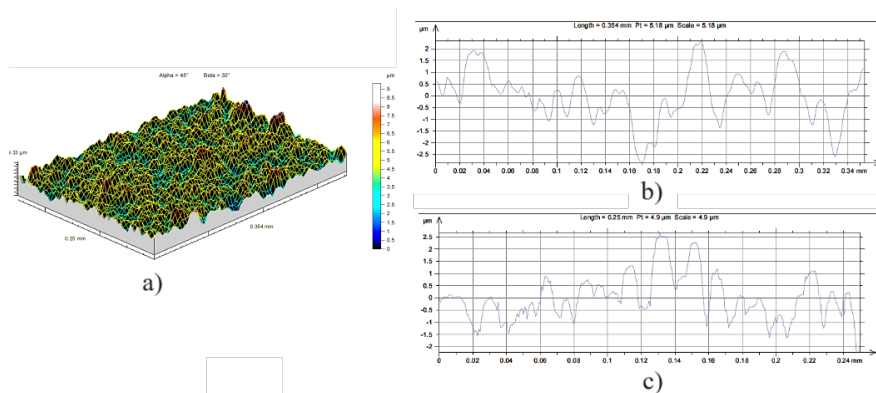
2.4. att. Virsmas izciļņu skaita grafisks attēlojums:

a) 3D virsmas šķēlums līmenī u ; b) virsmas izciļņu šķēlums līmenī u (skats no augšas) [47].

Ņemot par pamatu iepriekš veikto analīzi un veicot matemātiskos pārveidojumus, pieņemot, ka deformācija notiek ar augstākiem negludumiem (tad var pieņemt $\gamma \geq 2$), izciļņu skaitu N_γ uz laukuma vienību nosaka pēc 2.11. formulas [47].

$$N_\gamma = \frac{1}{5} \cdot n_1(0) \cdot n_2(0). \quad (2.11.)$$

Lai pēc 2.11. formulas pārbaudītu izciļņu skaita aprēķināto vērtību atbilstību, tika veikts eksperiments. Eksperimentālie mērījumi tika veikti pārklātai virsmai (2.5. att.), izmantojot *Taylor Hobson Intra 50* virsmas tekstūras mēriekārtu.



2.5. att. Virsmas 3D tekstūras raupjuma parametru mērījums:

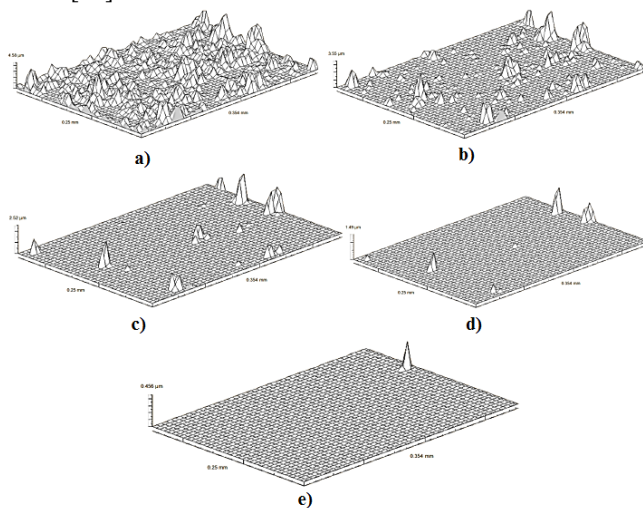
a) virsmas 3D attēls; b) profils x ass virzienā (gar parauga garāko malu); c) profils y ass virzienā (gar parauga īsāko malu) [47].

Konkrētajā gadījumā virsmu raksturo šādi galvenie parametri:

$Sa = 0,811 \mu\text{m}$; $Sds = 11624 \text{ pks/mm}^2$ (izciļņu skaits).

Nullu skaitu un teorētiskajam aprēķinam nepieciešamos lielumus var atrast, izmantojot profila parametrus (2.5. att. a) un b)), kas tika noteikti 3D virsmai: $RSm_1 = 0,0253 \text{ mm}$, $RSm_2 = 0,0166 \text{ mm}$.

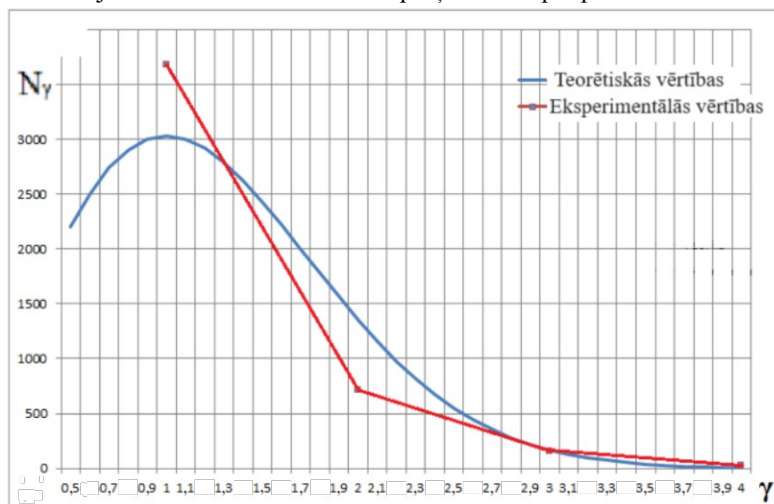
Lai noteiktu virsmas izciļņu skaitu atkarībā no līmeņa u , virsma tika nošķelta dažādos līmeņos, skaitot no vidējās plaknes. Šķēluma piemēri pie $u = 1 Sq$, $u = 2 Sq$, $u = 3 Sq$ un $u = 4 Sq$ doti 2.6. attēlā [64].



2.6. att. Virsmas šķēlumi dažādos līmeņos:

a) virsmas šķēlums pa viduslīniju; b) virsmas šķēlums $1 Sq$ virs viduslīnijas; c) virsmas šķēlums $2 Sq$ virs viduslīnijas; d) virsmas šķēlums $3 Sq$ virs viduslīnijas; e) virsmas šķēlums $4 Sq$ virs viduslīnijas [47].

Izciļņu skaita mērījumu rezultāti un analītisko aprēķinu dati apkopoti 2.7. attēlā.



2.7. att. Eksperimentālais un teorētiskais izciļņu skaits [47].

2.7. attēlā ir redzams, ka virsmas negludumu skaits, kas iegūts saskaņā ar iepriekšminēto aprēķinu modeli, pie augstiem γ līmeņiem ($\gamma \geq 2,5$) ir tuvs eksperimentālajiem datiem, kas ļauj secināt, ka teorētisko aprēķina formulu var izmantot izciļņu skaita aprēķinam pie $\gamma \geq 2,5$.

Ņemot vērā iepriekš minētās sakarības, veicot matemātiskos aprēķinus, kā arī izsakot vidējo kvadrātisko novirzi Sq , izmantojot 2.1. formulu, berzes rezultātā atdalīto izciļņu summārais tilpums uz laukuma vienību tiek aprēķināts šādi:

$$V_{\Sigma} = \frac{Sa \cdot \sqrt{\pi}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \gamma^2}. \quad (2.12.)$$

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

N_{γ} – deformēto izciļņu skaits uz laukuma vienību.

2.6. Nodiluma aprēķina pamatsakarības

Izmantojot 2.3. formulu un ievietojot tajā 2.4., 2.8. un 2.12. vienādojumus, tiek iegūta lineārā nodiluma aprēķina formula:

$$U_l = \frac{5 \cdot m!}{N_0} \cdot \frac{Sa \cdot \sqrt{\pi}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \gamma^2} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_0} \right)^m \cdot \left(\frac{Sa}{RSm_1} \right)^m \cdot \left(\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot \frac{L_b}{RSm_2^a}. \quad (2.13.)$$

2.23. formula bez iepriekš zināmiem detaļu fizikāli mehāniskiem parametriem vēl ietver parametru γ , kas tiek noteikts detaļu kontaktā kā relatīvais virsmas deformācijas līmenis. Šis līmenis tiek noteikts dilumam pakļautajai virsmai, izmantojot kontaktteorijas formulas [66]:

$$q = \frac{k_q \cdot Sa}{RSm_1 \cdot \theta} \cdot F_1(\gamma). \quad (2.14.)$$

kur q – slodze uz kontaktējošām virsmām;

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

$F_1(\gamma)$ – funkcija, kas ir atkarīga no deformācijas līmeņa γ .

Izsakot γ un veicot matemātiskos pārveidojumu, kā arī sasaistot lineāro nodilumu ar berzes virsmas kustību parametriem (slīdes ātrums v un kustības laiks t), tiek iegūta slīdes berzes pāra vidējā lineārā nodiluma U_l aprēķina galaformula:

$$U_l = 32 \cdot \frac{m!}{N_0 \cdot k_q^2} \cdot \frac{E^{m-2}}{\sigma_0^m} \cdot \frac{Sa^{m-1}}{RSm_1^{m-2}} \cdot \left(\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot \frac{v \cdot t}{RSm_2^a}. \quad (2.15.)$$

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;

σ_0 – dilstošās detaļas materiāla ilgizturības robežspriegums, MPa;

Sa – dilstošās detaļas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes, μm ;

RSm_1 – solis perpendikulāri apstrādes virzienam dilstošajai detaļai, mm;

π – matemātiskā konstante;

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

q – slodze, kas pielikta dilstošajai detaļai, MPa;

L_b – berzes ceļš;

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 šādi:

$$V_{U_l} = \frac{U_l(t)}{t} = 32 \cdot \frac{m!}{N_0 \cdot k_q^2} \cdot \frac{E^{m-2}}{\sigma_0^m} \cdot \frac{Sa^{m-1}}{RSm_1^{m-2}} \cdot \left(\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot \frac{1}{RSm_2^a} \cdot v. \quad (2.16.)$$

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

$$T = \frac{U_l}{V_{U_l}}. \quad (2.17.)$$

Redzams, ka 2.15. un 2.16. vienādojumā 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 iepriekš noteikts. Tad no lineārā nodiluma aprēķina matemātiskā modeļa (2.15. formula) iespējams iegūt berzes pāra kalpošanas laika kritēriju T dažādās formās un apskatīt vairāku atsevišķu parametru ietekmes variantus. Piemērs ir balstīts berzes pāra eksperimentālajos pētījumos izmantotajos datos (4. nod.), paplašinot pētāmo lielumu vērtību intervālu noteiktās robežās.

Konkrētajā 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 2.15. formulas.

1. Analizējot parametru Sa un RSm_1 ietekmi uz kalpošanas laiku un pieņemot, ka šajā un turpmākajos gadījumos $m = 4$ (dilstošās detaļas materiālam), tiek aplūkoti dotie parametri (x , y šādā formā:

$$T = C_1 \cdot \frac{y^2}{x^3}. \quad (2.18.)$$

kur $x = Sa$; $y = RSm_1$.

Izsakot T , tiek iegūta šāda izteiksme:

$$T = \frac{U_l \cdot N_0 \cdot k_q \cdot \sigma_0^m \cdot RSm_1^{m-2} \cdot RSm_2^a}{32 \cdot m! \cdot E^{m-2} \cdot Sa^{m-1} \cdot \left(\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot v}. \quad (2.19.)$$

Konstantes C_1 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, $RSm_1 = 0,017$ mm, $RSm_2^a = 0,065$ mm:

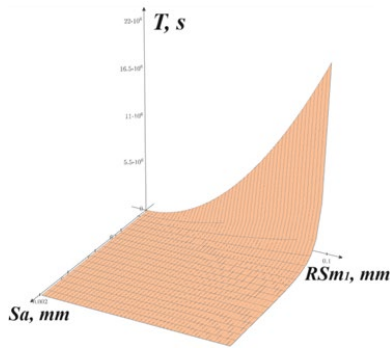
$$C_1 = \frac{U_l \cdot N_0 \cdot k_q^2 \cdot \sigma_0^m \cdot RSm_2^a}{32 \cdot m! \cdot E^{m-2} \cdot \left(\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}} \right)^m \cdot q^2 \cdot v} = 1,772 \times 10^{-2}. \quad (2.20.)$$

Parametru Sa un RSm_1 robežvērtības: $Sa = 0,0002...0,002$ mm; $RSm_1 = 0,001...0,1$ mm.

Ņemot vērā 2.18. izteiksmi, T aprēķins tiek veikts šādi:

$$T(Sa, RSm_1) = \frac{C_1 \cdot RSm_1^2}{Sa^3} = 22 \times 10^6 \text{ [s]}. \quad (2.21.)$$

2.8. attēla grafiks ilustrē slīdes berzes pāra maksimālo kalpošanas laiku, kas var tikt sasniegts pie konkrētām parametru Sa un RSm_1 skaitliskajām vērtībām.



2.8. att. Maksimālā kalpošanas laika ekstrēms ($T = 22 \times 10^6$ s) pie Sa un RSm_1 kā mainīgajiem parametriem.

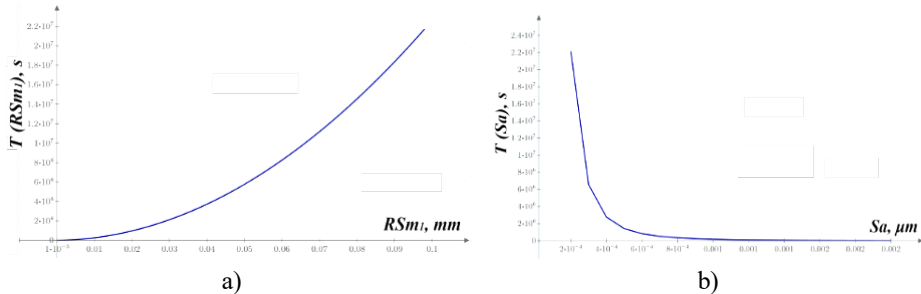
Saskaņā ar ekstrēmu meklēšanas teoriju divu parametru x, y plaknē var atrast kritērija parciālos atvasinājumus $\frac{\partial K}{\partial x}, \frac{\partial K}{\partial y}$ pēc katra mainīgā lieluma x un y :

$$\frac{d}{dx} C_I \cdot \frac{y^2}{x^3} = \frac{-3 \cdot C_I \cdot y^2}{x^4}. \quad (2.22.)$$

$$\frac{d}{dy} C_I \cdot \frac{y^2}{x^3} = \frac{2 \cdot C_I \cdot y}{x^3}. \quad (2.23.)$$

No 2.22. un 2.23. izteiksmes izriet, 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 $RSm_1 = 0,1$ 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 un RSm_1 ir ar maksimālo vērtību, redzams 2.9. attēlā.



2.9. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no: a) RSm_1 ; b) Sa .

Šī analīze rāda, ka, nodrošinot mehānisma izstrādes procesā atbilstošās salāgojamo detaļu kontaktvirsmu tekstūras parametru Sa un RSm_1 vērtības, t. i., samazinot Sa un palielinot RSm_1 , 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_1) lielumiem.

2. Analizējot ātruma v un slodzes q ietekmi uz kalpošanas laiku, tiek aplūkoti dotie parametri (x, y) šādā formā:

$$T = C_2 \frac{I}{x^2 \cdot y}. \quad (2.24.)$$

kur $x = q = 0,1 \dots 2,5$ MPa;

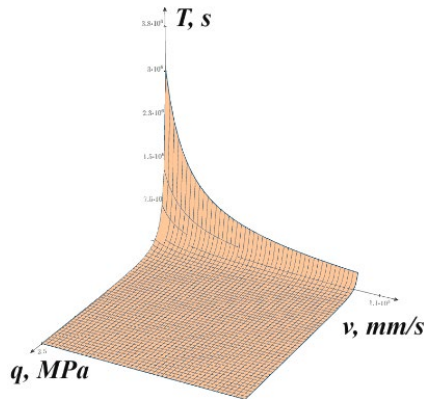
$y = v = 100 \dots 1000$ mm/s.

Šajā gadījumā konstante $C_2 = 3,05 \times 10^6$.

Ņemot vērā 2.24. izteiksmi, T aprēķins tiek veikts šādi:

$$T(q, v) = \frac{C_2}{q^2 \cdot v} = 3 \times 10^6 \text{ [s]}. \quad (2.25.)$$

2.10. attēla grafiks ilustrē maksimālo kalpošanas laiku, mainot parametru q un v skaitliskās vērtības.



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

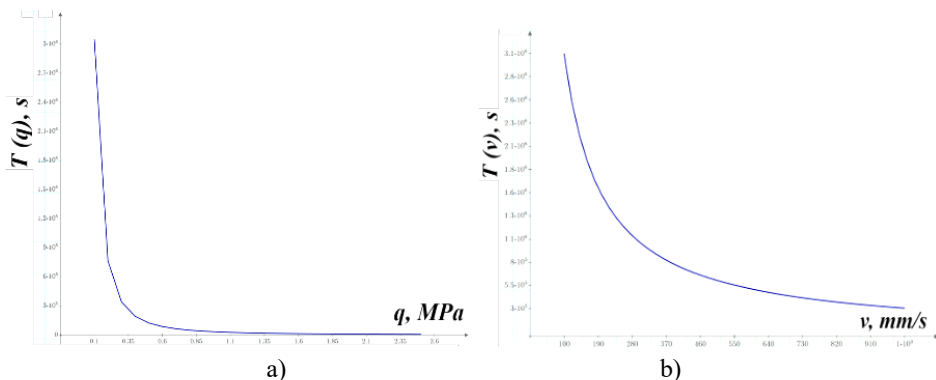
Kritērija parciālie atvasinājumi $\frac{\partial K}{\partial x}, \frac{\partial K}{\partial y}$ pēc katra mainīgā lieluma x un y :

$$\frac{d}{dx} \frac{C_2}{x^2 \cdot y} = \frac{-2 \cdot C_2}{x^3 \cdot y}. \quad (2.26.)$$

$$\frac{d}{dy} \frac{C_2}{x^2 \cdot y} = \frac{-C_2}{x^2 \cdot y^2}. \quad (2.27.)$$

No 2.26. un 2.27. izteiksmes izriet, ka atvasinājums pēc x un y kā mainīgajiem abos gadījumos ir negatīvs, tādējādi optimālais atrisinājums būs uz parametra x un y minimālās robežas: $x = x_{\min}$, $y = y_{\min}$, t. i., slīdes berzes pāris pie $q = 0,1$ MPa un $v = 100$ mm/s kalpos 3×10^6 sekundes, t. i., 833 stundas.

Berzes pāra kalpošanas laika aprēķina vizualizācijas piemērs, kad parametri q un v ir ar minimālo vērtību, redzams 2.11. attēlā.



2.11. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no: a) q ; b) v .

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

3. Analizējot parametru Sa un RSm_2^a ietekmi uz kalpošanas laiku, tiek aplūkoti dotie parametri (x, y) šādā formā:

$$T = C_3 \cdot \frac{y}{x^3}. \quad (2.28.)$$

kur $x = Sa = 0,0002...0,002$ mm;

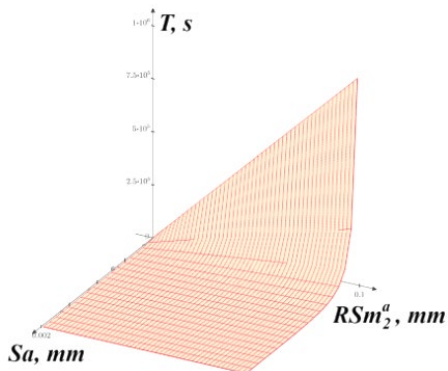
$y = RSm_2^a = 0,001...0,1$ mm.

Konstante $C_3 = 7,878 \times 10^{-5}$.

Ņemot vērā 2.28. izteiksmi, T aprēķins tiek veikts šādi:

$$T(Sa, RSm_2^a) = \frac{C_3 \cdot RSm_2^a}{Sa^3} = 9,8 \times 10^5 \text{ [s]}. \quad (2.29.)$$

2.12. attēla grafiks ilustrē maksimālo kalpošanas laiku, mainot parametru Sa un RSm_2^a skaitliskās vērtības.



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

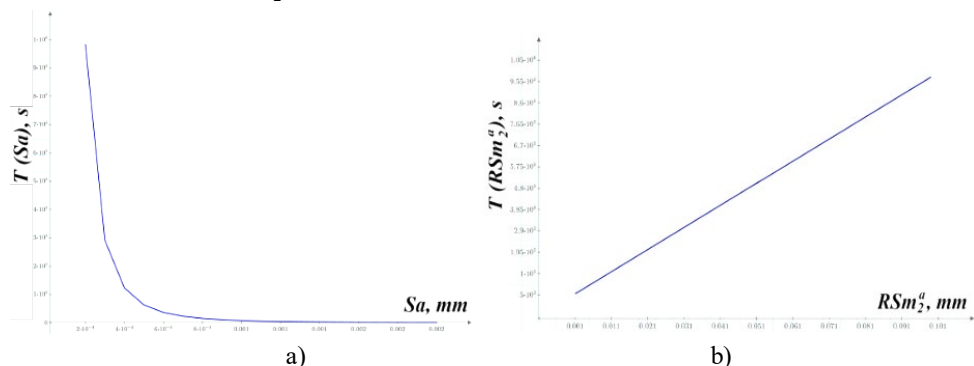
Kritērija parciālie atvasinājumi $\frac{\partial K}{\partial x}$, $\frac{\partial K}{\partial y}$ pēc katra mainīgā lieluma x un y :

$$\frac{d}{dx} \frac{C_3 \cdot y}{x^3} = \frac{-3 \cdot C_3 \cdot y}{x^4}. \quad (2.30.)$$

$$\frac{d}{dy} \frac{C_3 \cdot y}{x^3} = \frac{C_3}{x^3}. \quad (2.31.)$$

No 2.20. un 2.31. izteiksmes izriet, 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 kalpos $9,8 \times 10^5$ sekundes, t. i., 272 stundas.

Berzes pāra kalpošanas laika aprēķina vizualizācijas piemērs, kad Sa parametrs ir ar minimālo vērtību un RSm_2^a ir ar maksimālo vērtību, redzams 2.13. attēlā.



2.13. att. Slīdes berzes pāra kalpošanas laiks atkarībā no: a) Sa ; b) RSm_2^a .

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

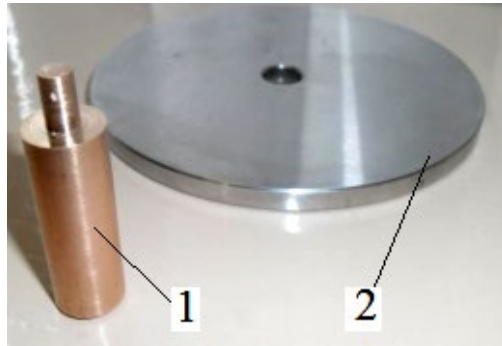
Šajā nodaļā aprakstīti pirmā posma priekšizpētes eksperimentālie pētījumi, kuru mērķis ir pārbaudīt analītiskā aprēķina 1.2. vienādojuma iegūto rezultātu atbilstību eksperimentam un novērtēt nodiluma aprēķina modeļa atbilstību praktisko inženieruzdevumu risināšanā, prognozējot nodilumu, kas iepriekš 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 nepieciešamos mērījumus paraugiem pirms eksperimenta un tā laikā.

Nodiluma pētījumiem tika izvēlēti šādi paraugi:

- 1) cilindriskas formas piespiedējrullītis (3.1. att.) ar kontaktvirsmas diametru – 6,5 mm; materiāls – bronza (CuSn8, *DIN 2.1030*);
- 2) disks (diametrs – 100 mm, biezums – 6 mm); materiāls – tērauds (42Cr4, *DIN 17212*).



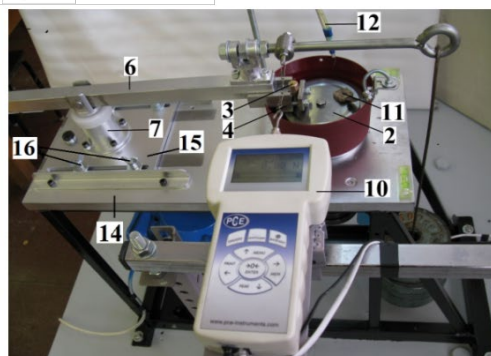
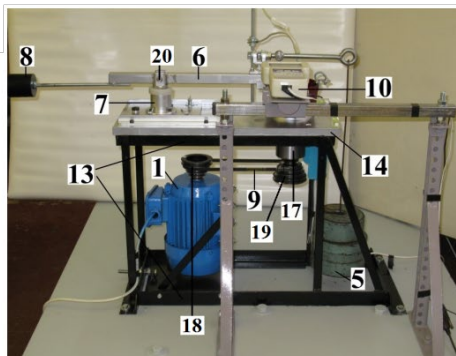
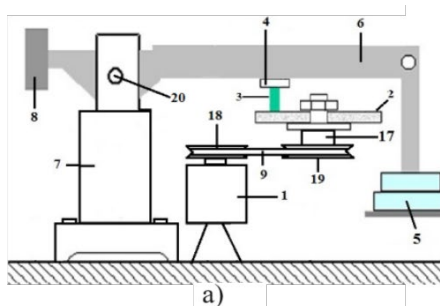
3.1. att. Slīdes berzes paraugi.

Pirms eksperimenta paraugi tika apstrādāti, nodrošinot nepieciešamo paraugu kontaktējošo virsmu raupjumu. Pēc slīpēšanas darbiem abiem paraugiem tika veikti virsmas raupjuma parametru kontrolmērījumi atbilstoši *EN ISO 4287* standartam. Bronzas piespiedējrullītim tika veikta arī garuma kontrole, 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, to var izmantot arī turpmākos pētījumos. Iekārtas principiālā shēma un kopskats redzams 3.2. attēlā.

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). Izmērīto parametru dati tika apkopoti, izmantojot datu apstrādes programmatūru *PCE-FG*.



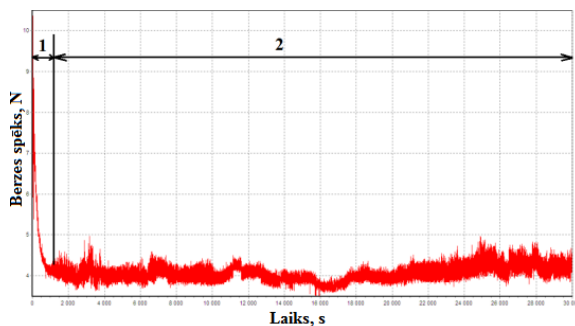
3.2. att. Berzes un dilšanas procesa pētījumu iekārtas principiālā shēma:

1 – elektromotors; 2 – rotējošs disks; 3 – piespiedējrullītis; 4 – piespiedējrullīša turētājs; 5 – slogošanas atsvari; 6 – slogošanas svārstsvira; 7 – slogošanas svārstsviras fiksācijas ass gultņu korpusu; 8 – atsvars; 9 – siksnas pārvads; 10 – spēka mērīšanas iekārta *PCE-FG50*; 11 – eļļošanas izkliedētājšvammīte; 12 – eļļas padeves kanāls; 13 – nesošais rāmis; 14 – plāksne; 15 – slogošanas svārstsviras pārvietošanas plāksne; 16 – pārvietošanas plāksnes fiksatori; 17 – vārpstas gultņu korpus; 18 – dzenošais skrīmelis; 19 – dzītais skrīmelis; 20 – slogošanas svārstsviras pagrieziņa ass.

Nepieciešamo raupjuma parametru mērījumi tika veikti, izmantojot portatīvo profilometru *Taylor Hobson SURTRONIC 25* (*Taylor Hobson*, Lielbritānija). Piespiedējrullīša garuma kontrolei pirms eksperimenta un eksperimenta attiecīgajos posmos tika izmantots digitālais mikrometrs *Mitutoyo* (*Mitutoyo*, Japāna) ar precizitāti 0,001 mm. Eksperimenta gaitā iegūto datu turpmākai apstrādei un analīzei tika lietotas datu apstrādes un analīzes programmas *Microsoft Excel* un *MathCad*.

3.3. Eksperimentu 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 izvēlēta un iestatīta slodze q un slīdes ātrums v (3.1. tab.). Pamatojoties uz to, ka 1.2. formula paredz aprēķinam nepieciešamos virsmas raupjuma parametrus noteikt pēc piestrādes procesa beigām, pētījumā piestrādes process tika kontrolēts, vadoties pēc berzes koeficienta nostabilizēšanās (3.3. att.). Nosakot Ra , Sm_1 un Sm_2^a pēc piestrādes, kā arī izmērot bronzas piespiedējrullīša garumu un nosakot tā masu, eksperiments tika turpināts. Bronzas rullīša garums (kontrolei arī masa) tika mērīts pēc noteikta dilšanas laika, nosakot eksperimentālo nodilumu (3.2. tab.).



3.3. att. Berzes spēks laikā:

1 – piestrādes periods; 2 – normālais dilšanas periods.

3.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze

Eksperimentā un analītiskajos aprēķinos izmantotie lielumi apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Eksperimentālajā pētījumā iestatītie lielumi un virsmas raupjuma parametri pēc piestrādes

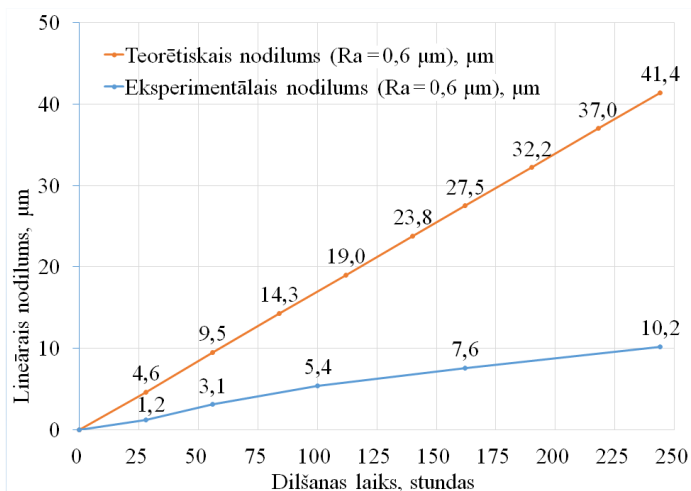
Parametrs		Apzīmējums	Skaitliskā vērtība	Mērvienība
Slodze		q	11	MPa
Slīdes berzes ātrums		v	5000	mm/s
Piespiedējruļļa (bronzā, CuSn8) materiāla noguruma sagraušanas parametri:	Materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs	m	4	–
	Materiāla izturības robeža pie simetriska sloģojuma cikla	σ_{-1}	150	MPa
	Materiāla izturības ciklu skaits	N_0	5×10^6	–
Piespiedējruļļa materiāla elastības modulis		E	$1,15 \times 10^6$	MPa
Virsmas raupjuma parametri (pēc piestrādes)	Virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze	Ra	0,6	μm
	Dilstošās detaļas (piespiedējruļļa) vidējais solis	Sm_1	0,060	mm
935820	Nodilumu aktivizējošās virsmas (diska) vidējais solis	Sm_2^a	0,5	mm
Nodilums pēc piestrādes		U_p	7	μm

Lineārā nodiluma aprēķinātās vērtības apkopotas 3.2. tabulā, nodiluma līknes – 3.4. attēlā.

3.2. tabula

Eksperimentālais un analītiski aprēķinātais lineārais nodilums

Mērījuma Nr.	Laiks, stundas	Vidējais eksperimentālais nodilums pēc piestrādes, μm	Vidējais nodilums (teorija), μm
Pēc piestrādes (16 stundas), nodiluma lielums – 7 μm			
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

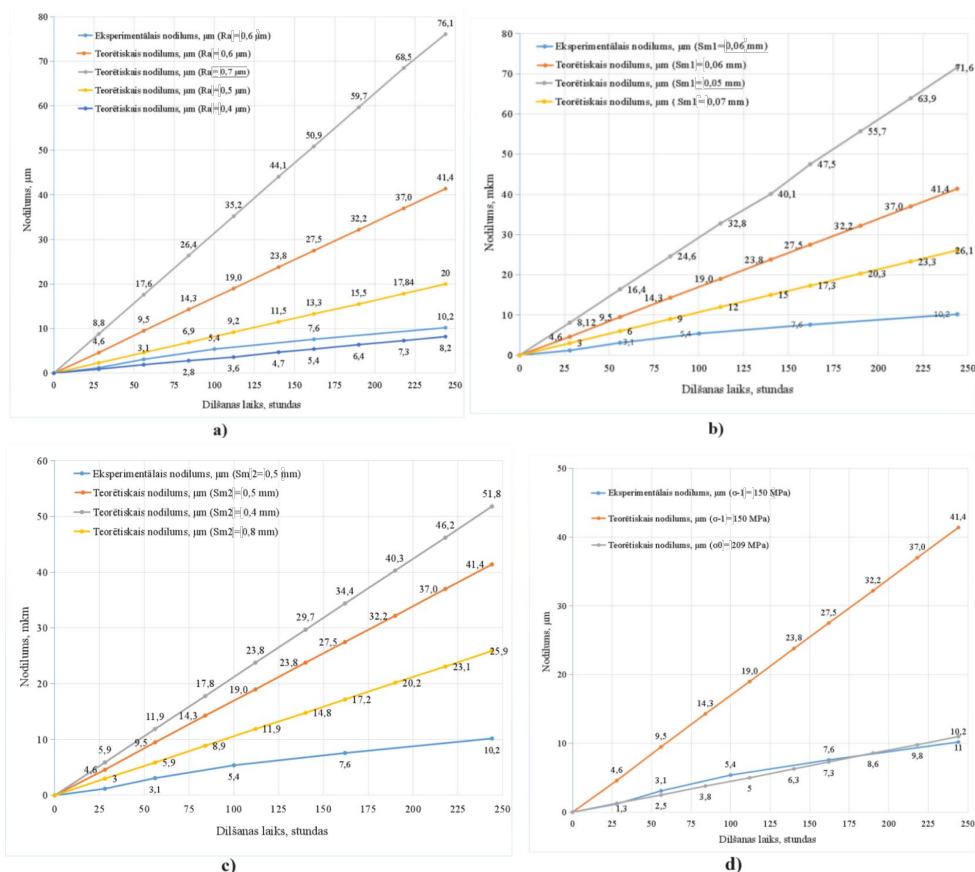


3.4. att. Lineārā nodiluma vidējo eksperimentālo un teorētisko vērtību salīdzinājums (neņemot vērā piestrādes periodu).

Konkrētajam berzes pārim piestrādes laiks ir 16 stundas, t. i., nodilums normālam periodam tiek rēķināts pēc piestrādes perioda beigām. Eksperimenta laiks normālam dilšanas periodam ir 244 stundas (berzes ceļš – 4392 km). 3.4. attēlā redzamā zilā līkne raksturo eksperimentāli iegūtās lineārā nodiluma vērtības, oranžā līkne – teorētisko lineāro nodilumu pēc 1.22. formulas. Redzams, ka eksperimenta beigās teorētisko un eksperimentālo nodiluma vērtību atšķirība ir četras reizes. 1.22. formulā 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 papildu (atšķirīgas no eksperimenta) Ra , Sm_1 un Sm_2^a vērtības. Šīs analīzes mērķis nav piemēklēt tuvāko attiecīgā parametra vērtību, kas dod nodiluma eksperimentālo datus 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 (3.5. att.).

Kā redzams, samazinoties Ra vērtībai, nodilums samazinās (3.5. att. a)). Tuvāko nodiluma vērtību atbilstību eksperimenta datiem pie izvēlētiem parametra Ra vērtībām iespējams panākt variantā, ja $Ra = 0,4 \mu m$, kad rezultātu atšķirība dilšanas posma beigās nepārsniedz 20 %. Piemēram, samazinot Ra vērtību no $0,6 \mu m$ uz $0,5 \mu m$, t. i., par $0,1 \mu m$, analītiski aprēķinātā nodiluma vērtība samazinās par 52 % un, salīdzinot to ar eksperimenta datiem, atšķirība ir 50 %. Savukārt, palielinot Ra vērtību, analītiski aprēķinātā nodiluma vērtība arī pieaug.

Aplūkojot grafiku (3.5. att. b)), var secināt, ka, palielinoties dilstošās virsmas vidējā šķa Sm_1 vērtībai, nodilums samazinās, t. i., jo lielāks ir solis, jo lielāks ir nelīdzenums uz berzes virsmas, un tas ir izturīgāks pret deformācijām. Konkrētajā eksperimentā šķa Sm_1 vērtība ir $0,06 \text{ mm}$. Aprēķinot nodilumu berzes virsmai ar šādu Sm_1 vērtību, redzams, ka nodiluma eksperimentālā un teorētiskā vērtības eksperimenta beigās atšķiras četras reizes. Pieņemot, ka šķa Sm_1 vērtība tiek palielināta par $0,01 \text{ mm}$, eksperimentālā un teorētiski aprēķinātā nodiluma vērtību atšķirība samazinās un ir neredzama vairāk nekā divas reizes. Palielinot Sm_1 vērtību, nodilums strauji pieaug.



3.5. att. Virsmas raupjuma parametru un materiāla izturības robežspriegumu σ_{-1} ietekme uz lineāro nodilumu: a) Ra ietekme; b) Sm_1 ietekme; c) Sm_2 ietekme; d) σ_{-1} ietekme (neņemot vērā piestrādes periodu).

Soļa Sm_2^a (3.5. att. c)) vērtību izmaiņu ietekme uz nodiluma lielumu ir šāda: jo lielāks šis solis, jo retākus triecienus slīdes berzes pāra kustības laikā saņem dilstošās virsmas nelīdzenumi, tādējādi nodilums būs mazāks.

Analizējot 3.5. attēla (a, b, c) grafikus, redzams, ka būtisku ietekmi rada tieši berzes pāra kontaktējošo virsmu raupjuma parametri, un tā 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 ir savstarpēji saistīti, t. i., izmainot vienu, automātiski mainās arī pārējie parametri, kas šajā analizē netika ņemts vērā, lai parādītu katra atsevišķi ņemtā parametra ietekmi uz kopējo dilšanas procesu un summāro nodilumu.

3.10. attēla d) grafiks ilustrē materiāla izturības robežas σ_r skaitliskās vērtības izmaiņas ietekmi uz analītiski aprēķinātā nodiluma lielumu. Balstoties J. Rudziša nodiluma aprēķina formulā (1.22. formula), $\sigma_r = \sigma_{-1}$. Konkrētajam bronzas materiālam σ_{-1} vērtība pie simetriska cikla veido 150 MPa. Pēc darba autora uzskatiem, šāda tipa slīdes berzes procesā notiek virsmas izciļņu nesimetriskais slogojums. Tādā gadījumā $\sigma_r = \sigma_0$. σ_0 vērtība nesimetriskam ciklam veido 209 MPa. Kā redzams 3.5. attēla d) grafikā, pie sprieguma, kas ir paredzēts nesimetriska

slogojuma gadījumā, nodiluma vērtību sakritība ir tuvu 93 %. Jo lielāks σ_r , jo lielāka ir materiāla noguruma pretestība un nodilums mazāks, kas redzams grafikā (3.10. att.; pelēkā līkne).

3.5. Secinājumi

1. Pirmoreiz ir veikta J. Rudziša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskā modeļa (1.2. 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. Rudziša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskā modeļa (1.2. 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. Rudziša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskajā modelī (1.2. 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. Rudziša berzes virsmu nodiluma aprēķina matemātiskais modelis (1.2. formula) veidots ar pieņēmumu, ka virsmas nelīdzenumi tiek slogoti simetriski, tādējādi izturības robeža pie simetriska cikla $\sigma_r = \sigma_{-1}$. 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

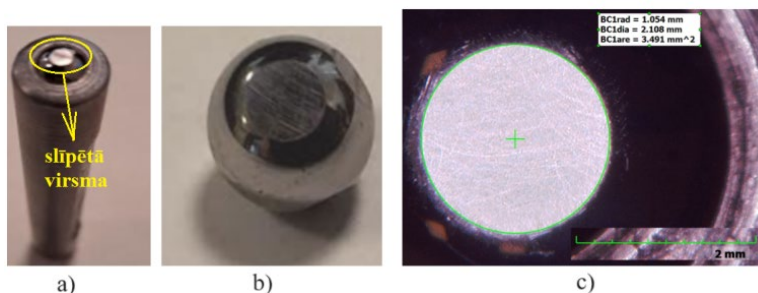
Šajā nodaļā apskatīti otrā posma eksperimentālie pētījumi, kuru mērķis ir pārbaudīt jaunā sintezētā berzes virsmu nodiluma aprēķina modeļa, kas ietver gan 3D virsmas tekstūras standartizētos parametrus, gan arī materiāla noguruma nodiluma parametrus, analītiski iegūto rezultātu sakritību ar eksperimentālajos pētījumos iegūtajiem datiem.

4.1. Paraugu materiāla izvēle un sagatavošana

Pētījumiem tika izvēlēta shēma “lodīte ar noslīpētu kontaktplakni – rotējošs disks”.

Nodiluma pētījumiem tika izvēlēti šādi paraugi un to materiāli:

1) tērauda lodīte (4.1. att.), diametrs – 6 mm. Lodītes materiāls – 102Cr6 (*EN 1.2067*), cietība – HRC $\approx$ 63. Lodītes paraugam pirms eksperimenta tika veikta apstrāde – slīpēšanas rezultātā iegūta plakne (tās laukums $\sim$ 2,1 mm);



4.1. att. Lodīte ar noslīpētu virsmu:

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

2) bronzas disks (diametrs – 40 mm, biezums – 5,5 mm). Diska virsma tika slīpēta ar smilšpapīru ar dažādu abrazīvo graudu gradāciju, līdz virsmai tika nodrošināts $Sa < 0,1$.

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

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

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 acetonā iemērkto 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. Darba secība, mērījumu veikšana un eksperimentu gaita

Abu bronzas materiālu veidiem un katrā no iestatīto parametru (ātrums v , slodze q) variantiem tika veikti pieci eksperimenti, izmantojot *CSM* tribometru (*CSM Tribometer*, Šveice). Eksperimentos iegūtās atbilstošo parametru mērījumu vidējās vērtības, kā arī eksperimentam un aprēķinam nepieciešamie lielumi apkopoti 4.2. un 4.3. tabulā. Lai izvairītos no līkņu pārklāšanās nodiluma rezultātu grafikos, no pieciem eksperimentu datiem katrā v un q parametru vērtību kombinācijā tika aprēķinātas vidējās vērtības, kas grafikos redzamas kā lineārā nodiluma līknes.

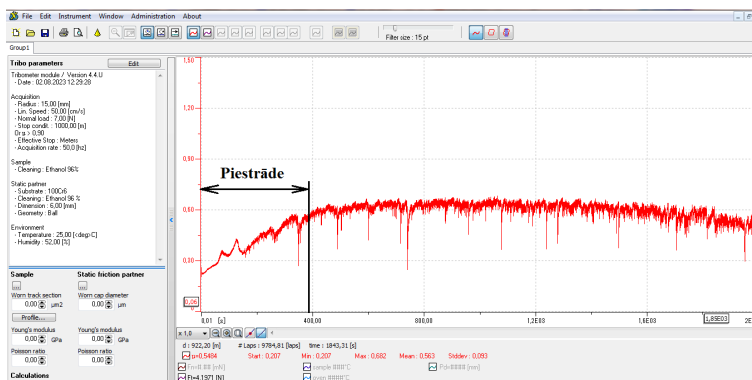
Pēc paraugu virsmu attiecīgās sagatavošanas lodes un bronzas diska paraugi tika nostiprināti tribometra fiksatoros. Pēc iepriekš veiktajiem eksperimentālajiem priekšizpētes darbiem tika izvēlētas trīs slidēšanas ātruma un slodzes variantu kombinācijas (4.1. tab.).

4.1. 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 diametrs, mm^2		
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 kontaktvirsmu piestrādes procesā darbojas virkne faktoru, kas pietiekami strauji maina dilšanas procesā iesaistīto virsmas parametru vērtības, līdz brīdim, kamēr berzes process nav nostabilizējies, tādējādi abu paraugu virsmas tekstūras (3D) parametru mērījumi, kas tika realizēti, izmantojot 3D kontūru un virsmas tekstūras mērīšanas sistēmu *Mitutoyo FORMTRACER Avant 3D* (*Mitutoyo*, Japāna), bija veikti pēc piestrādes procesa beigām. Jāatzīmē, ka 2.15. vienādojums ir derīgs nodiluma aprēķiniem, veicot mērījumus jebkurā detaļu dilšanas procesa ceļa/laika brīdī, savukārt piestrādes procesa posma korektai nodiluma vērtību aprēķināšanai nepieciešamie virsmas tekstūras (3D) parametri būtu jāmēra pietiekami bieži, kas prasa papildu laika resursus un spēj prognozēt nodilumu īsam ceļa/laika intervālam. Piestrādes procesa periods tika noteikts, vadoties pēc berzes koeficienta nostabilizēšanās eksperimenta norises procesā, kas tika kontrolēts ar datu apstrādes programmatūras *InstrumX* palīdzību (4.2. att.).



4.2. att. Nodiluma procesa piestrādes perioda noteikšana.

Eksperimentālo pētījumu laikā noteiktais piestrādes periods atbilstošajām ātruma v un slodzes q kombinācijām redzams 4.1. tabulā.

Nodiluma vērtību mērījumi eksperimentā tika kontrolēti pēc katriem 500 m berzes ceļa. Nodilušās trases platuma un šķēsgriezuma laukuma noteikšanai tika izmantots profilometrs *Mitutoyo SURFTEST SJ-500* (*Mitutoyo*, Japāna).

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

4.3. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6) – bronza (CW456K)

Eksperimentā nomērītie un analītiskajiem aprēķiniem, kas tiek veikti pēc 2.15. formulas, nepieciešamie lielumi slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6)-bronza (CW456K), apkopoti 4.2. tabulā. Šajā 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 aprēķināts.

4.2. tabula

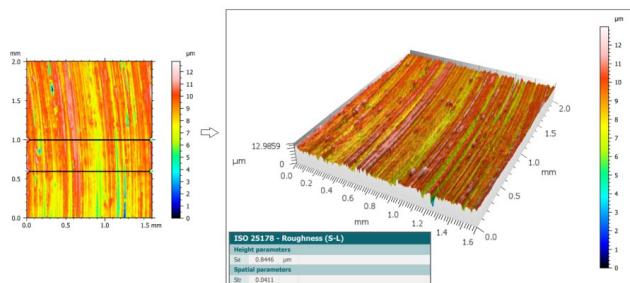
1. grupas paraugu eksperimentālajā pētījumā iestatīti lielumi, materiālu īpašības raksturojošie un virsmas tekstūras (3D) parametri

Varianta Nr.	Ātrums v , m/s	Slodze q , MPa	Virsmas tekstūras (3D) parametru pēc piestrādes vidējās vērtības			Vidējais nodilums pēc piestrādes, μm
			Virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze Sa , μm	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 σ_0 , MPa						225
Materiāla izturības ciklu skaits N_0						5×10^6
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). Šo mērījumu vidējās vērtības katram izvēlēto ātruma v un slodzes q variantam redzamas 4.4. tabulā. Mērījumu paraugs – 4.3., 4.4., 4.5. attēlā.

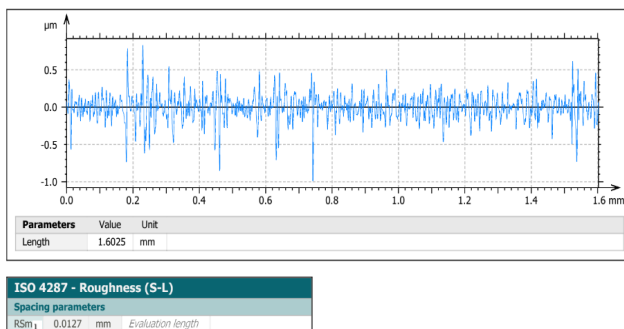
Pēc mērījumos iegūtā datu masīva apstrādes rezultātiem un virsmas vizualizācijas (4.10. att.) bronzas diskam pēc piestrādes ir skaidri redzamas izteiktas rievās berzes virzienā, un tā rezultātā virsmas anizotropijas koeficienta Str vidējā vērtība šajā gadījumā ir mazāka par 0,1.

4.4. attēlā redzamais mērījuma solis RSm_1 šķērsām berzes virzienam konkrētajā mērījumā ir 0,0127 mm, savukārt 4.2. tabulā ir norādīta vidējā soļa RSm_1 vērtība, veicot trīs mērījumus katram paraugam, kopsummā nomērot piecus paraugus.



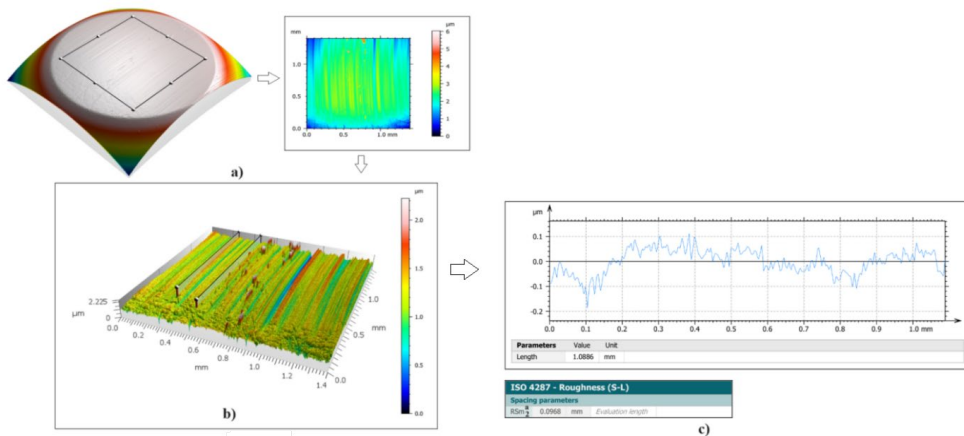
4.3. att. Nodilušās trases virsmas tekstūras (3D) parametru mērījums pēc piestrādes ($v = 0,7$ m/s un $q = 0,58$ MPa).

No 3D virsmas bronzas diskam tiek noteikts vidējais solis RSm_1 šķērsām berzes virzienam (4.4. att.), kas turpmāk nepieciešams analītisko aprēķinu veikšanai.



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

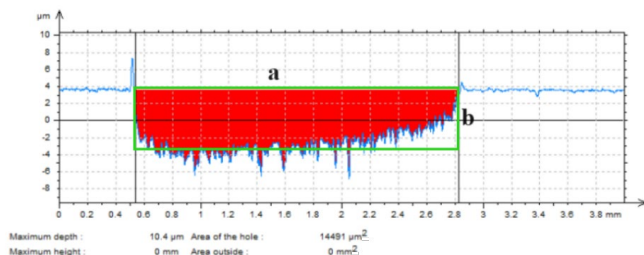
Slīpētās lodītes virsmas tekstūras (3D) parametru mērījumu piemērs redzams 4.5. attēlā.



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

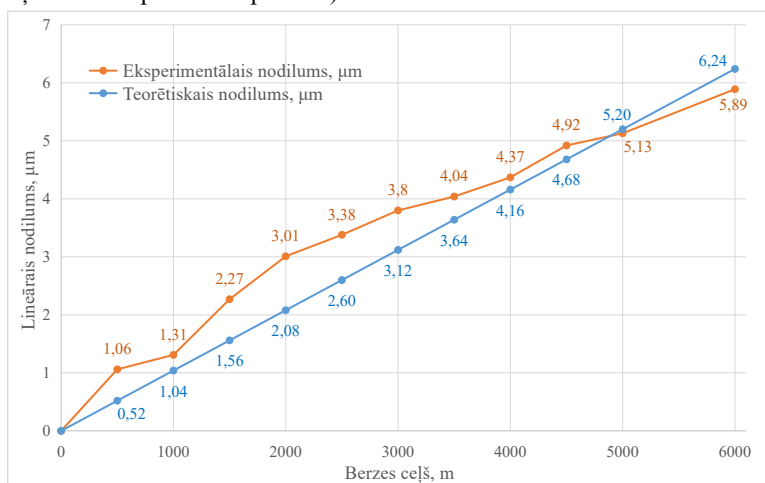
Konkrētajā mērījumā parametra RSm_2^a vērtība ir 0,0968 mm. 4.2. tabulā redzama soļa RSm_2^a vidējā vērtība piecu paraugu mērījumiem, katram paraugam izmērot soli trīs punktos.

Ekspperimentu gaitā nodiluma vērtības tika kontrolētas ik pēc 500 m berzes ceļa. Mērījumu rezultāti tika apstrādāti, izmantojot *TalyMap Gold* programmatūru, nosakot izdilušās trases šķērssgriezuma laukumu (mērījuma piemērs – 4.6. att.). Katrā nodiluma noteikšanas reizē uz diska izdilušās trases šķērssgriezuma laukums tika mērīts četrās vietās (pēc katriem 90°), katram paraugam aprēķinot vidējo lineāro nodilumu no četriem mērījumiem. Ar sarkano krāsu parādītais izdilušās trases šķērssgriezuma laukums veido 14491 μm^2 . 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. att. Bronzas diska nodilušās trases šķērssgriezuma laukuma mērījums pēc 3000 m berzes ceļa ($v = 0,7$ m/s, $q = 0,58$ MPa).

4.7. attēla grafikā redzamas eksperimentālās un analītiski aprēķinātās lineārā nodiluma vērtības, ja $v = 0,7$ m/s, $q = 0,58$ MPa. Šajā un turpmākajos grafikos parādīts normālās dilšanas periods (neņemot vērā piestrādes periodu).

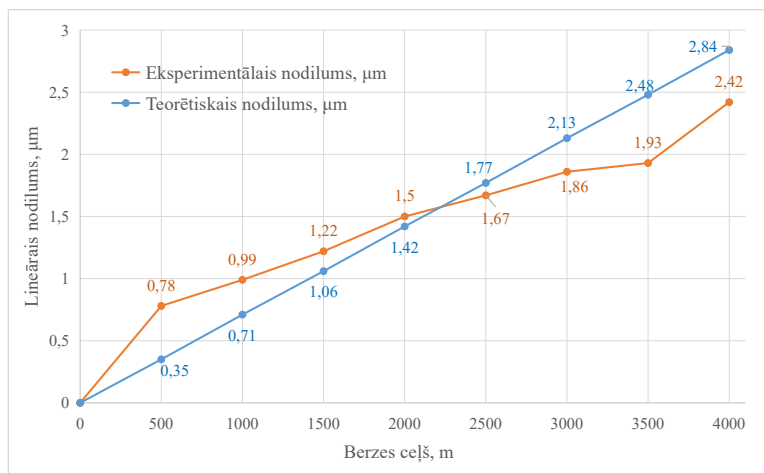


4.7. att. Eksperimentālās un teorētiskās lineārā nodiluma vidējās vērtības 1. grupas paraugiem.

Apskatot 4.7. attēla grafiku, redzams, ka vistuvākā eksperimentālo un analītiski rēķināto nodiluma vērtību sakrītība slīdes berzes pārim ir vērojama, sākot no 4000 m berzes ceļa. Pie 5000 m analītisko aprēķinu un eksperimentālo nodiluma vērtību atšķirība veido tikai 1,3 %, savukārt pie 4500 m – tikai 4,9 %. Eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 18,3 %. Rezultātu atšķirība pēc 6000 m nepārsniedz 5,6 %. Berzes koeficienta nostabilizēšanās process tika noteikts pēc 1500 m, tādējādi konkrētā 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, un tā rezultātā var izskaidrot eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību.

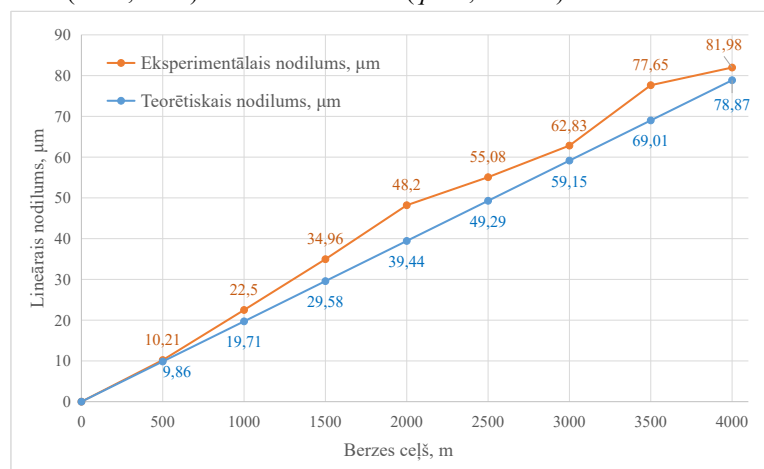
4.8. attēla grafikā redzamas nodiluma vērtības pie šādiem parametriem: $v = 0,45$ m/s un $q = 0,87$ MPa.



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

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 likne 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 kokrētajam berzes pārim, kā arī iespējamo berzes procesa turpināšanos. Summārais teorētiskais lineārais nodilums eksperimenta beigās, neņemot vērā piestrādi, veido 2,84 μm, eksperimentālais – 2,18 μm. Salīdzinot abas vērtības, atšķirība nepārsniedz 15 % robežu.

4.9. attēla grafikā redzamas nodiluma vērtības trešajam parametru izvēles variantam – mazākā ātruma ($v = 0,3$ m/s) un lielākās slodzes ($q = 1,45$ MPa).



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

Šajā gadījumā eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 10 %. Summārais aprēķinātais lineārais nodilums, neņemot vērā piestrādi, veido 78,87 μm , eksperimentālais – 81,98 μm , t. i., vērtību atšķirība nepārsniedz 3,8 %. Analizējot 4.9. attēlā redzamos datus, var secināt, ka pie konkrētajā variantā iestatītajiem parametriem teorētisko un eksperimentālo nodiluma vērtību novirze ir vismazākā, salīdzinot ar iepriekš apskatītajiem gadījumiem.

4.4. Eksperimentālo datu un analītisko aprēķinu apstrāde un analīze slīdes berzes pārim tērauds (102Cr6)-bronzā (CW307G)

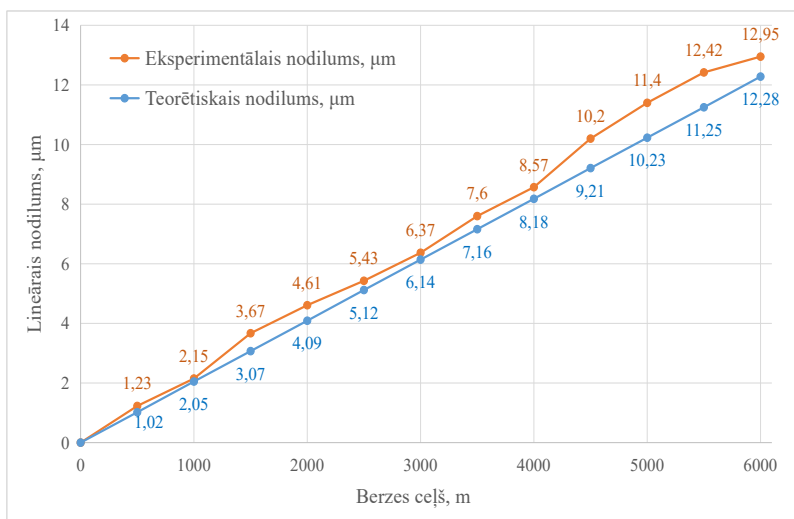
Konkrētajai berzes pāra materiālu kombinācijai eksperimentu veikšanas kārtība, eksperimentā iestatītie parametri un mērījumu veikšana ir identiska 4.4. nodaļā aprakstītajai. Pēc piestrādes nomērītie un turpmāk analītiskajos aprēķinos iekļautie lielumi apkopoti 4.3. tabulā.

4.3. tabula

2. grupas paraugiem (bronzā CW307G) eksperimentālajā pētījumā iestatītie lielumi, materiālu īpašības raksturojošie un virsmas tekstūras (3D) parametri

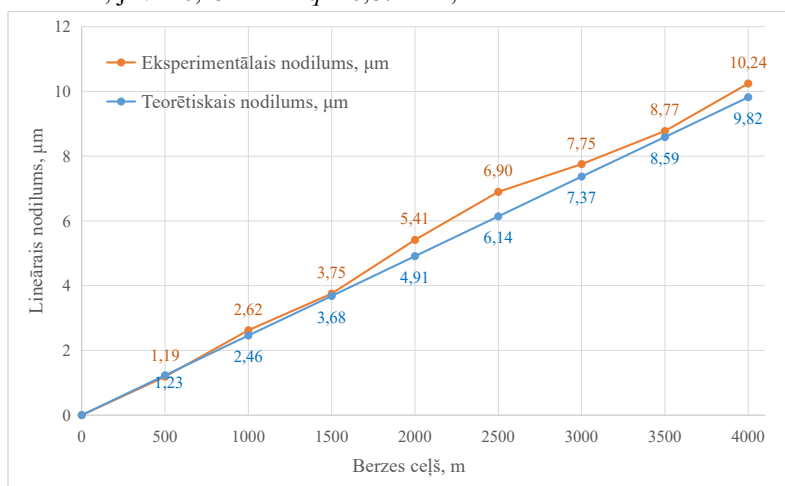
Varianta Nr.	Ātrums v , m/s	Slodze q , MPa	Virsmas tekstūras (3D) parametri pēc piestrādes vidējās vērtības			Vidējais nodilums pēc piestrādes, μm
			Virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze S_a , μm	Dilstošās detaļas (diska) vidējais solis RSm_1 , mm	Nodilumu aktivizējošās virsmas (lodītes) vidējais solis 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 sloģojuma cikla σ_0 , MPa						300
Materiāla izturības ciklu skaits N_0						5×10^6
Diska materiāla elastības modulis E , MPa						$1,15 \times 10^5$
Virsmas anizotropijas koeficients Str						$\sim 0,03$

4.10. attēla grafikā redzamas eksperimentālā un analītiski aprēķinātā lineārā nodiluma vērtības konkrētajai materiālu kombinācijai, ja $v = 0,7$ m/s, $q = 0,58$ MPa. Kā redzams, 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.



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

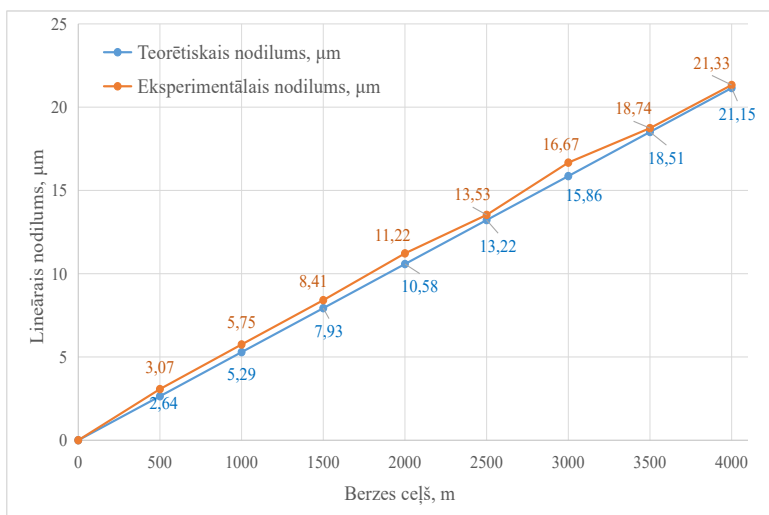
Nodiluma vērtības, ja $v = 0,45$ m/s un $q = 0,87$ MPa, redzamas 4.11. attēlā.



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

Analizējot 4.11. attēla grafika 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) veido ne vairāk par 4,2 %, t. i., tikai 0,42 μm .

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



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

Šajā gadījumā eksperimentālo un teorētisko nodiluma vērtību atšķirību savstarpējās svārstības eksperimenta laikā vidēji nepārsniedz 5,4 %. Eksperimenta beigās aprēķinātā teorētisko un eksperimentālo nodiluma vērtību rezultātu sakritība veido 99 %.

4.5. Secinājumi

- 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 %.
- 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 eksperimentālo 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 eksperimentālo 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 eksperimentālo 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 (2.15. vienādojums) ļauj iegūt ticamas nodiluma vērtības, t. i., eksperimentālo un analītiski aprēķināto nodiluma vērtību atšķirība visos aplūkotajos variantos, izņemot vienu, nepārsniedza 5,6 % robežu. Nodiluma aprēķins ir pietiekami vienkāršs, ietaupot laiku, finansīšos, 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 2.15. vienādojumā iekļauto parametru korelāciju dilšanas procesā citiem materiāliem pie atšķirīgām slodzēm, ātrumiem un virsmas tekstūras (3D) parametriem.

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. Izstrādāto metodiku var izmantot pētniecībā, kā arī praktisko inženieruzdevumu aprēķinos, konstruējot mehānismus, kuru detaļas ir pakļautas slīdes berzes kustībai un dilšanai. Izmantojot šo metodiku, iespējams prognozēt salāgojuma kalpošanas laiku konstruēšanas gaitā, piemēklējot 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 kinemātiskie parametri:
 - a) slodze q [MPa];
 - b) slīdes kustības ātrums v [m/s];
 - c) berzes pāra kustības laiks t [s];
- 2) izmantojot tehnisko literatūru, jānosaka berzes pāra dilstošās detaļas materiāla noguruma un fizikāli mehāniskie parametri:
 - a) ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai N_0 ;
 - b) noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs – m ;
 - c) materiāla ilgizturības robeža stiepes-spiešanas gadījumam – σ_0 [MPa]:

$$\sigma_0 \approx 0,5 \cdot \sigma_{st}, \quad (5.1.)$$

kur σ_{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 detaļai perpendikulāri apstrādes virzienam – RSm_1 ;
 - c) solis dilumu aktivizējošajai detaļai 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 definētajiem parametriem, izmantojot berzes virsmas nodiluma aprēķina modeli (2.15. formula);
- 6) * dilšanas ātruma aprēķins tiek veikts pēc 2.16. vienādojuma;
- 7) ** slīdes berzes pāra kalpošanas laiku nosaka, vadoties pēc šādas sakarības:

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

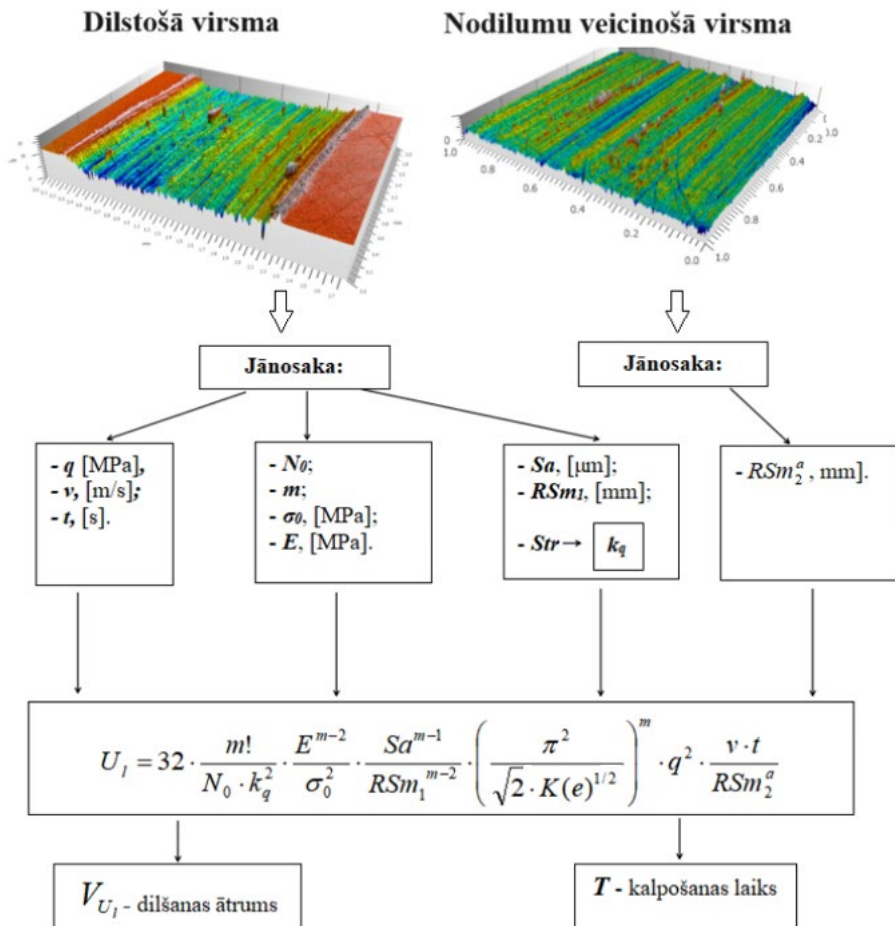
kur U_l – lineārais nodilums;

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 kontaktlaukums ir nostabilizējies. Kā rāda detaļu piestrādes procesa analīze, ja piestrādes process nav pabeigts, tajā darbojas liels skaits grūti prognozējamu parametru. Pamatojoties uz iepriekš minēto, pastāv risks, ka virsmas

raupjuma nomērītie parametri pistrādes 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.

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. Krageļska 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 nestandardizētiem 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 (Sa) 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, ievietojot 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.

IZMANTOTIE 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. 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, Sujana 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–Al₂O₃–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-CeO₂ 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-Al₂O₃ composite coatings fabricated by ball milling method*, Volume 29, Issue 5, May 2018, Pages 1306–1316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.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.

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 Nasiri Vatan, 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.jimecsci.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, No 1, 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.
34. 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>.
35. 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.
36. 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.
37. Natalija Bulaha. *CALCULATIONS OF SURFACE ROUGHNESS 3D PARAMETERS FOR SURFACES WITH IRREGULAR ROUGHNESS*, Jelgava, 23.–25.05.2018. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N256.
38. Ernests Jansons, Janis Lungevics, Uldis Kanders, Armands Leitans, Guna Civcisa, Oskars Linins, Karlis Kundzins and Irina Boiko. *Tribological and Mechanical Properties of the Nanostructured Superlattice*

39. A. Kromanis, J. Krizbergs. *3D SURFACE ROUGHNESS PREDICTION TECHNIQUE IN ENDMILLING USING REGRESSION ANALYSIS* 6th International DAAAM Baltic Conference INDUSTRIAL ENGINEERING, 2008, Tallinn.
40. 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>.
41. Kumermanis M. *Cietu ķermeņu neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi*. Rīga, RTU Izdevniecība, 2011. 119. lpp. ISBN 2-86272-389-4.
42. Lorena Deleanu, Constantin Georgescu, Cornel Suciu. *A COMPARISON BETWEEN 2D AND 3D SURFACE PARAMETERS FOR EVALUATING THE QUALITY OF SURFACES*, 2012, ISSN 1221-4566.
43. 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>.
44. 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>.
45. G. Springis, J. Rudzitis, J. Lungevics, K. Berzins. *Wear Calculation Approach for Sliding-Friction Pairs. Journal of Physics. Series 843* (2017) 012072. 2017, pp. 1-8. ISSN 1742-6588. DOI: doi: 10.1088/1742-6596/843/1/012072.
46. 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.
47. 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.
48. 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).
49. 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).
50. Rudzītis J. *Virsmas kontaktmehānika*, 3. daļa. Slīdes virsmu diluma aprēķini. Rīga, RTU Izdevniecība, 2007. 80. lpp. ISBN 9984-32-863-5.
51. Konrads G. *Mašīnu detaļu slīdes virsmu dilšana*. – Rīga, RTU Izdevniecība, 2006. 80.lpp. ISBN 9984-32-863-5.
52. А. С. ПРОНИКОВ. *Параметрическая надежность машин*, Москва: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2002. 560 с. ISBN 5-7038-1996-2. (krievu valodā).
53. И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ, М. Н. ДОБЫЧИН, В. С. КОМБАЛОВ *Основы расчетов на трение и износ*. Москва «Машиностроение» 1977. 526 с.
54. И. В. Крагельский и В.В.Алинина. *Основы Трение, изнашивание и смазка*. Москва “Машиностроение” 1978. 400 с. (krievu valodā).
55. 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).
56. Д. Н. ГАРКУНОВ *Триботехника износ и безызносность*. Учебник М.: Издательство МСХА, 2001. 616 с. ISBN 5-94327-004-3. (krievu valodā).
57. I. Kragelsky, V. Alisin, *Tribology – Lubrication, Friction and Wear*, Mir publishers, Moscow, 2001.
58. Students E. *Slīdes berzes virsmu nodiluma aprēķins*. Rīga, 1996. 135 lpp.
59. 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.



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.