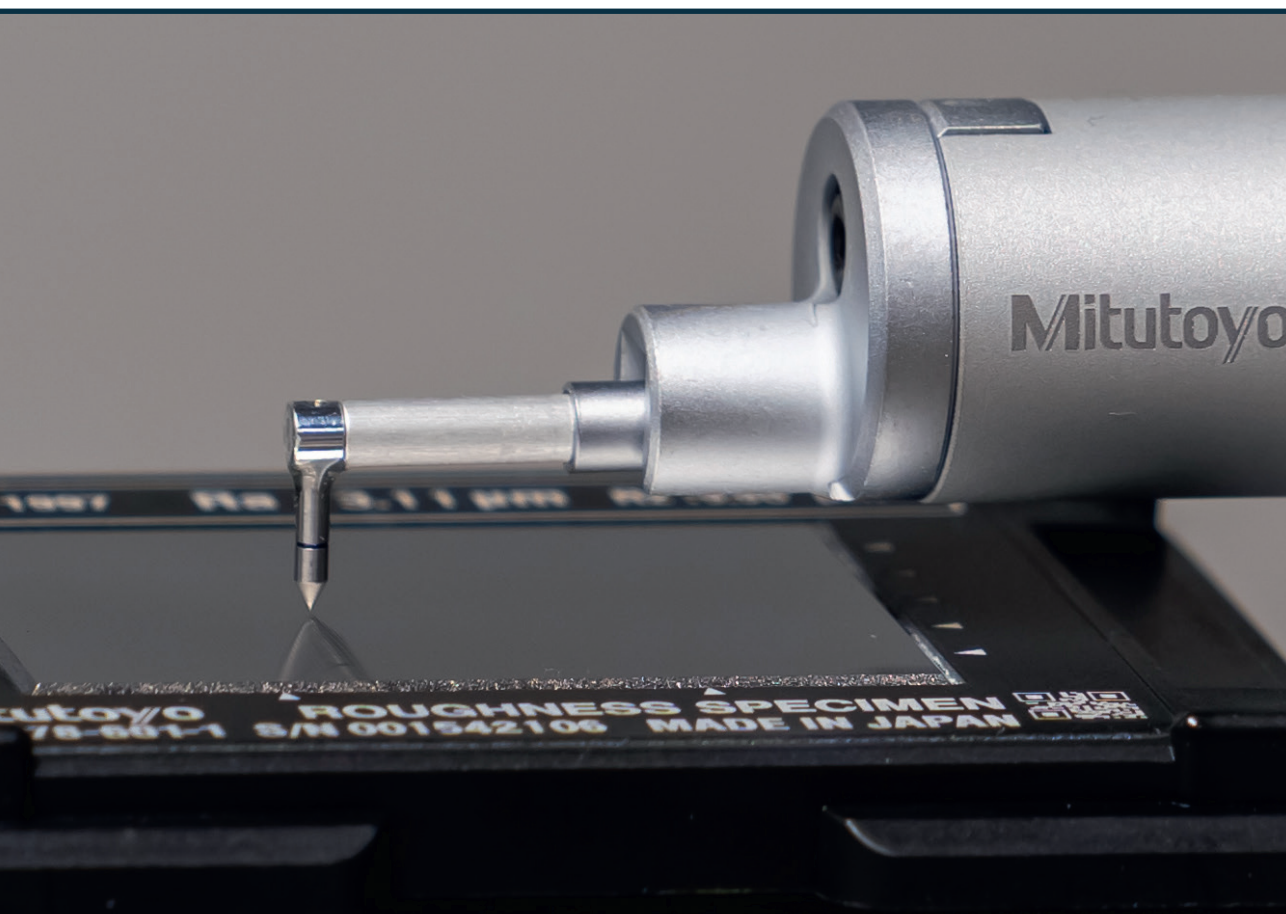


Jānis Lungevičs

PA LEDU SLĪDOŠA NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA VIRSMAS MAKROĢEOMETRIJAS UN MIKROĢEOMETRIJAS IETEKME UZ BERZES KOEFICIENTU

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Jānis LUNGEVIČS

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika” doktorants

**PA LEDU SLĪDOŠĀ NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA
VIRSMAS MAKROĢEOMETRIJAS
UN MIKROĢEOMETRIJAS IETEKME UZ BERZES
KOEFIICIENTU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesore *Dr. sc. ing.*
IRĪNA BOIKO,

profesors *Ph. D.*
KĀRLIS AGRIS GROSS,

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

JĀNIS RUDZĪTIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Lungevičs, J. Pa ledu slīdoša nerūsējošā tērauda virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekme uz berzes koeficientu. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU, 2023. – 39 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-16” 2023. gada 30. janvāra lēmumu, protokols Nr. 1.

Promocijas darba izstrādi atbalstījuši:

- Eiropas Reģionālā attīstības fonda (ERAF) projekts “Virsmas īpašību ietekmes uz slīdamību pa ledu pētījumi”;



- valsts pētījumu programma “Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošībai” projekts Nr. 6 “Metāla virsmas apstrāde berzes un nodiluma samazināšanai”;



- Latvijas Bobsleja un skeletoņa federācija;
- Latvijas Kamaniņu sporta federācija;
- Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras stipendiju programma;
- Latvijas Zinātnes padomes projekts “Ar oglekli bagātināti daudzfunkcionāli nanostrukturētie viedie pārklājumi (NVP) augsto tehnoloģiju lietojumiem un to iegūšana izmantojot lielaudas magnētiski saspīstās plazmas metodi”;



- Eiropas Reģionālā attīstības fonda (ERAF) projekts “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” (projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008)”;



- Daļu no darba finansēja Austrijas programma COMET (projekts *InTribology*, Nr. 872176), kas tika veikta "Triboloģijas izcilības centrā" (*AC2T research GmbH*), sadarbībā ar *V-Research GmbH* un Rīgas Tehnisko universitāti. Pateicība Austrijas kooperatīvajai pētniecības platformai (*ACR*) par mobilitātes izmaksu segšanu.

Vāka attēla autors – Jānis Lungevičs.

<https://doi.org/10.7250/9789934229428>

ISBN 978-9934-22-942-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts promocijas padomes “RTU P-16” atklātajā sēdē 2023. gada 3. jūlijā plkst. 10 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Paula Valdena ielā 1, 106. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. phys.* Aleksejs Kataševs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. ing. Daniel Grochala,
Rietumpomerānijas Tehnoloģiju universitāte, Polija

Profesors *Ph. D.* Bojan Podgornik,
Lūblānas Universitāte, Slovēnija

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.

Jānis Lungevičs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Tas ietver kopsavilkumu latviešu un angļu valodā un septiņas *SCI* publikācijas. Publikācijas sagatavotas angļu valodā, to apjoms, ieskaitot elektroniski pieejamo papildinformāciju, ir 78 lpp.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte	5
Mērķis un uzdevumi	7
Pētniecības metodes.....	7
Zinātniskā novitāte	8
Aizstāvamās tēzes.....	8
Praktiskā nozīme.....	9
Darba aprobācija.....	9
Promocijas darba struktūra	11
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI.....	15
1. Ievads.....	15
2. Literatūras analīze.....	17
3. Eksperimentālie pētījumi.....	21
4. Jaunizveidotā virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija	24
5. Jaunās metodoloģijas aprobēšana	27
SECINĀJUMI UN NĀKOTNES REKOMENDĀCIJAS.....	34
ATSAUCES	36

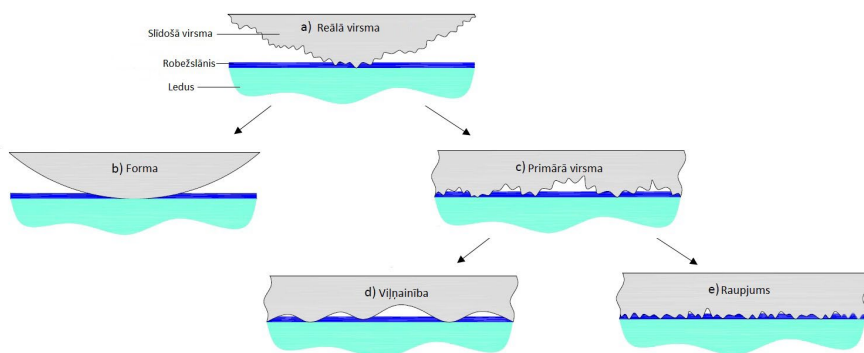
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Cietu objektu un ledus savstarpējā mijiedarbība ir salīdzinoši maz pētīta, un to ietekmē daudzi savstarpēji saistīti faktori, tai skaitā apkārtējā gaisa un ledus temperatūra, gaisa mitrums, kustības ātrums, slīdošā objekta ģeometrija, virsmas tekstūra un tās orientācija, kontaktpiediens, slīdošā objekta ķīmiskās un fizikālās īpašības, ledus virsmas cietība u. c. Šo faktoru mijiedarbība nosaka, ka uz ledus virsmas veidojas plāns ūdens slānis, ko sauc par robežslāni, un tā biezumu [1]–[34]. Neraugoties uz vairākiem zinātnieku mēģinājumiem izprast robežslāņa veidošanos un tā ietekmi uz slīdošā objekta berzes koeficientu uz ledus, vienotas metroloģiskās pieejas trūkums ir kavējis izskaidrot šo procesu.

Lai labāk izprastu berzes koeficientu uz ledus, ir nepieciešama visaptveroša informācija par slīdošā objekta un ledus virsmas mijiedarbību un robežslāni starp tām. Vairākos pētījumos norādīts, ka slīdošā objekta makroģeometrijai un mikroģeometrijai ir būtiska nozīme berzes koeficienta noteikšanā uz ledus [3], [16], [24], [29], [31]–[33], [35]–[38], un to pierāda arī eksperimentāli pētījumi [16], [19], [24], [26], [33], [35], [39]. Tomēr joprojām nav skaidrs, kā tieši slīdošā objekta virsmas makroģeometrija un mikroģeometrija ietekmē berzes koeficientu uz ledus, un kurai objekta virsmas ģeometrijas komponentei ir lielāka ietekme.

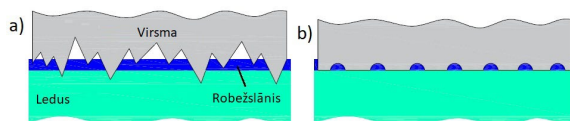
Teorētiskajos pētījumos slīdošā objekta tekstūra tiek vienkāršota, t. i., tiek ņemta vērā tikai objekta forma, savukārt viļņainība un raupjums tiek ignorēts. Šādi teorētiskie pētījumi ir būtiski, taču pieņemtie vienkāršoējumi neļauj analizēt procesa patieso būtību, jo makroģeometriskiem objektiem realitātē vienmēr būs mikroģeometriskā tekstūra, kas ietekmēs objekta un ledus virsmas savstarpējo kontaktlaukumu [3], [40]–[43]. No otras puses, eksperimentāli orientēti pētījumi [16], [24], [29], [31]–[33], [35]–[37], [44] koncentrējas uz slīdošā objekta raupjuma komponenti, ignorējot makroģeometriju (formu). Literatūras analīze atklāja, ka iepriekšējos pētījumos visa slīdošā objekta virsma tiek analizēta, ņemot vērā tikai lokalizētā apgabalā iegūtos raupjuma parametrus. Visbiežāk nomērītais apgabals veido mazāk kā 10 % no visas objekta virsmas [15]. Turklāt tekstūras mērījumi jau tā nelielajā apgabalā tiek digitāli filtrēti saskaņā ar *ISO 25178-2* (Ģeometrisko programmproduktu specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: laukums. 2. daļa: Terminu, definīcijas un virsmas īpašību parametri) ieteikumiem. Ar filtrēšanas operācijām tiek noņemtas tekstūras formas un viļņainības komponentes, vēl vairāk pārveidojot galīgo tekstūras attēlu un palielinot iespēju, ka pētnieki maldina sevi par faktisko objekta ģeometriju, kas mijiedarbojas ar ledu (1. att.). Promocijas darba autors iepriekš minētos trūkumus uztver kā būtiskas problēmas, kas kavē triboloģijas pētījumu pa ledu progresu.



1. att. Slīdošā objekta tekstūras komponentu shematisks attēlojums. a) Pilns tekstūras attēls, kas atspoguļo patieso virsmas sarežģītību; b) tikai virsmas formas komponente, kas veido virsmas makroģeometriju; c) primārā virsma, kas sastāv no virsmas viļņainības un raupjuma, kas veido virsmas mikroģeometriju; d) virsmas viļņainības komponente; e) virsmas raupjuma komponente. Lai gan realitātē pilna tekstūra nosaka kontaktu ar ledu, pētnieki bieži izmanto tikai filtrēto raupjuma komponenti. Kā parādīts shematiskajā attēlojumā, kontaktu ar ledu var interpretēt ļoti atšķirīgi, ja tiek ievērotas līdz šim izmantotās vadlīnijas, kurās ņem vērā tikai raupjumu [15].

Darba autors izvirza hipotēzi, ka slīdošā objekta kontakta laukumu ar ledu var ticami novērtēt tikai tad, ja ņem vērā visas virsmas tekstūras komponentes (formu, viļņainību un raupjumu), jo tikai šo trīs komponentu kombinācija sniedz visaptverošu informāciju par faktisko kontakta laukumu, kas nosaka slīdošā objekta virsmas un ledus berzes koeficientu.

Vēl viens faktors, kas ietekmē iespēju analizēt makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekmi uz berzes koeficientu, ir virsmas ģeometriju raksturojošo parametru izvēle. Līdz šim visbiežāk izmanto standartizētus tekstūras parametrus (profila vidējā aritmētiskā novirze no viduslīnijas) R_a vai (virsmas vidējā aritmētiskā novirze no vidus plaknes) S_a . Tomēr R_a un S_a skaitliskās vērtības var būt identiskas dažādām tekstūrām, kuru mijiedarbība ar ledu ir atšķirīga (2. att.). No šī izriet, ka paļaušanās tikai uz vienu raupjuma parametru, lai aprakstītu virsmas kontaktu ar ledu, ir nepietiekama.



2. att. Slīdošā objekta, ledus un robežslāņa mijiedarbības shematisks attēlojums: a) virsma ar izciļņiem; b) virsma ar ieplakām. Abos gadījumos virsmas raupjuma parametriem S_a un R_a , var būt vienāda matemātiskā vērtība, bet berzes īpašības uz ledu atšķiras, t. i., virsma ar izciļņiem berzi palielina, virsma ar ieplakām – samazina [15].

Apkopotā informācija liek secināt, ka slīdošā objekta virsmas un ledus berzes koeficienta analīze ir nepilnīga, ja nav pilnvērtīgas informācijas par virsmas makroģeometriju un mikroģeometriju un to raksturojošiem parametriem.

Mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt jaunu metodoloģiju slīdošā objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem precīzākai berzes koeficienta noteikšanai uz ledus (turpmāk tekstā – metodoloģija).

Lai sasniegtu mērķi, tika veikti šādi galvenie uzdevumi:

- 1) līdžšinējo pētījumu un metodoloģiju analīze;
- 2) eksperimentālās procedūras izstrāde;
- 3) eksperimentālie pētījumi;
- 4) jaunas metodoloģijas izstrāde slīdošā objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem berzes koeficienta noteikšanai uz ledus;
- 5) jaunizstrādātās metodoloģijas aprobācija.

Pētniecības metodes

Mērķu sasniegšanai tika izmantotas kvantitatīvās un kvalitatīvās pētījumu metodes un tālāk tekstā minētās eksperimentālās iekārtas praktisko mērījumu veikšanai.

Eksperimentālo paraugu sākotnējo virsmu sagatavošanai tika izmantots automātiskais pulētājs *334 TI 15 Mecatech* (Presi, Francija). Galīgās paraugu tekstūras tika izgatavotas, izmantojot dažādu graudu izmēra smilšpapīrus uz auduma bāzes (*M3*, ASV), smilšu strūklas iekārtu *SBC-420* (*Power plus*, Ķīna), ciparvadības frēzi *Vertical Center Smart 530C* (*Mazak*, Japāna) un *Libra Ti: sapphire* femtosekunžu lāzera sistēmu (*Coherent*, ASV).

Virsmas tekstūras tika mērītas un raksturotas ar šādiem instrumentiem:

- kontakta tipa profilometrs *Form Talysurf Intra 50* ar standarta mēraustu *112/2009* (*Taylor Hobson*, Apvienotā Karaliste);
- konfokālais mikroskops *VK-X250/260* (*Keyence International NV/SA*, Beļģija);
- optiskais mikroskops *Eclipse LV150* (*Nikon*, Japāna);
- skenējošais elektronu mikroskops (SEM) *S-4800* (*Hitachi*, Japāna);
- atomspēku mikroskops (AFM) *Smena NT-MDT* (*NT-MDT Spectrum Instruments*, Krievija).

Triboloģiskie eksperimenti tika veikti ar diviem dažādiem tribometriem:

- *slīpās plaknes tribometers* (RTU, Latvija). Tribometrs reģistrē parauga slīdēšanas laiku noteiktos attālumos. No šiem datiem tika aprēķināti slīdēšanas ātrumi dažādos starpposmos, un tie izmantoti kā netieši berzi raksturojoši parametri, t. i., lielākas ātruma vērtības būs virsmām ar mazāku berzes koeficientu, un otrādi;
- *V-Research GmbH* svārstveida lineārais tribometrs *RVM1000* (*Werner Stehr Tribology GmbH*, Vācija). Tribometrs mēra berzes spēku starp ledu un tērauda parauga virsmu. Statisko un dinamisko berzes koeficientu aprēķina, izmantojot izmērīto berzes spēku un pielikto slodzes vērtību.

Ledus temperatūras mērīšanai tika izmantots *Proscan 520* termometrs (*Dostmann*, Vācija), un kontakta tipa termopāris *TP-122-100-MT-K* (*Czaki*, Polija). Gaisa temperatūra un gaisa mitrums tika kontrolēts ar *P330 Temp* (*Dostmann*, Vācija).

Paraugu 3D tekstūras mērījumi tika apstrādāti ar *Talysmap Gold* programmatūru (*Mountain Maps*, Francija). Datu apstrādē izmantotās statistiskās metodes: aprakstošā/raksturojošā

statistika. Rezultāti attēloti grafiku, attēlu un tabulu veidā. Tabulas un grafiki izveidoti programmā *Excel 2018 (Microsoft, ASV)*. Attēlu sagatavošanā izmantotas datorprogrammas *Solidworks 2022* un *AutoCAD 2022*.

Zinātniskā novitāte

- Izveidota jauna slīdošā objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija berzes koeficienta noteikšanai uz ledus, kas iekļauj informāciju par slīdošā objekta virsmas makroģeometriju un mikroģeometriju.
- Pierādīts, ka slīdošā objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekme uz berzes koeficientu uz ledus jāanalizē, ņemot vērā slīdošā objekta virsmas temperatūru. Slīdošā objekta virsmas temperatūras izmaiņas var diametrāli pretēji mainīt kontaktlaukuma ietekmi uz berzes koeficientu.
- Pierādīts, ka virsmas kontaktlaukuma mērījumi saskaņā ar jauno metodoloģiju ļauj salīdzināt dažādi izgatavotu virsmu tekstūru ietekmi uz berzes koeficientu uz ledus, kas nebija iespējams, izmantojot iepriekš zināmās metodoloģijas.

Aizstāvamās tēzes

1. **Izveidota jauna slīdošā objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija, berzes koeficienta noteikšanai uz ledus.** Jaunā metodoloģija ietver virsmas kontaktlaukuma mērījumus, ko izmanto slīdošā objekta un ledus kontakta spiediena aprēķiniem, kas nepieciešami triboloģisko eksperimentu rezultātu interpretācijai. Saskaņā ar jauno metodoloģiju tiek ņemta vērā visa slīdošā objekta virsmas sarežģītība, ļaujot salīdzināt virsmas, kas izveidotas, izmantojot dažādas ražošanas metodes, kas nebija iespējams, izmantojot iepriekš zināmās metodikas.
2. **Lai analizētu berzes koeficientu uz ledus, jāizmanto kontaktlaukuma mērījumi.** Iegūtie eksperimentālie dati, kad kontakta spiediens starp nerūsējošā tērauda virsmu un ledu ir lielāks par 1 MPa, pierādīja, ka kontakta laukumam un berzes koeficientam ir cieša korelācija (dispersijas variācija – no 0,9 līdz 1,0). Virsmas tekstūras parametriem (S_a , S_{sk} , S_{ku} , S_{ds}), kas iegūti, izmantojot iepriekšējās metodoloģijas, dispersijas variācija – no 0,5 līdz 0,9.
3. **Nosakot berzes koeficientu uz ledus, jāņem vērā slīdošā objekta virsmas temperatūra.** Ir pierādīts, ka aplūkotajos eksperimentālajos apstākļos, kad kontakta spiediens starp nerūsējošā tērauda virsmu un ledu ir lielāks par 1 MPa, viena un tā pati virsmas tekstūra var gan palielināt, gan samazināt berzes koeficientu uz ledus atkarībā no slīdošā objekta virsmas temperatūras. Ja slīdošā objekta virsma ir aukstāka par ledus virsmu, kontaktlaukuma samazināšanās starp slīdošo ķermeni un ledu samazina berzes koeficientu, savukārt, ja slīdošā objekta virsma ir siltāka par ledus virsmu, kontaktlaukuma samazināšanās palielina berzes koeficientu.

Praktiskā nozīme

Izstrādāta jauna metodoloģija slīdošu virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem, lai noteiktu berzes koeficientu uz ledus. Šī metodoloģija ļauj analizēt dažādi izgatavotu virsmu makroģeometriju un mikroģeometriju, kas ietekmē berzes koeficientu uz ledus. Šo metodoloģiju var izmantot, lai raksturotu dažādām funkcijām izgatavotas virsmas tekstūras, t. i., dažos lietojumos berzes koeficients ir jāpalielina, savukārt citos – jāsamazina. Piemēri, kad berzes koeficients jāsamazina:

- ziemas sporta veidi: slidu asmeņu, bobsleja, skeletoņa un kamaniņu slieču, kērlinga akmeņu, slēpju malu un ledus burāšanas slieču uzlabošana. Lai optimizētu sportistu sniegumu un novērstu nelaimes gadījumus, ir svarīgi kontrolēt berzi uz ledus;
- ēkas un infrastruktūras objekti: ēku būvniecībā un uzturēšanā aukstos klimatiskajos apstākļos. Piemēram, lai novērstu ledus uzkrāšanos uz jumtiem, notekcaurulēs, ietvēm, ceļazīmēm, kā arī vēja turbīnu lāpstiņām, tiek izmantotas pretapledošanas metodes;
- transports: ledlauža kuģa priekšējās daļas apstrāde var samazināt berzes radītos enerģijas zudumus. Lidmašīnu virsmu pretapledošanas tekstūra ļautu izvairīties no ķīmisko vielu lietošanas, kas tiek izmantotas lidmašīnu attīrīšanā no ledus pirms pacelšanās.

Piemēri, kad berzes koeficients būtu jāpalielina:

- transports: automobiļu riepu pilnveidošana ļautu uzlabot transportlīdzekļu vadāmību ziemas apstākļos;
- veselība un drošība: apavi ar efektīviem protektoriem ļautu novērst kritienus un traumas.

Šajā promocijas darbā izstrādāto jauno metodoloģiju var izmantot arī citu triboloģisko pāru, ne tikai šajā promocijas darbā iekļauto metāla un ledus pāru, analīzei, jo faktiskais kontaktaukums nosaka berzes koeficientu starp jebkurām virsmām.

Promocijas darba rezultāti tika izmantoti, lai uzlabotu Latvijas kamaniņu sporta komandas ekipējumu. To apliecina promocijas darbam pievienotais Nacionālās kamaniņu sporta izlases trenera un vadošā inženiera Mārtiņa Rubeņa parakstīta apliecinājums (8. pielikums).

Darba aprobācija

Starptautiskās zinātniskās konferences (kopā 11, norādītas septiņas būtiskākās)

1. Lungevics J., Jansons E., Velkavrh I., Boiko I. *Ice tribology investigation using different test setups*. Riga Technical University 63rd International Scientific Conference *Mechanical engineering technology and heat engineering*, 2022. gada 13. oktobris, Rīga, Latvija. **Ar nopublicētu tēzi.**
2. Velkavrh I., Kafexhiu F., Wright T., Lungevics J., Jansons E., Boiko I. *Tribological investigations in a cold environment for winter sports applications: comparative ice friction measurements in different test rigs*. Nordic Tribology Symposium 2022, 2022. gada 14.–17. jūnijs, Alesunda, Norvēģija. **Ar nopublicētu tēzi.**

3. Jerane I., Gross K. A., Lungevics J., Pluduma. L. *The Effect of Patterning and Surface Contact on the Sliding Speed over Ice*. The 1st International Conference on Nature Inspired Surface Engineering (NISE 2019). 2019. gada 11.–14. jūnijs, Ņūdžersija, ASV. **Ar nopublicētu tēzi.**
4. Lungevics J., Jansons E., Boiko I., Velkavrh I. *Influence of stainless steel texture on friction properties sliding on ice*. RTU 60th International Scientific Conference. 2019. gada 14. oktobris, Rīga, Latvija.
5. Lungevics J., Jansons E., Gross K. A. *Surface Texture Characterization for Ice Friction Research*. 45th Leeds-Lyon Symposium on Tribology Smart Tribology Systems. 2018. gada 4.–7. septembris, Līdza, Apvienotā Karaliste. **Ar nopublicētu tēzi.**
6. Lungevics J., Jansons E., Gross K.A. *Skeleton Runner Roughness and Surface Contact Area Influence on Sliding Ability: Field Experiments*. Material Science & Applied Chemistry 2018., 2018. gada 26. oktobris, Rīga, Latvija. **Ar publicēto rakstu pilna teksta konferences materiālos (SCOPUS).**
7. Lungevics J., Jansons E., Rudzītis J., Gross K. A. *Use of Inclined Plane with Additional Time Measurements for Investigating Surface Slidability on Ice*. 12th International Conference Mechatronic Systems and Materials Intelligent Technical Systems. 2016. gada 3.–8. jūlijs, Bjalistoka, Polija. **Ar nopublicētu tēzi.**

Patenti

1. Jansons E., Lungevičs J., Boiko I. *Pārņēsājama slīdēšanas īpašību noteikšanas iekārta un paņēmiens*. Patents Nr. LV15660B, 20.03.2023., īpašnieks – RTU.
2. Jansons E., Lungevičs J., Leitāns A., Boiko I. *Daudzfunkcionāla materiālu un pārklājumu triboloģisko īpašību novērtēšanas iekārta un paņēmiens*. Patents Nr. LVP2022000037, 29.04.2022., īpašnieks – RTU.
3. Lungevičs J., Jansons E., Stiprais K., Gross K. A. *Slīdēšanas īpašību noteikšanas iekārta un paņēmiens*. Patents Nr. LV15305B, 20.03.2018., īpašnieks – RTU.

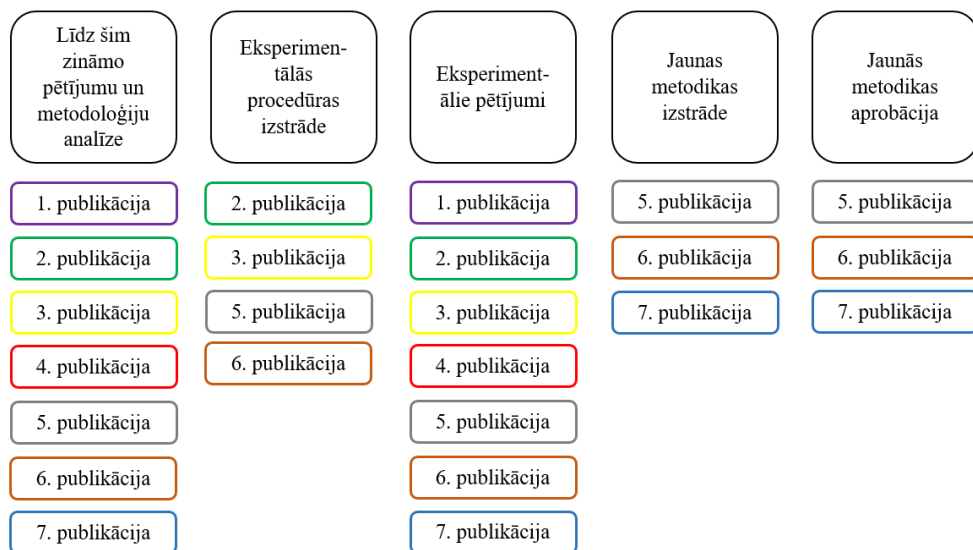
Publikācijas (norādītas septiņas publikācijas, kas veido šo promocijas darbu. Kopā 17 publikāciju, kas saistītas ar promocijas darba tēmu. Visas publikācijas indeksētas SCOPUS vai citās datubāzēs)

1. Gross K.A., Lungevics J., Zavickis J., Pluduma L. *A Comparison of Quality Control Methods for Scratch Detection on Polished Metal Surfaces*. Measurement, 2018, Vol. 117, pages 397–402. ISSN 0263-2241. Pieejams: doi:10.1016/j.measurement.2017.12.022.
2. Jansons E., Lungevics J., Gross K.A. *Surface Roughness Measure that Best Correlates to Ease of Sliding*. 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development: Proceedings. Vol. 15, Jelgava, Latvia, May 25–27, 2016, pages 687–695. ISSN 1691-5976. Pieejams: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2016/Papers/N127.pdf>.
3. Velkavrh I., Lungevics J., Jansons E., Klien S., Voyer J., Ausserer, F. *The Influence of Isotropic Surface Roughness of Steel Sliders on Ice Friction Under Different Testing Conditions*. Lubricants, 2019, Vol. 7, No. 12, pages 50–63. ISSN 2075-4442. Pieejams: doi:10.3390/lubricants7120106.

4. Velkavrh I., Voyer J., Wright T., Lungevics J., Jansons E., Boiko I. *Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1140 (2021) 012033. Pieejams: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012033>.
5. Jansons E., Lungevics J., Jerane I., Gross K.A. *A Smaller Bearing Ratio, as a Surface Texture Measure, Promotes Faster Sliding on Ice*. Journal of Tribology, 2021, Vol. 143, No. 11, Article number 111801. ISSN 0742-4787. e-ISSN 1528-8897. Pieejams: doi:10.1115/1.4049704.
6. Lungevics J., Jansons E., Boiko I., Velkavrh I., Voyer J., Wright T. *A Holistic Approach towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications*. Frontiers in Mechanical Engineering, 2021, Vol. 7, No. 1, pages 42–56. ISSN 2297-3079. Pieejams: doi:10.3389/fmech.2021.691485.
7. Gross K.A., Lungevics J., Jansons E., Jerane I., Wood M., Kietzig A. *Surface Hierarchy: Macroscopic and Microscopic Design Elements for Improved Sliding on Ice*. Lubricants, 2021, Vol. 9, No. 103, Article 103. ISSN 2075-4442. Pieejams: doi:10.3390/lubricants9100103.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs ir sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa. Publikācijas ir rakstītas angļu valodā, to apjoms, ieskaitot elektroniski pieejamo papildinformāciju, ir 78 lpp. Promocijas darba struktūras grafiskais kopsavilkums redzams 3. attēlā.



3. att. Promocijas darba struktūras grafiskais kopsavilkums.

Tālāk tekstā īsumā izklāstīts katras publikācijas saturs, galvenie rezultāti un promocijas darba autora personīgais ieguldījums šajās publikācijās. Publikāciju galvenie autori ir apstiprinājuši promocijas darba autora personīgo ieguldījumu. To apliecinošs dokuments ir pievienots promocijas darba 9. pielikumā.

1. publikācija

A Comparison of Quality Control Methods for Scratch Detection on Polished Metal Surfaces [45]. Publikācijā salīdzinātas dažādas mērīšanas metodes virsmu kvalitātes kontrolei un nano mēroga skrāpējumu analīzei uz spoguļgludām virsmām. Secināts, ka *AFM* nodrošina visaugstāko izšķirtspēju un informāciju trīs dimensijās, taču šī metode nav piemērota lieliem objektiem, kas būtiski ierobežo tās lietojamību. Secināts, ka gaismas mikroskopijas metode spēj detektēt 70 % no *AFM* redzamajiem skrāpējumiem, taču rezultāti ir pieejami tikai 2D interpretācijā, kas ierobežo analizēšanas iespējas. SEM mērījumi ir piemēroti ļoti detalizētiem novērojumiem, taču arī uz šo metodi attiecināmi ierobežojumi saistībā ar parauga izmēru un sagatavošanu. Kontakta tipa 3D profilometrs mazā nomērīto punktu blīvuma dēļ nespēja detektēt nano mēroga skrāpējumus, taču tas nodrošina iespēju iegūt 3D virsmas mērījumus lieliem objektiem, padarot to piemērotu reālu objektu mērījumiem.

Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija, izpēte, analīze, vizualizācija, rakstīšana – pārskatīšana un rediģēšana.

2. publikācija

Surface Roughness Measure that Best Correlates to Ease of Sliding [26]. Pētījumā analizēts, kāpēc 2D profilometrijas metode ir nepietiekama, lai kvalitatīvi raksturotu virsmas tekstūras, kas slīd pa ledu. Tiek uzsvērts, ka 2D profila mērījuma novietojums uz virsmas var radīt ievērojamas rezultātu atšķirības, pierādot, ka drošāk ir izmantot 3D profilometriju. Parādīta saistība starp biežāk izmantotajiem 2D profilometrijas parametriem un ar tiem raksturoto virsmu triboloģiskajiem mērījumiem pa ledu. Piedāvāts izmantot kontakta kritēriju virsmas tekstūras raksturošanai, un tā lietošana salīdzināta ar raupjuma vidējā aritmētiskā augstuma parametru. Secināts, ka kontakta kritērija dati nodrošina optimālo virsmas raupjuma augstuma un soļa attiecības noteikšanu, kas veicina labāku virsmas slīdēšanu pa ledu.

Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija, izpēte, metodoloģija, analīze, rakstīšana – galvenā teksta sagatavošana.

3. publikācija

The Influence of Isotropic Surface Roughness of Steel Sliders on Ice Friction Under Different Testing Conditions [6]. Šajā pētījumā eksperimentālie paraugi pārbaudīti ar diviem atšķirīgiem tribometriem dažādos vides apstākļos. Šis ir pirmais zināmais pētījums triboloģijas pētījumos pa ledu, kurā vieni un tie paši paraugi tiek testēti ar diviem tribometriem un iegūtie rezultāti tiek salīdzināti. Tika izmantots slīpās plaknes tipa tribometrs un svārstību tipa lineārais tribometrs. Secināts, ka abi tribometri ir pietiekami jutīgi, lai noteiktu tekstūras variāciju ietekmi uz triboloģiskajām īpašībām. Pārbaudīts, ka apkārtējās vides apstākļi un parauga temperatūra būtiski ietekmē virsmu triboloģisko veiktspēju.

Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija, izpēte, metodoloģija, analīze, rakstīšana – galvenā teksta sagatavošana.

4. publikācija

Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters [4]. Publikācijā izpētīta slīdošā objekta virsmas tekstūras un temperatūras ietekme uz triboloģiskajām īpašībām, slīdot pa ledu. Rezultāti liecina, ka slīdoša objekta virsmas temperatūras pazemināšana no +5 °C līdz –18 °C palielina berzes koeficientu ar ledus četras reizes. Atklāts, ka kontaktlaukumam starp slīdošā objekta virsmu un ledu, ja slīdošajam objektam ir dažādas virsmas temperatūras, var būt apgriezta ietekme uz berzes koeficientu, t. i., ja slīdošās virsmas temperatūra ir zemāka par ledus temperatūru, lielāks kontaktlaukums rada lielāku berzes koeficientu. Savukārt, ja slīdošā objekta virsmas temperatūra ir augstāka par ledus temperatūru, lielāks kontaktlaukums nodrošina zemāku berzes koeficientu. Šajā pētījumā secināts, ka, nosakot berzes koeficientu ar ledu, jāņem vērā slīdošā objekta virsmas temperatūra.

Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija, izpēte, analīze, vizualizācija, rakstīšana – galvenā teksta sagatavošana.

5. publikācija

A Smaller Bearing Ratio, as a Surface Texture Measure, Promotes Faster Sliding on Ice [7]. Publikācijā izklāstīta jaunizveidotā metodoloģija slīdoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem. Pētījumā paskaidrots, kāpēc iepriekš zināmās virsmas tekstūras raksturošanas metodoloģijas un izmantotie virsmas raksturošanas parametri nav piemēroti triboloģisko eksperimentu rezultātu salīdzināšanai paraugiem ar atšķirīgi izgatavotu virsmas tekstūru. Pierādīts, ka jaunā metodoloģija, kurā tiek ņemta vērā informācija par virsmu veidojošo formu, viļņainību un raupjumu, nodrošina dažādi izgatavotu virsmu un to triboloģisko raksturlielumu salīdzināšanu.

Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija, izpēte, metodoloģija, analīze, rakstīšana – galvenā teksta sagatavošana.

6. publikācija

A Holistic Approach Towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications [15]. Šajā publikācijā detalizētāk aplūkota jaunizveidotā virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija. Darbā analizētas virsmu raksturošanas metodoloģijas un tekstūras parametri, ko triboloģijas pētījumos pa ledu izmantojuši citi zinātnieki. Jaunās metodoloģijas priekšrocības pārbaudītas, analizējot ar smilšu strūklu apstrādātu virsmu tekstūras mērījumus un triboloģisko eksperimentu rezultātus, kas iegūti ar divām dažādām eksperimentālajām iekārtām. Uzrādīta korelācijas starp dažādiem slīdošā objekta virsmas tekstūras parametriem un triboloģisko eksperimentu rezultātiem.

Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija, izpēte, metodoloģija, analīze, rakstīšana – galvenā teksta sagatavošana.

7. publikācija

Surface Hierarchy: Macroscopic and Microscopic Design Elements for Improved Sliding on Ice [5]. Padziļināti apskatīta virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekme uz slidoša objekta triboloģiskajām īpašībām, slīdot pa ledu, uzsverot, cik svarīgi ir ņemt vērā visas virsmas tekstūras komponentes (formu, viļņainību un raupjumu). Apskatīti praktiski piemēri, kā slidoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas kombinācija nosaka virsmu triboloģiskās īpašības. Apskatītas un grafiski parādītas priekšrocības, ko sniedz jaunizveidotā slidošas virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija.

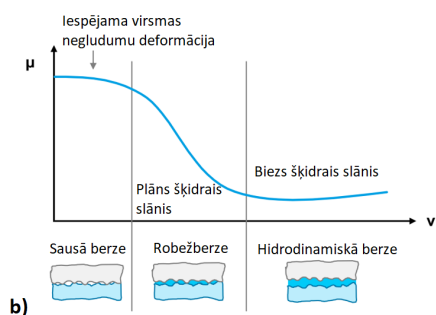
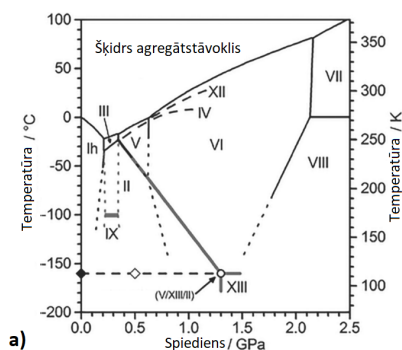
Autora personīgais ieguldījums: konceptualizācija: hierarhija, izpēte, vizualizācija, satura izstrāde ar vizuālajiem materiāliem un teksta fragmentiem.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

1. Ievads

Ledus ir kristāliska cieta viela, kas sastāv no ūdens molekulām. Visizplatītākā ledus forma ir heksagonālais ledus, saukts par I_h , kam piemīt seškārtīga simetrija (4. a att.) [1], [2]. Ledus struktūrai raksturīgs atkārtojošs ūdeņraža saišu patrons starp blakus esošajām ūdens molekulām. Ūdeņraža saites piešķir ledum raksturīgās īpašības, tostarp zemu blīvumu un cietību. Ūdeņraža saites ledū rada brīvu telpu starp molekulām, tādējādi veidojot mazāk kompaktu struktūru [1], [2]. Ledus cietība variē no 15 MPa līdz 35 MPa atkarībā no ledus temperatūras [1]–[3], [46]. Ledus ir trausls, un tam ir zema bīdes stiprība. Ledum ir zema siltumvadītspēja, kas nozīmē, ka tas slikti pārvada siltumu [1], [2].

Unikālā ledus struktūra nosaka tā fizikālās īpašības, tostarp tā zemo berzes koeficientu ar citiem materiāliem. Šo parādību var izskaidrot ar vairākiem parametriem, kas nosaka tā molekulāro struktūru un mijiedarbību ar apkārtējo vidi un objektiem. Ledus slīdamību nosaka tā zemais berzes koeficients, ko ietekmē uz ledus virsmas esošs plāns ūdens molekulu slānis, ko sauc par robežslāni [1]–[3], [11], [16], [28], [32]. Robežslāņa veidošanos ietekmē apkārtējās vides apstākļi un saskare ar siltāku virsmu. Robežslāņa biezums uz ledus nosaka berzes režīmu, kas rodas, objektam slīdot pa ledu. Ja robežslāņa biezums pārsniedz slīdošā objekta raupjuma amplitūdu, rodas pilnībā hidrodinamisks režīms ar zemu berzes koeficientu. Savukārt ļoti plāns robežslānis var radīt robežberzes režīmu, kurā notiek slīdošā objekta tekstūras negludumu mehāniska iespiešanās ledū, kā rezultātā berzes koeficients palielinās [2], [11], [16], [27], [32]. Berzes režīmi atkarībā no robežslāņa biezuma ir apkopoti Stribeka līknē (4. b att.), kur berzes koeficients uz ledus ir attēlots uz vertikālās ass, objekta kustības ātrums – uz horizontālās ass.



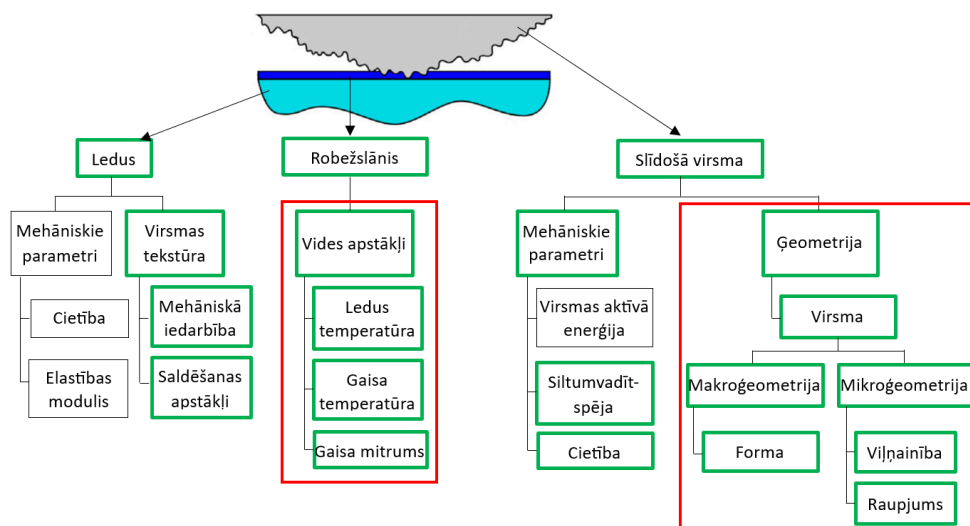
4. att. a) Ledus fāžu diagramma [1]; b) Stribeka līkne ledus berzei. Ledus berzes koeficients ir attēlots uz vertikālās ass, objekta kustības ātrums – uz horizontālās ass [6].

Ledus slīdamību ietekmē arī ārējo spēku radītais spiediens uz tā virsmu un objekta kustības ātrums [2], [11], [16], [28], [32]. Piemēram, ledus var kļūt slidenāks berzes procesa radītā siltuma rezultātā, piemēram, slidotājam slīdot pa ledu [3], [40], [42], [47]. Berzes rezultātā ledus virskārta kūst, veidojot biežāku robežslāni, kas samazina berzes koeficientu.

Vēl viens parametrs, kas var būtiski ietekmēt ledus slīdamību, ir tā temperatūra [1]–[3], [16], [19], [32], [48], [49]. Palielinoties ledus temperatūrai, tas sāk intensīvāk kust un veidot biezāku robežslāni, tādējādi samazinot tā berzes koeficientu. Savukārt, ledus temperatūrai samazinoties, ūdens molekulas uz tā virsmas sāk sasalt, veidojot sausāku un raupjāku virsmu, kas palielina berzes koeficientu.

Berzes koeficientu ietekmē kontaktlaukums starp slīdošo ķermeni un ledu, jo kontaktlaukums tieši ietekmē molekulāro un mehānisko spēku lielumu, kas darbojas starp abiem materiāliem. Berzes spēks galvenokārt rodas, slīdošās virsmas negludumiem mehāniski ieduroties ledus virskārtā. Kontaktlaukums nosaka saskarē esošo negludumu skaitu, tādējādi nosakot kopējo berzes pretestību. Lielāks kontaktlaukums nodrošina lielāku kontaktā ar ledu esošo negludumu skaitu, un otrādi. Kontakta laukums ietekmē arī siltuma pārneši slīdēšanas laikā. Lielāks kontaktlaukums nodrošina intensīvāku siltuma pārneši no slīdošā objekta uz ledu. No minētā izriet, ka kontaktlaukums būtiski ietekmē slīdošo objektu berzes īpašības uz ledus.

5. attēlā redzami būtiskākie faktori, kas ietekmē slīdošā objekta virsmas un ledus berzes koeficientu.



5. att. Būtiskākie faktori, kas ietekmē slīdošā objekta virsmas un ledus berzes koeficientu. Ar zaļu krāsu atzīmētie faktori ir ņemti vērā šajā promocijas darbā. Ar sarkanu krāsu atzīmēti faktori, kuru ietekme šajā promocijas darbā pētīta padziļināti.

Apkopojot iepriekš minēto, var secināt, ka ledus slīdamība ir saistīta ar to, ka uz tā virsmas veidojas plāns ūdens molekulu slānis jeb robežslānis, kas samazina berzes koeficientu starp slīdošā objekta virsmu un ledu. Ledus slīdamību ietekmē šādi parametri: apkārtējā gaisa un ledus temperatūra; gaisa mitrums; kustības ātrums; slīdošā objekta un ledus kontaktlaukums; virsmas tekstūras orientācija; kontaktpiediens; slīdošā objekta ķīmiskās īpašības; ledus virsmas cietība un citi. Labāka izpratne par šiem parametriem un to savstarpējo mijiedarbību ļautu attīstīt šo pētījumu virzienu. Šis promocijas darbs galvenokārt pievēršas slīdošā objekta ģeometriskos īpašību mērījumiem un raksturošanai, lai uzlabotu izpratni par virsmas mijiedarbību ar ledu un robežslāni.

2. Literatūras analīze

Promocijas darbā izstrādāta un pārbaudīta jauna metodoloģija slīdoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem un analīzei. Promocijas darba autors saprata, ka šāda metodoloģija ir nepieciešama pēc tam, kad viņš savos veiktajos eksperimentos vairākkārt pamanīja, ka identiski sagatavotiem testa paraugiem ar vienādām virsmas raupjuma vērtībām, kam berzes testos vajadzētu uzrādīt vienādus rezultātus, bija ievērojami atšķirīgas izmērītās triboloģiskās vērtības. Šis novērojums lika saprast, ka rezultātu analīzē iztrūkst būtiskas informācijas par testa parauga ģeometriju, kas slēpj skaidrojumu tam, kāpēc šiem šķietami identiskajiem testa paraugiem ir atšķirīgas triboloģiskās īpašības. Promocijas darba autors izpētīja, kā citi zinātnieki ir mērijuši un raksturojuši savu testa paraugu virsmas berzes pētījumos ar ledu. Literatūras apskata rezultātā, kas apkopots **1., 2. 5. un 6. publikācijā** [7], [15], [26], [45], tika secināts, ka katrai pētnieku grupai, kas strādā šajā jomā, ir unikāla pieeja, aprīkojums un metodoloģija testa paraugu ģeometrijas sagatavošanai, mērīšanai un datu interpretācijai. Diemžēl nevienā no šīm metodoloģijām nav iekļauta visaptveroša informācija par testa parauga ģeometriju. Pārsvārā tiek ņemts vērā tikai virsmas raupjums, kas liek domāt, ka arī citas pētnieku grupas varētu saskarties ar tādām pašām problēmām saistībā ar nepilnīgu testa virsmas raksturošanas pieeju, tāpēc tika iesākts darbs pie jaunas virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērīšanas un pēcāpstrādes metodoloģijas.

Pirmais solis jaunās metodoloģijas izstrādē bija atrast uzdevumam vispiemērotāko mērīšanas rīku. Dažādu mērinstrumentu iespējas, priekšrocības un trūkumi salīdzināti un apskatīti **1. un 6. publikācijā** [15], [45]. **6. publikācijā** atspoguļotais mērinstrumentu salīdzinājums redzams 1. tabulā.

1. tabula [15]

Virsmas topogrāfijas mērīšanas rīku ierobežojumi (simboli +, ? un X attiecīgi apzīmē: mērījums ir iespējams; mērījums varētu būt iespējams; mērījums nav iespējams)

Forma	Viļņainība	Raupjums	Ierobežojumi	Tipiskais mērījumu izmēra ierobežojums
2D mērījumi				
Profilometrs – kontakta tipa	+	+	+	Mērtausta rādiuss > 1 μm Profila garums: 100 mm Augstums: 2 mm
Optiskais mikroskops	X	?	+	Virsmas atstarošanās, kontrasts Laukums: 200 × 200 mm
SEM	X	?	+	Parauga sagatavošana Laukums: 5 × 5 mm
3D mērījumi				
Koordinātu mērīšanas mašīna	+	?	X	Mērtausta diametrs > 300 μm Mērījumu diapazons līdz pat vairākiem metriem visās asīs
Kontūru mērīšanas iekārta	+	+	?	Mērtausta rādiuss > 25 μm Laukums: 200 × 100 mm Augstums: 60 mm
Bezkontakta profilometrs	+	+	+	Gaismas absorbcija, Atstarošanās, Laukums: 150 × 200 mm Augstums: 2 mm

1. tabulas turpinājums

Stāvas negludumu malas					
Kontakta tipa profilometrs	+	+	+	Mērtausta rādiuss $> 1 \mu\text{m}$	Laukums: $200 \times 100 \text{ mm}$ Augstums: 2 mm
AFM	X	?	+	Ierobežots parauga izmērs	Laukums: $200 \times 200 \mu\text{m}$ Augstums: 50 μm

Lai gan visi salīdzinātie mērinstrumenti ir noderīgi un tiem ir savas priekšrocības, tika secināts, ka kontakta tipa profilometrija ir vislabāk piemērota šim uzdevumam šādu iemeslu dēļ:

- var izmērīt visas trīs virsmas komponentes (formu, viļņainību un raupjumu). Šī pieeja nodrošina iespēju veikt vienu mērījumu, ko pēc tam var analizēt, izmantojot visas virsmas komponentes kopā vai atsevišķi;
- iespējams plašs mērījumu diapazons, kas ļauj strādāt ar lielākiem objektiem, ko vēlāk var izmantot lauka testos;
- var mērīt smagus paraugus (līdz 10 kg), tādējādi nodrošinot iespēju izmērīt lielus testa objektus, piemēram, bobsleja vai skeletoņa slieces.

Papildus tika secināts, ka 3D kontūru mērīšanas iekārta un 3D koordinātu mērīšanas mašīna (KMM) būtu labākais papildu aprīkojums lielākas amplitūdas formu mērījumiem, savukārt atomspēku mikroskops (AFM) ir nepieciešams, ja ar ļoti augstu izšķirtspēju jāpārbauda nelielas amplitūdas skrāpējumi vai patēriņi uz nelielām pulētām virsmām [45].

Nākamajā izpētes etapā tika apskatīts, kāda veida un izmēra paraugi tika izmantoti līdzšinējos pētījumos, kā tika mērīta to ģeometrija un kādi parametri tika izmantoti, lai raksturotu to ģeometriju. Salīdzinājums publicēts **6. publikācijā**. Secināts, ka tipiski tiek izmērīta tikai neliela daļa no visas slīdošā objekta virsmas (3. tab.), kas nozīmē, ka iztrūka informācijas par visu pētāmās virsmas ģeometriju. 2. tabulā apkopoti virsmas tekstūras parametri, ko citi pētnieki ir izmantojuši ledus triboloģijas jomā.

2. tabula [15]

Tekstūras parametri, kas izmantoti līdzšinējos triboloģijas pētījumos pa ledu

2D parametri	
Ra	Profila vidējā aritmētiskā novirze no viduslīnijas. Nosaka virsmas nelīdzenumu vidējo augstumu [10], [26], [29], [37].
Rdq	Vidējais kvadrātiskais profila slīpums. Nosaka profila nelīdzenumu slīpumu [10].
Rsm	Raupjuma profila vidējais nelīdzenumu solis [26], [37], [50]. Nosaka, cik blīvi atrodas profila nelīdzenumi.
3D parametri	
Sa	Virsmas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes [26], [45], [50].
Sq	Vidējā kvadrātiskā novirze no vidusplaknes [16].
Ssk	Ieplaku izkliedes līknes simetrija. Raksturo, vai virsmu veido negludumi virs vidusplaknes vai ieplakas zem vidusplaknes [24], [33].
Sku	Ieplaku izkliedes līknes plakanums [24], [33].

2. tabulas turpinājums

S10z	Virsmas 10 punktu augstums. Norāda virsmas augstumu, kas aprēķināts, izmantojot tikai piecus augstākos izciļņus un piecas zemākās iepakas. Parametrs sniedz labāku priekšstatu par tekstūras faktisko amplitūdu. Aprēķinā ir ņemti vērā pieci augstākie izciļņi, tāpēc šis parametrs var strauji mainīties, ja paraugs sāk dīlt [24].
Sz	Virsmas tekstūras maksimālā amplitūda. Norāda augstumu starp virsmas augstāko izcilni un dziļāko iepakku. Ja izmanto tikai augstāko un zemāko punktu, šis parametrs strauji mainīsies, ja paraugs sāk dīlt [22].
Sfd	Fraktālā dimensija. Raksturo tekstūras sarežģītību. Ja parametra vērtība sasniedz skaitli 2, virsma ir absolūti gluda. Ja parametra vērtība atbilst skaitlim 3, virsma ir telpiski kompleksa un raupja, un tādējādi tai ir lielāka teorētiskā kontaktvirsma [33], [35].

Nestandardizēti parametri

β	Slīpuma leņķis. Leņķis starp parauga virsmu un ledus nelīdzenuma slīpumu [35].
KK	Kontakta kritērijs. To aprēķina kā parametru Rsm/Sa attiecību. KK norāda negludumu slīpumu, t. i., lielāka attiecības vērtība atbilst gludākām virsmām ar zemiem un platiem negludumiem. KK vērtības pieaugums liecina par augstākiem un blīvāk novietotiem negludumiem [26].

Papildus 2. tabulā uzrādītajiem parametriem slīdošo virsmu raksturošanai ledus triboloģijā ir izmantota arī atbalsta līkne vai atbalsta plakne (*Abbott – Firestone* līkne vai plakne) [7], [10], [36].

3. tabulā apkopoti dati par citu pētnieku eksperimentālajiem paraugiem, virsmas mērīšanas metodēm un virsmas parametriem, kas izmantoti to pētījumos.

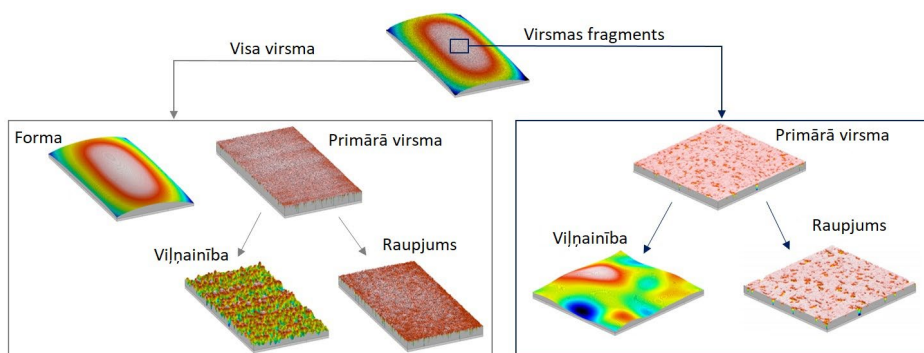
3. tabula [15]

Citu pētnieku izmantoto paraugu tips, izmēri, izmantotie virsmas mērīšanas rīki un izmantotie virsmas tekstūras raksturošanas parametri (saīsinājumi: n/n – nav norādīts; L – garums; W – platums; H – augstums; R – rādiuss)

Parauga tips un izmēri (mm)	Izmērītais garums / laukums (mm)	Virsmas mērīšanas rīks	Tekstūras parametri	Ats.
Tapa: diametrs = 3	0,4 × 2,8	Konfokālā mikroskopija	Ra, Rq, Rsk, Rk, Rku	[10]
Tapa: izmēri = n/n	0,5 × 0,5	Kontakta tipa 3D profilometrs	Ra, Rdq, Ssk, Sku, Sfd (D)	[33]
Gredzena tipa paraugs: ārējais diametrs = 25,4; iekšējais diametrs = 23,4; H = 1	Profilometrs: n/n AFM: n/n SEM: 0,2 × 0,2	Bezkontakta profilometrs, AFM, SEM	Ra, izciļņa diametrs	[29]
Tērauda slēpe: L = 487,5; W = 30; H = 30	1,7 × 1,8 3,3 × 3,3 8,2 × 7,8 11,3 × 11,3	Fokusa variāciju mikroskops	Sa, Sz, Ssk, Sku, Sku	[22], [24]
Tērauda sliece: L = 150; W = 8; H = 20; slieces šķērsvirziena rādiuss = 4	0,05 × 0,05	AFM	Sa, St	[22]
UHMPE polimēra paraugi: n/n	0,4 × 0,5	Interferometrs, SEM	Slīpuma leņķis (β)	[35]

UHMPE slēpe uz alumīnija korpusa: L = 65; W = 40; H = n/n	0,5 × 1	Konfokālā mikroskopija	Kores platums	[9]
Lāzerteksturētas slēpes ar metālisku kanti: L = 200; W = 20; H = 0,5	0,6 × 0,6	SEM, optiskais profilometrs	Ieplaku diametrs un dziļums	[8]
Silīcija karbīda lodītes: R = 0,75; 6,00 Sodas-kaļķa stikla lodītes: R = 1,84 Safīra lodīte: R = 1,59 Metāla slidas: R ≈ 22	0,2 × 0,2	lāzerskenējošā konfokālā mikroskopija	Sq	[16]
Tērauda paralēlskalnis: L = 35; W = 18; H = 14	2 × 2 20 × 10 32 × 16	Interferometrs Kontakta tipa profilometrs	Ra, Rsm, Rz, Rpk, Sa, KK, Sdq, Ssk, Sku, Sku	[6], [7], [26]

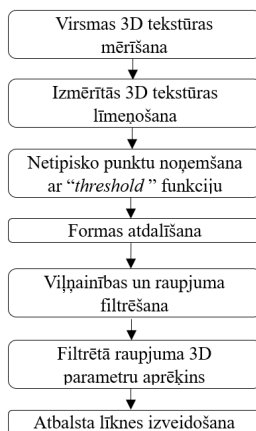
Literatūras analīzes rezultātā noskaidrots, ka līdz šim triboloģijas pētījumos pa ledu ir izmantoti 12 dažādi virsmas ģeometriju raksturojoši parametri. Problēma visiem šiem parametriem ir tāda, ka tie ir aprēķināti tikai virsmas raupjuma komponentei, izmantojot dažādas bāzes garuma (angļu val. *cut-off*) filtra vērtības. Kā norādīts šī promocijas darba tēmas aktualitātē, raupjums veido tikai nelielu daļu no visas virsmas tekstūras amplitūdas. 6. attēlā redzams piemērs, cik atšķirīga ir interpretācija par virsmu, ja ir pieejami dati par visu virsmu vai tikai nelielu daļu no tās. Līdz šim izmantotās metodoloģijas iesaka veikt mērījumus nelielam virsmas fragmentam un analizēt tikai filtrēto raupjuma komponenti.



6. att. Parauga virsmas analizēšanas iespējas ir ļoti atkarīgas no izmērītā virsmas laukuma. Visas virsmas mērījums sniedz būtisku informāciju par virsmas makroģeometriju (formu) un mikroģeometriju (viļņainību un raupjumu). Savukārt neliela virsmas fragmenta mērījumi var būt ar lielāku izmērīto punktu blīvumu, tādējādi sniedzot detalizētāku informāciju par mikroģeometriju, taču informācija par formu nav pieejama [15]. Iztrūkstošā informācija par virsmas makroģeometriju kavē pilnvērtīgi analizēt slidoša objekta virsmas kontaktu ar ledu.

7. attēlā redzama visbiežāk izmantotā metodoloģija slidoša objekta virsmas mērījumu un iegūto rezultātu pēcapstrādē triboloģijas pētījumos pa ledu. Šīs metodoloģijas ietvaros virsmas

mērījumu rezultāti tiek vairākas reizes digitāli filtrēti. Rezultātā tiek ņemta vērā tikai filtrētā raupjuma komponente, savukārt visa informācija par virsmas makroģeometriju, kas visvairāk ietekmē virsmas kontaktu ar ledu, tiek pilnībā ignorēta.



7. att. Visbiežāk izmantotā metodoloģija slīdošā objekta virsmas mērījumu, un iegūto rezultātu pēcapstrādē triboloģijas pētījumos pa ledu.

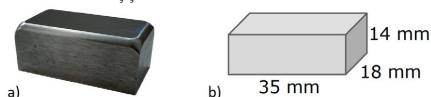
Literatūras analīzes procesā secināts, ka ir nepieciešama jauna metodoloģija slīdošā objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem un analīzei, kas pētniecības procesā iekļautu visas virsmu veidojošās komponentes, ļaujot aprēķināt kontakta laukumu.

3. Eksperimentālie pētījumi

Šajā promocijas darbā triboloģiskie eksperimenti veikti ar diviem dažādiem tribometriem. Šie ir pirmie zināmie eksperimenti triboloģijas pētījumos pa ledu, kad vieni un tie paši paraugi tiek testēti ar dažādiem tribometriem, nodrošinot unikālu iespēju salīdzināt novērojumus, kas iegūti ar dažādām metodēm. Šādi testi bija iespējami, pateicoties izvēlētajai eksperimentālo paraugu ģeometrijai. Iegūtie triboloģisko eksperimentu rezultāti sniedza informāciju par virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekmi uz berzes koeficientu, un ļāva salīdzināt triboloģiskos mērījumus, kas iegūti, izmantojot dažādus testa iestatījumus.

Eksperimentālie paraugi

Visi promocijas darba eksperimentālie paraugi, kas testēti ar tribometriem, tika izgatavoti kā paralēlskalniņi šādā izmērā: garums 35 mm; platums 18 mm; un augstums 14 mm (8. att.). Paraugi tika apstrādāti, izmantojot vienādus iestatījumus, lai nodrošinātu, ka to sākotnējā ģeometrija ir pēc iespējas identiskāka. Paraugu asās malas un stūri tika noapaļoti, lai samazinātu risku, ka malas aizķeras aiz ledu izciļņiem.



8. att. a) Eksperimentālā parauga fotoattēls; b) eksperimentālā parauga ģeometrijas skice.

Paraugi tika izgatavoti no nerūsējošā tērauda *Ramax HH* (*Uddeholm*, Zviedrija), kam raksturīga augsta korozijas noturība. *Ramax HH* tērauda ķīmiskais sastāvs un fizikālās īpašības redzamas 4. un 5. tabulā.

4. tabula

Uddeholm Ramax HH nerūsējošā tērauda ķīmiskais sastāvs [51]

Elements	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	S
%	0,12	0,20	1,30	13,40	0,50	1,60	0,20	0,10

5. tabula

Uddeholm Ramax HH nerūsējošā tērauda fizikālās īpašības [51]

Fizikālā īpašība	20 °C temperatūrā
Blīvums, kg/m ³	7700
Elastības modulis, Mpa	215000
Termiskās izplešanās koeficients uz 1 °C no 20°C	$10,8 \times 10^{-6}$
Siltumvadītspēja, W/m °C	24
Īpatnējā siltumietilpība, J/kg °C	460
Stiepes izturība R _m , MPa	1140
Tecēšanas robeža R _{p0,2} , MPa	990
Platības samazinājums Z, %	46
Pagarinājums A ₅ , %	12
Cietība, HB	330 ± 5

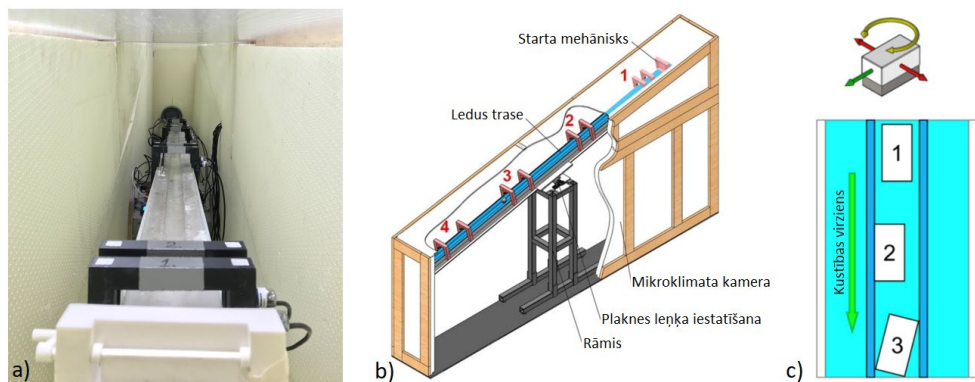
Ekspperimentālo paraugu testa virsma tika pulēja ar automātisko pulēšanas iekārtu *334 TI 15 Mecatech* (*Presi*, Francija). Pulēšanas process un tā ietekme uz paraugu virsmu ir aprakstīta **7. publikācijā**.

Galīgās paraugu tekstūras tika izgatavotas, izmantojot dažādas apstrādes metodes, t. i., skrāpēšana ar auduma smilšpapīriem (**2.**, **4.** un **5. publikācija**), apstrāde ar smilšu strūklku (**3.**, **4.**, **5.** un **6. publikācija**), gravēšana ar frēzi (**5.** un **7. publikācija**), gravēšana ar femtosekunžu lāzera sistēmu (**7. publikācija**).

Triboloģijas eksperimenti

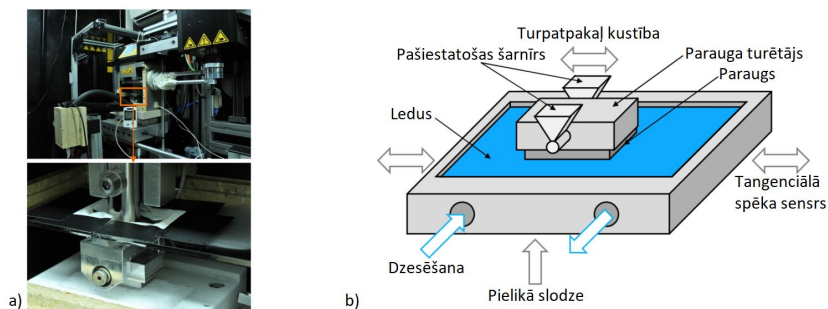
Lai pārbaudītu eksperimentālo paraugu triboloģiskās īpašības, tika izmantoti divu veidu tribometri. Abiem tribometriem bija iespējams kontrolēt apkārtējās vides parametrus, ļaujot veikt testus dažādos klimatiskajos apstākļos.

RTU inženieru izstrādātais slīpās plaknes tribometrs (9. att.) mēra parauga slīdēšanas laiku noteiktos attālumos. Izmantojot zināmos attālumus un izmērīto slīdēšanas laiku, tika aprēķināti vidējie slīdēšanas ātrumi četros distancēs nogriežņos, un tie izmantoti kā netieši triboloģisko veiktspēju raksturojoši parametri, t. i., lielākas ātruma vērtības nozīmē mazāku berzes koeficientu, un otrādi. Slīpās plaknes tribometra darbības princips un izmantotie eksperimentālie iestatījumi ir aprakstīti **2.**, **3.**, **4.**, **5.**, **6.** un **7. publikācijā**. Šī promocijas darba tapšanas laikā slīpās plaknes tribometrs tika vairākkārt uzlabots. Katrs uzlabojums nodrošināja stabilāku klimatu ap tribometru un uzlaboja iegūto rezultātu izšķirtspēju, kā arī ergonomiku.



9. att. a) Slīpās plaknes tribometra fotoattēls; b) slīpās plaknes tribometra skice [7];
c) eksperimentālā parauga kustības brīvības pakāpes testu laikā uz slīpās plaknes tribometra: 1 – ideālā kustības pozīcija, 2 – nevēlama parauga sānslīde, 3 – nevēlama parauga rotācija [6].

Otrs tribometrs, kas tika izmantots šajā promocijas darbā, bija svārstveida lineārais tribometrs (10. att.) *RVM1000* (*Werner Stehr Tribology GmbH*, Vācija), kas atrodas *V-Research GmbH* (*Dornbirn*, Austrija) triboloģijas laboratorijā. Ar šo tribometru tika mērīts berzes spēks starp ledu un eksperimentālo paraugu virsmu. No izmērītajiem berzes spēkiem un pieliktās slodzes vērtībām tika aprēķināti statistiskie un dinamiskie slīdes berzes koeficienti. Aprēķinātos slīdes berzes koeficientus izmantoja, lai salīdzinātu paraugu triboloģiskos rādītājus. Tribometra darbības princips un izmantotie eksperimentālie iestatījumi sīkāk aprakstīti **3.**, **4.** un **6. publikācijā**.



10. att. a) Svārstveida lineārā tribometra *RVM1000* fotoattēls; b) svārstveida lineārā tribometra skice [6].

Eksperimentālo paraugu virsmas ģeometrijas 3D mērījumi

Eksperimentālo paraugu virsmu ģeometrija tika mērīta un raksturota ar dažādiem instrumentiem. Kontakta tipa profilometrija tika uzskatīta par svarīgāko mērījumu instrumentu, lai sasniegtu promocijas darba galveno mērķi, t. i., izstrādātu jaunu virsmas mikroģeometrijas

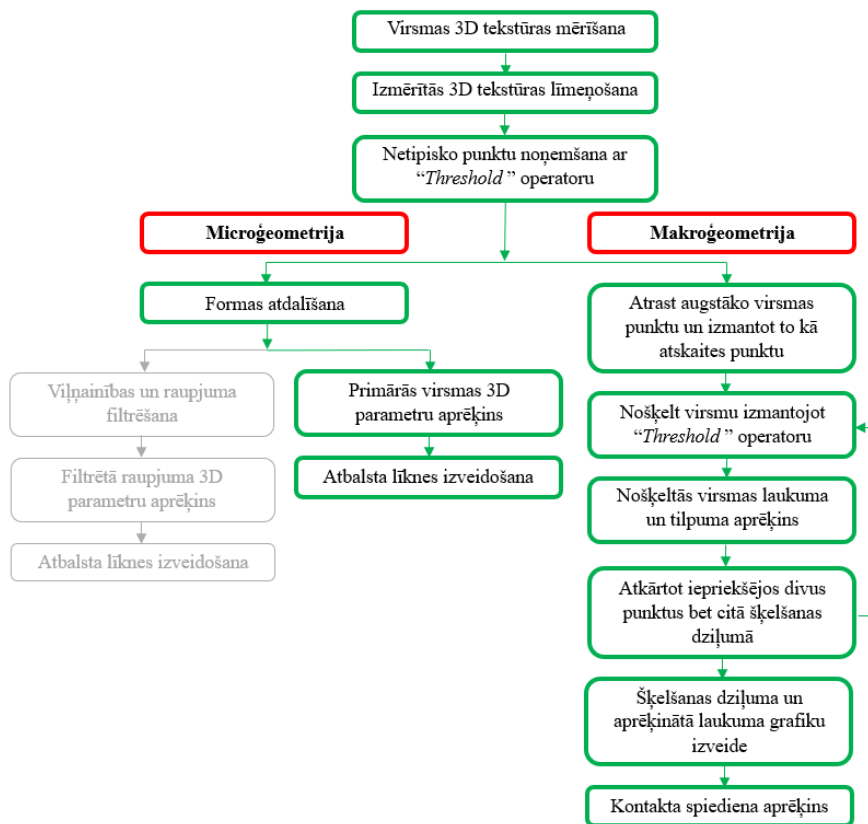
un makroģeometrijas mērījumu metodoloģiju. Iegūtie 3D profilometrijas rezultāti tika apstrādāti ar *TalyMap Gold* programmatūru (*Mountain Maps*, Francija).

Tālāk tekstā publicētajā sarakstā uzskaitīts, kuri virsmu mērinstrumenti tika izmantoti šī promocijas darba publikācijās.

- Kontakta tipa profilometrs *Form Talysurf Intra 50* ar standarta mērtaustu *112/2009* (*Taylor Hobson*, Apvienotā Karaliste). **1., 2., 3., 5., 6. un 7. publikācija.**
- Konfokālais mikroskops *VK-X250/260* (*Keyence International NV/SA*, Beļģija). **3., 4. un 6. publikācija.**
- Optiskais mikroskops *Eclipse LV150* (*Nikon*, Japāna). **1. publikācija.**
- Skenējošais elektronu mikroskops (SEM) *S-4800* (*Hitachi*, Japāna). **1. publikācija.**
- Atomspēku mikroskops (AFM) *Smena NT-MDT* (*NT-MDT Spectrum Instruments*, Krievija). **1. publikācija.**

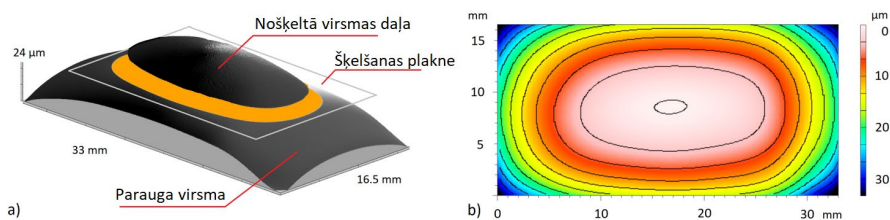
4. Jaunizveidotā virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija

Jaunā metodoloģija, kas nosaka vispārēju virsmas tekstūras mērījumu un rezultātu interpretācijas stratēģiju, grafiski parādīta 11. attēlā. Šī metodoloģija un tās priekšrocības, salīdzinot ar iepriekš izmantotajām metodoloģijām, detalizētāk aprakstītas **5., 6. un 7. publikācijā**. Jaunās metodoloģijas galvenā priekšrocība ir iespēja aprēķināt slīdoša objekta virsmas kontaktlaukumu ar ledu, nodrošinot trūkstošos datus kontaktpiediena aprēķiniem starp slīdošo virsmu un ledu. Šī informācija ļauj labāk izskaidrot virsmas tekstūras ietekmi uz berzes koeficientu, slidot pa ledu.



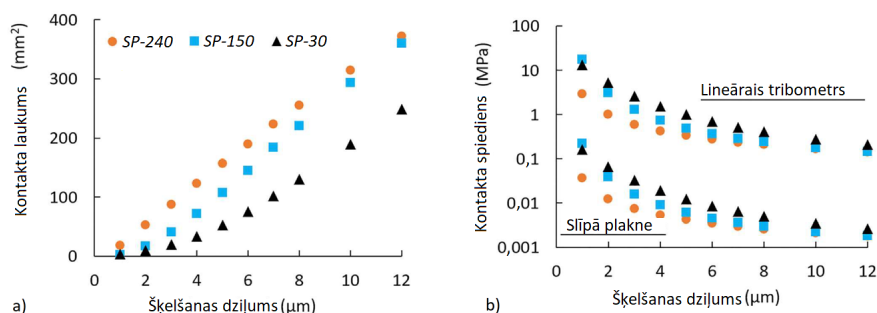
11. att. Jaunizveidotās slīdoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu un rezultātu apstrādes metodoloģijas grafiskā interpretācija. Ar pelēko krāsu attēlota iepriekš izmantotā metodoloģija, ar zaļo krāsu – jaunās metodoloģijas posmi.

Promocijas darba autors ierosina veikt virsmas 3D topogrāfijas mērījumu virtuālo šķelšanu, izmantojot “Threshold” operatoru 3D virsmu analīzes programmatūrā. Vispirms izmērītā virsmas 3D topogrāfija ir jānolīmeņo. Pēc līmeņošanas jāatrod tekstūras augstākais punkts, un tas jāizmanto kā virtuālās šķelšanas plaknes atskaites punkts. Augstākais tekstūras punkts tiek izmantots kā atskaites punkts, jo triboloģisko eksperimentu laikā tas pirmais nonāks kontaktā ar ledu. Paraugam pieliktās slodzes un siltuma pārneses rezultātā ledus virskārta sāk kust, un slīdošā objekta virsma iegrimst ledū, palielinot to savstarpējo kontakta laukumu. Veicot piedāvāto virtuālās šķelšanas metodi, ir iespējams izmērīt kontakta laukumu dažādos parauga iegrimšanas dziļumos ledū, tādējādi iegūstot kontakta spiediena aprēķiniem nepieciešamo informāciju pie dažādām slodzēm un temperatūrām. 12. attēlā redzams shematiskais princips virsmas 3D tekstūras virtuālajai šķelšanai.



12. att. a) Virsmas 3D tekstūras virtuālā šķelšana, izmantojot operatoru “*Threshold*”. Virtuālā šķelšanas plakne atdala virsmas segmentu, tam aprēķina virsmas laukumu un tilpumu; b) virtuāli sašķeltas virsmas topogrāfijas kontūrkartes piemērs. Šajā piemērā izmantots 3 μm solis starp virtuālajām šķelšanas plaknēm. Ar melno krāsu iezīmētie kontūri parāda, cik liela virsmas daļas saskarsies ar ledu dažādos iegrimšanas dziļumos. Ja virsmai ir izliekums, kā parādīts šajā piemērā, faktiskais kontaktvirsmas laukums ar ledu ir ievērojami mazāks nekā nominālais virsmas laukums, līdz paraugs tiek pilnībā iespiests ledus virsmā [15].

Aprēķinātās kontakta laukuma vērtības dažādos augstumos no atskaites punkta var izmantot, lai aprēķinātu kontakta spiedienu starp slidošo virsmu un ledu, sniedzot būtisku informāciju, lai analizētu, cik dziļi slīdošā virsma iegrimis relatīvi mīkstajā ledū. 13. attēlā redzams, kā izmērīto kontakta laukumu var izmantot, lai aprēķinātu kontakta spiedienu starp eksperimentālajiem paraugiem un ledu, kas testēti šajā promocijas darbā.



13. att. a) Izmērīto virsmas kontakta laukuma vērtības dažādos šķelšanas dziļumos no virsmas augstākā punkta. Parauga virsmas izliekuma dēļ kontakta laukums palielinās pie lielāka šķelšanas dziļuma. Visgludākajam paraugam (SP-240) ir vislielākais kontakta laukums, līdz ar to – arī viszemākais kontakta spiediens, savukārt visraupjākajam paraugam (SP-30) ir vislielākais kontakta spiediens; b) aprēķinātais kontakta spiediens (parādīts logaritmiskā skalā) starp eksperimentālo paraugu un ledu dažādos virtuālās šķelšanas dziļumos abiem izmantotajiem tribometriem (svārstību tipa lineārajam tribometram un slīpās plaknes tribometram). Vislielākās kontakta spiediena atšķirības starp paraugiem ir pie mazākā virtuālās šķelšanas dziļuma, kur lielāka nozīme ir virsmas mikroskopiskajiem negludumiem, kas ieduras ledus virskārtā [15].

Informācija par faktisko kontakta laukumu un aprēķināto kontakta spiedienu ir būtisks uzlabojums triboloģijas pētījumos pa ledu, jo iegūtos rezultātus var izmantot teorētiskajos berzes koeficienta aprēķina modeļos, kuros iepriekš izmantoja tikai nominālās (idealizētās)

virsmas ģeometrijas vērtības. Izmantojot jauno metodoloģiju, ir zināms faktiskais kontaktlaukums, un to var tieši izmantot turpmākajos aprēķinos.

Virsmas 3D topogrāfijas mērījumu pēcāpstrādes soļu vizuāls piemērs saskaņā ar jauno metodoloģiju ir parādīts promocijas darba 10. pielikumā.

5. Jaunās metodoloģijas aprobēšana

Jaunizveidotā slīdoša objekta virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija tika aprobēta, salīdzinot to ar iepriekš izmantotajām virsmu raksturošanas metodoloģijām. Veiktie eksperimenti un salīdzinājumi ir aprakstīti **5., 6. un 7. publikācijā**. Turpmākajās kopsavilkuma nodaļās izcelti svarīgākie metodoloģijas aprobācijas rezultāti.

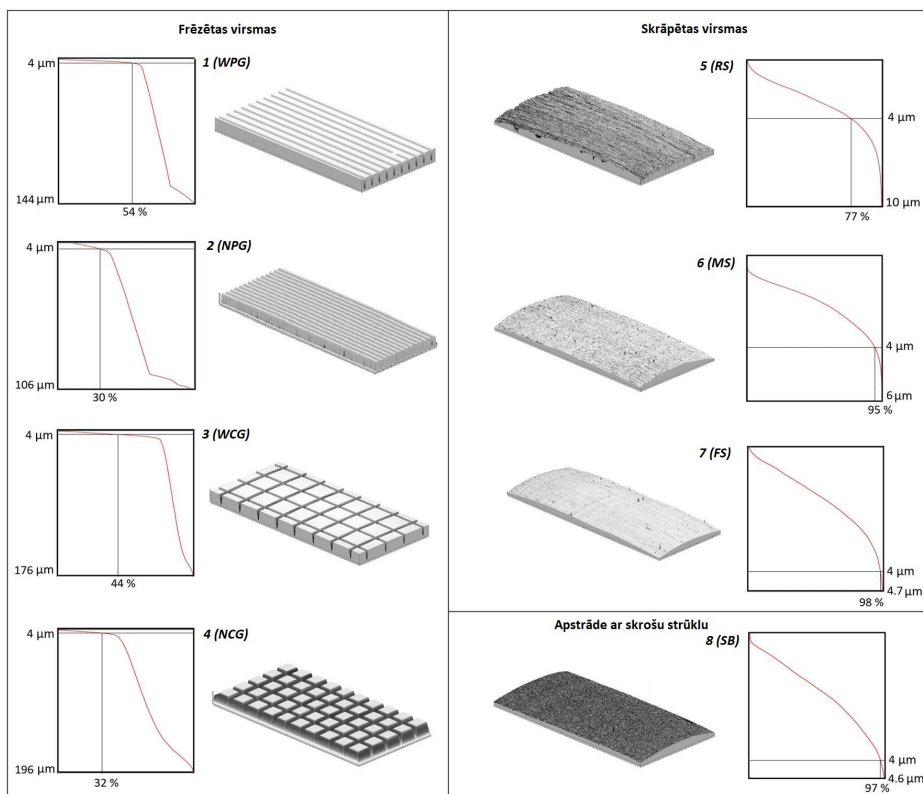
Ar dažādām ražošanas metodēm izgatavotu virsmu salīdzināšana

Nozīmīgākais ieguvums, ko sniedz jaunizstrādātā slīdoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija, ir iespēja salīdzināt virsmas, kas izgatavotas ar dažādām ražošanas metodēm, kas nebija iespējams, izmantojot iepriekš zināmās metodoloģijas.

Piemēram, izgatavojot teksturētas virsmas ar dziļām gropēm, kā redzams 14. attēla sadaļā “Frēzētas virsmas”, nav skaidrs, kā labāk raksturot šādas virsmas 3D topogrāfiju, izmantojot tikai virsmas raupjuma parametrus.

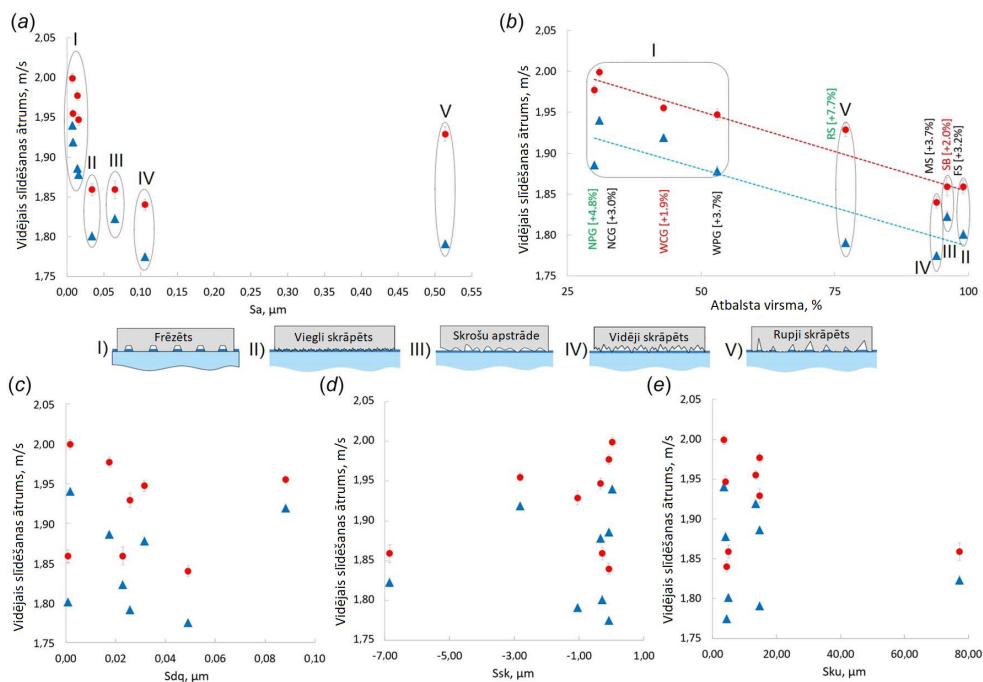
Var mēģināt veikt virsmas tekstūras mērījumus starp gropēm, taču, ja atstarpes starp tām ir mazas, var nepietikt vietas. Turklāt šāds topogrāfijas mērījums neiekļautu informāciju par pašām gropēm. Cita pieeja varētu būt kontaktlaukuma teorētiskie aprēķini, zinot parauga nominālo virsmas laukumu un no tā atņemot gropju laukumu. Tomēr šāda pieeja radīs ievērojamu kļūdu, jo realitātē neviena virsma nav ideāla, kas bija galvenais iemesls nepieciešamībai pēc jaunas virsmas raksturošanas metodoloģijas. Papildu problēma, ko nevar kvalitatīvi novērtēt ar līdzšinējām metodoloģijām, ir iespējamo materiāla izciļņu esamība uz gropju malām, kā tas redzams 17. attēlā. Bez pilnvērtīgiem virsmas tekstūras 3D mērījumiem izciļņus nav iespējams noteikt. Šīs problēmas rada daudz jautājumu par to, kā pilnvērtīgi izmērīt šādas sarežģītas virsmas. Risinājums ir jaunizveidotā slīdoša objektu virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērīšanas metodoloģija, kas ietver visas virsmu veidojošās komponentes (formu, viļņainību un raupjumu). Izmantojot šo metodoloģiju, nav nozīmes, vai virsma ir izgatavota ar frēzēšanu, smilšu strūklu, lāzerteksturēšanu vai kādu citu metodi, jo jaunajā metodoloģijā paredzēts pilnais virsmas 3D tekstūras mērījums, ko pēc tam var virtuāli sašķelt, un šķēlumiem aprēķināto kontaktlaukumu izmantot kā virsmas ģeometriju raksturojošo parametru.

Pētījumā, kas aprakstīts **5. publikācijā**, salīdzinātas astoņu dažādi izgatavotu virsmu triboloģiskās īpašības ar ledu (14. att.). Virsmu 3D topogrāfijas tika aprakstītas, izmantojot atbalsta virsmas, un, lai salīdzinātu jauno metodoloģiju ar iepriekš izmantoto, visām virsmām tika izrēķināti arī virsmas raupjuma parametri S_a , S_{dq} , S_{sk} un S_{ku} atbilstoši iepriekš izmantotajām metodoloģijām.



14. att. Dažādi izgatavotu virsmu 3D tekstūru piemēri. Frēzētie paraugi *WPG*, *NPG*, *WCG*, *NCG*, skrāpētie paraugi *RS*, *MS*, *FS* un ar smilšu strūklu apstrādātais paraugs *SB*. Blakus 3D tekstūrām ir attēloti grafiki, kuros redzams šo tekstūru atbalsta virsmas materiāla daudzums 4 μm dziļumā no tekstūras augstākā punkta. Iegūtie rezultāti rāda, ka dažādi izgatavotām virsmām var būt ievērojami atšķirīgi kontaktlaukumi pie viena un tā paša iegrimšanas dziļuma ledū, kā rezultātā starp parauga virsmu un ledu rodas atšķirīgs kontaktpiediens, kas ietekmē berzes koeficientu [7]. Attēls ir autora veidots, tā autortiesības pieder *ASME*.

Paraugu triboloģiskās īpašības tika testētas, izmantojot slīpās plaknes tribometru dažādos apkārtējās vides apstākļos. Eksperimentu 1. sērija tika veikta pie 64 % gaisa mitruma, $-2,5^{\circ}\text{C}$ gaisa temperatūras un -9°C ledus temperatūras, eksperimentu 2. sērija – 78 % gaisa mitruma, $+1^{\circ}\text{C}$ gaisa temperatūras un -4°C ledus temperatūras. Iegūtie paraugu slīdēšanas ātruma rezultāti tika izmantoti, lai salīdzinātu paraugu triboloģiskās īpašības. Lielāks vidējais ātrums nozīmē zemāku berzes koeficientu. Pēc tam triboloģisko eksperimentu rezultāti tika salīdzināti ar paraugu 3D tekstūras parametriem un atbalsta līknes vērtībām. Salīdzinājuma rezultāti parādīti 15. attēlā.



15. att. Salīdzinājums starp: a) paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un virsmas raupjuma parametriem Sa ; b) paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un atbalsta virsmu $4 \mu m$ dziļumā no augstākā virsmas augstākā punkta; c) paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un virsmas raupjuma parametru Sdq ; d) paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un virsmas raupjuma parametru Ssk ; e) paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un virsmas raupjuma parametru Sku . Ar trīsstūra marķējumiem attēloti 1. eksperimenta sērijas dati (64% , $-2,5 \text{ }^{\circ}C$, $-9 \text{ }^{\circ}C$), ar apaļajiem marķējumiem attēloti 2. eksperimenta sērijas dati (78% , $+1 \text{ }^{\circ}C$, $-4 \text{ }^{\circ}C$). Zonas, kas apvilktas un apzīmētas ar romiešu cipariem, atdala dažādas virsmas apstrādes metodes, to skices parādītas starp grafikiem [7]. Attēls ir autora veidots, tā autortiesības pieder ASME.

Iegūtie rezultāti uzrāda lineāru tendenci starp atbalsta virsmas procentuālo daudzumu un slīdēšanas ātrumu šajos eksperimentālajos iestatījumos. Apkārtējās vides apstākļu izmaiņas mainīja triboloģisko eksperimentu absolūtās vērtības, bet tendences līnija palika nemainīga. Šādos eksperimentālos apstākļos mazāks kontaktlaukums starp slīdošā objekta virsmu un ledu veicināja labāku slīdēšanu. Ir būtiski akcentēt, ka slīpās plaknes tribometra eksperimentos starp slīdošā objekta virsmu un ledu ir zems kontakta spiediens ($< 1 \text{ MPa}$). Palielinoties kontaktspiedienam, tekstūras ietekmes tendences var mainīties, jo paraugi ar mazāku virsmas laukumu vairāk iegrims ledū, kas palielinās berzi.

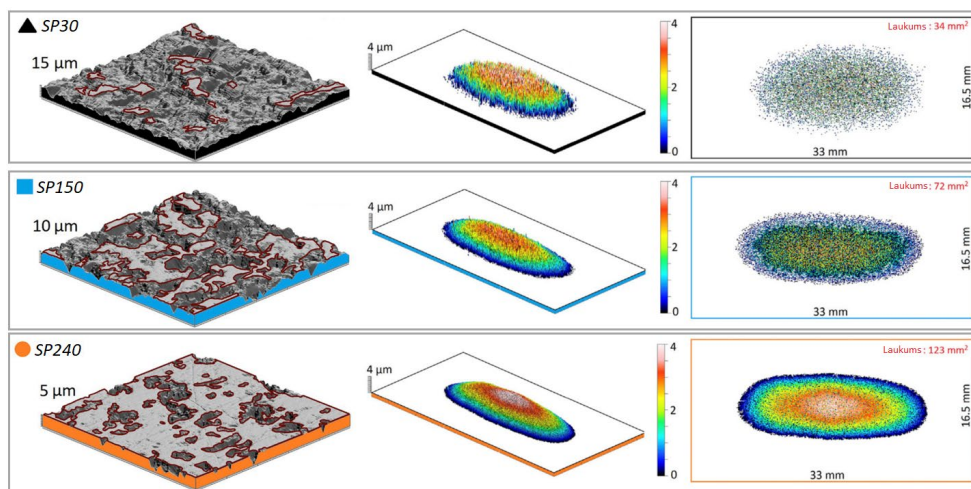
Korelācija starp paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un virsmas raupjuma parametru Sa bija vājāka. Rezultāti pierādīja, ka virsmas raupjuma parametrs Sa , neskatoties uz to, ka tas ir visbiežāk izmantotais, nav labākais parametrs, lai aprakstītu virsmas tekstūru ledus triboloģijas pētījumos. Turklāt tika pierādīts, ka starp paraugu vidējo slīdēšanas ātrumu un virsmas raupjuma parametriem Sdq , Ssk un Sku vispār nav loģisku tendenču. Iegūtie rezultāti pierādīja,

ka atbalsta virsmas izmantošanai ir liels potenciāls, lai raksturotu, kā dažādi apstrādātas virsmas slīdēs pa ledu.

Ar vienu ražošanas procesu izgatavotu virsmu salīdzināšana

Jaunizveidotā slidoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija tika aprobēta arī ar paraugiem, kas izgatavoti ar vienu un to pašu ražošanas metodi, lai noskaidrotu, vai arī šādos gadījumos metodoloģijai ir būtiskas priekšrocības, salīdzinot ar iepriekš zināmajām metodoloģijām. Šī pētījuma pilns izklāsts aprakstīts **6. publikācijā**, šajā kopsavilkuma apakšnodaļā izcelti pētījuma galvenie rezultāti.

Pētījuma eksperimentālie paraugi tika sagatavoti, kombinējot smilšu strūklu un pulēšanas metodi, lai iegūtu gludas virsmas ar neregulārām ieplakām. 16. attēlā redzamas pētījumam sagatavotās virsmas piemēri.



16. att. Ar smilšu strūklu un pulēšanu sagatavotie paraugi. Paraugu skaitliskie indeksi (30, 150 un 240) apzīmē pārpulēšanas laiku sekundēs. Jo ilgāks pārpulēšanas laiks, jo vairāk tiek nolīdzināti pēc smilšu strūklu radītās virsmas tekstūras izciļņi. Kreisajā pusē parādīti paraugu virsmu 3D tekstūras fragmenti (500 μm x 500 μm). Pa vidu parādītas paraugu 3D tekstūras mērījumiem virtuāli nošķelts virsmas fragments 4 μm dziļumā no tekstūras augstākā punkta.

Pa labi ir parādīti virtuāli nošķelto virsmas fragmentu projicētie virsmas laukumi [15].

6. tabulā parādīta aprēķinātā dispersijas variance (RSQ) starp izmērītajiem virsmas tekstūras parametriem un berzes koeficienta mērījumiem, kas iegūti ar svārstību tipa lineāro tribometru. Jo tuvāk RSQ vērtība ir skaitliskajai vērtībai 1, jo spēcīgāka ir korelācija starp salīdzināmajiem parametriem. Uzskatāmākam grafiskam attēlojumam 6. tabulā RSQ vērtības ir attēlotas krāsu gradācijā no sarkanas (vērtība 0) līdz dzeltenai (vērtība 0,5) un, visbeidzot, zaļai (vērtība 1). Sarkanie toņi apzīmē vāju korelāciju, zaļie toņi – spēcīgu korelāciju. Vairāk informācijas par šīs tabulas izveidošanas principiem – **6. publikācijā**.

Dispersijas variance (*RSQ*) starp virsmas tekstūras parametriem vai kontaktspiedienu un izmēritajām berzes koeficientu vērtībām ar oscilējošā tipa lineāro tribometru

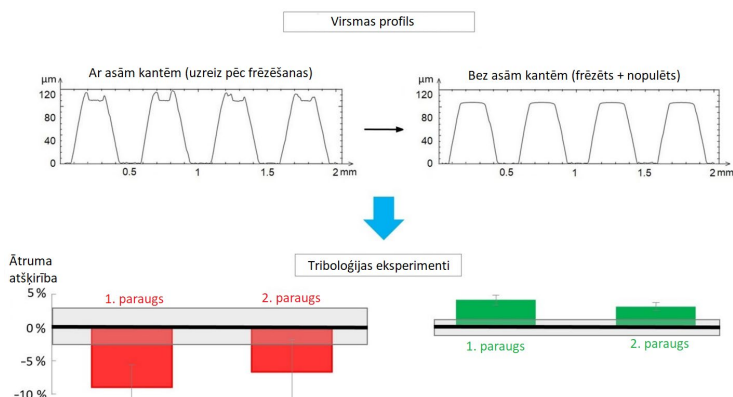
Informācija par paraugu virsmas ģeometriju																			
Kontakta spiediens, [MPa]	, [μm]	SP30	SP150	SP240															
	1	13.18	17.57	2.93															
	2	5.27	3.10	0.99															
	3	2.64	1.29	0.60															
	4	1.55	0.73	0.43															
	5	0.99	0.49	0.34															
	6	0.69	0.36	0.28															
	7	0.52	0.29	0.24															
	8	0.41	0.24	0.21															
	10	0.28	0.18	0.17															
12	0.21	0.15	0.14																
Tekstūras parametri (TP)	Sa (R), μm	3.2	2.4	1.0															
	Sa (P), μm	1.7	1.1	0.4															
	Ssk (P)	-0.6	-1.2	-2.9															
	Sku (P)	3.0	3.8	12.0															
	Sds (P), pks/mm2	4272	5622	10881															
Svārstību tipa lineārā tribometra dati																			
Ātrums, [m/s]	Paātr./Bremz.	Berzes koeficients (BK)			Kontakta spiediens / BK, [RSQ]										TP / BK, [RSQ]				
0.02	Paātrinoties	0.079	0.028	0.014	0.18	0.91	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.76	0.89	0.70	0.52	0.64
0.04		0.057	0.023	0.014	0.17	0.90	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.75	0.88	0.70	0.52	0.63
0.10		0.045	0.024	0.015	0.25	0.95	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.96	0.95	0.83	0.94	0.78	0.61	0.72
0.15		0.041	0.023	0.016	0.23	0.94	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.81	0.93	0.76	0.59	0.70
0.19		0.043	0.028	0.023	0.20	0.93	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.79	0.91	0.74	0.56	0.67
0.29		0.029	0.019	0.017	0.14	0.88	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.71	0.85	0.66	0.47	0.59
0.39		0.033	0.020	0.016	0.19	0.92	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.78	0.90	0.72	0.54	0.66
0.29	Bremzējoties	0.030	0.019	0.015	0.18	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.96	0.80	0.92	0.75	0.58	0.69
0.19		0.039	0.024	0.018	0.24	0.95	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.82	0.93	0.77	0.60	0.71
0.15		0.040	0.023	0.016	0.24	0.95	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.95	0.82	0.93	0.78	0.60	0.71
0.10		0.044	0.023	0.016	0.20	0.93	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.79	0.91	0.74	0.56	0.67
0.04		0.051	0.023	0.015	0.18	0.91	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.76	0.89	0.71	0.53	0.64
0.02		0.059	0.023	0.015	0.15	0.89	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.73	0.86	0.67	0.49	0.60
0.02			0.059	0.023	0.015	0.15	0.89	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.73	0.86	0.67	0.49

Iegūtie rezultāti liecina, ka ar jauno metodoloģiju izrēķināto kontaktspiediena vērtību starp slidošu objektu virsmu un ledu izmantošana virsmas ģeometrijas raksturošanai uzrāda spēcīgāku korelāciju ar berzes koeficienta mērījumiem nekā līdz šim izmantotie 3D tekstūras parametri. Iegūtie rezultāti ļāva apstiprināt, ka jaunizveidotā metodoloģija slidošu objektu virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērīšanai nodrošina labāku virsmu raksturošanu arī paraugiem, kas izgatavoti ar vienādu ražošanas tehnoloģiju. Detalizētāks skaidrojums – **6. publikācijā** [15].

Mikroģeometrijas ietekme uz berzes koeficientu slīdot pa ledu

Eksperimentālie pētījumi ir pierādījuši, ka makroģeometrijai ir nozīmīgāka loma berzes procesā, kas liecina, ka šī ģeometrijas komponentes optimizācijai ir jāpievērš galvenā uzmanība. Tomēr mikroģeometrijas komponentes ignorēšana makroģeometrijas optimizācijas procesā var izraisīt ievērojamu berzes palielināšanos. Šī problēma ir detalizēti skaidrota **7. publikācijā**, šajā kopsavilkuma apakšnodaļā aprakstītas pētījuma galvenās atziņas.

Pētījuma gaitā tika samazināts parauga virsmas laukums ar ledu, tā virsmā iefrēzējot paralēlas gropes. Frēzēšanas procesa laikā uz gropju malām veidojās materiāla izciļņi, kas redzami 17. attēla augšējā kreisajā stūrī. Materiāla izciļņu augstums variēja no 8 μm līdz 20 μm . Pēc gropju izfrēzēšanas šo paraugu triboloģiskās īpašības tika pārbaudītas ar slīpās plaknes tribometru, un to triboloģiskās īpašības salīdzinātas ar pulētu virsmu bez gropēm. Pulētajam paraugam bez gropēm ir lielāks kontakta laukums ar ledu. No iepriekšējās nodaļas aplūkoto rezultātiem izriet, ka virsmai ar mazāku kontakta laukumu vajadzētu slīdēt ātrāk, taču eksperimentālie rezultāti parādīja, ka frēzētajām virsmām slīdēšanas ātrums bija par aptuveni 8 % mazāks nekā pulētajai atskaites virsmai (17. att. apakšā pa kreisi). Šie rezultāti pierādīja, ka makroģeometrijas optimizācija, neņemot vērā mikroģeometriju, nenodrošinās vēlamās virsmas triboloģiskās īpašības. Tieši otrādi, plānotais efekts var būt pretējs gaidītajam.



17. att. Eksperimentālā parauga profila piemērs tieši pēc gropju frēzēšanas ir attēlots attēla augšējā kreisajā pusē, profils no tās pašas virsmas vietas pēc papildu pulēšanas – augšējā labajā pusē. Ja asie izciļņi uz gropju malām nav noņemti, parauga slīdēšanas ātrums ir lēnāks nekā pulētajai atskaites virsmai (pelēkā zona grafikā); kad asie izciļņi ir nopolēti, paraugs slīdēt ātrāk nekā atskaites virsma [5].

Pēc sākotnējiem eksperimentiem paraugiem ar gropēm tika veikta papildu pulēšana. Pulēšanas procesā tika noņemti asie izciļņi no gropju malām. Pulēšanas rezultātā gropju platums palielinājās no aptuveni 0,175 mm līdz 0,190 mm, un gropju malas tika noapaļotas, kā tas redzams 17. attēla augšējā labajā stūrī.

Pēc tam šie paraugi vēlreiz tika testēti uz slīpās plaknes tribometra. Pēc tam, kad asie mikroģeometrijas izciļņi tika nopolēti, paraugu slīdēšanas ātrums kļuva par aptuveni 4 % lielāks nekā pulētajai atskaites virsmai. Pētījumu rezultāti parāda, kā vienkārša mikroģeometrijas negludumu nopolēšana var izmainīt virsmas slīdēšanas īpašības par 12 %. Detalizētāka diskusija par šo jautājumu – **7. publikācijā** [5].

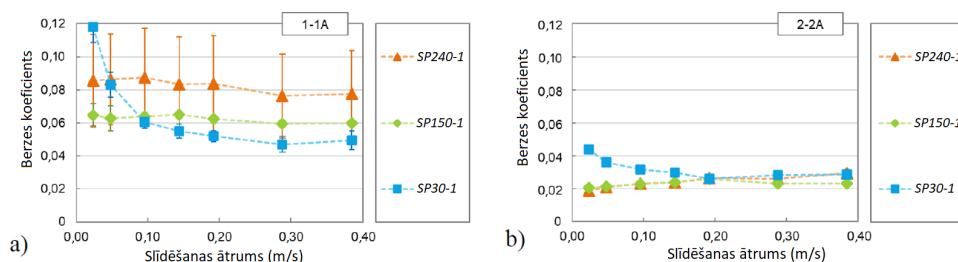
Slīdoša objekta virsmas temperatūras ietekme uz berzes koeficientu ar ledu

Jau iepriekš ir bijis zināms, ka slīdoša objekta temperatūra būtiski ietekmē slīdamību pa ledu. Ir zināms, ka ziemas sporta veidu sportisti pirms sacensībām mēdz sildīt savu ekipējumu, lai veicinātu ledus virsmas kausēšanu, kas vairumā gadījumu dod labākus rezultātus.

Temperatūras būtiskās ietekmes dēļ daudzos sporta veidos inventāra iepriekšēja sildīšana mūsdienās ir aizliegta. Piemēram, bobsleja, skeletoņa un kamanīņu sporta sacensībās pirms starta tiek kontrolēta kamanu slieču temperatūra, un tā nedrīkst pārsniegt atskaites slieces vērtību.

Neskatoties uz iepriekš zināmo informāciju, līdz šim nebija zināms, kā tieši slīdoša objekta ģeometrijas izmaiņas dažādās temperatūrās ietekmē berzes īpašības. Nebija skaidrs, vai, lai uzlabotu slīdēšanas īpašības, būtu jāpalielina vai jāsamazina saskares laukums ar ledu atkarībā no apkārtējās vides temperatūras, mitruma, ledus temperatūras un kontaktspiediena starp slīdošo virsmu un ledu. Lai to noskaidrotu, tika veikti eksperimenti dažādās temperatūrās, izmantojot paraugus ar atšķirīgiem kontakta laukumiem. Ledus temperatūra ($-9\text{ }^{\circ}\text{C}$) tika saglabāta nemainīga, bet slīdošā parauga temperatūra vispirms tika samazināta līdz $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, savukārt otrajā testu sērijā parauga temperatūra tika paaugstināta līdz $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vairāk informācijas par eksperimentu uztādījumiem – **3., 4. un 6. publikācija** [4], [6], [15].

18. attēlā redzamas berzes koeficienta vērtību atšķirības veiktajos eksperimentos.



18. att. Berzes koeficienta mērījumi. a) Testu uztādījumam 1-1A, kur parauga temperatūra bija $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, berzes koeficients samazinājās, palielinoties slīdēšanas ātrumam, un berze bija lielāka paraugiem ar lielāku saskares laukumu ar ledu. Tika novērots, ka virsmas kontakta laukums būtiski ietekmē berzes koeficienta vērtību. b) Testu uztādījumam 2-2A, kur parauga temperatūra bija $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, berzes koeficienta vērtība ievērojami samazinājās, salīdzinot ar testu 1-1A, kā loģiski prognozēts, savukārt virsmas kontakta laukuma ietekme vairs nav tik izteikta. Turklāt saskares virsmas laukumam ir apgriezta ietekme uz berzes koeficientu, kā tas bija eksperimentos 1-1A, t. i., šajā gadījumā berzes koeficients ir lielāks virsmām ar mazāku kontakta laukumu [4].

Iegūtie rezultāti uzrādīja, ka virsmas kontakta laukuma ar ledu izmaiņām pie dažādām virsmas temperatūrām var būt diametrāli pretēja ietekme uz berzes koeficientu. No tā izriet, ka virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekmi uz berzes koeficientu pa ledu slīdošām virsmām ir jāanalizē, ņemot vērā parauga virsmas temperatūru, jo šie parametri ir saistīti un to mijiedarbība noteiks, kāds būs reālais kontakta laukums starp slīdošo virsmu un ledu. Nākotnē ir plānota padziļināta izpēte šajā virzienā, izmantojot augstas precizitātes termisko kameru, lai noskaidrotu precīzāku likumsakarību starp slīdošo virsmu ģeometriju un temperatūras ietekmi uz berzes koeficienta vērtību, slīdot pa ledu.

SECINĀJUMI UN NĀKOTNES REKOMENDĀCIJAS

Promocijas darba mērķis bija izstrādāt jaunu metodoloģiju slīdoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumiem. Zinātniskās literatūras apskats atklāja, ka ledus triboloģijas pētījumos nekad nav vienlaikus aplūkota reāla slīdoša objekta virsmas makroģeometrija (forma) un mikroģeometrija (viļņainība un raupjums). Saskaņā ar iepriekš zināmajām virsmas mērījumu metodoloģijām, kurās tika ņemta vērā tikai mikroģeometrija, eksperimentālo paraugu virsmas laukuma mērījumi ietvēra mazāk nekā 2 % no visas slīdošā objekta virsmas. Turklāt slīdošā objekta virsmas makroģeometrija tika ņemta vērā tikai teorētiskos pētījumos, kuros virsmas mikroģeometrija tiek uzskatīta par ideāli gludu. Rezultātā nav iespējams noteikt slīdoša objekta virsmas kontaktaukumu ar ledu. Detalizētāks skaidrojums – **6. publikācijā**.

Promocijas darba mērķis tika sasniegts.

Galvenie secinājumi

1. Izstrādāta jauna slīdošu objektu virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija. Jaunā metodoloģija ietver slīdoša objekta virsmas formas, viļņainības un raupjuma komponentu mērījumus, ko tālāk izmanto slīdoša objekta virsmas un ledus saskares laukuma noteikšanai. Pierādīts, ka slīdoša objekta saskares laukumam ar ledu un berzes koeficientam ir cieša korelācija (dispersijas variācija no 0,9 līdz 1). Detalizētāki pierādījumi – **5., 6. un 7. publikācijā**.
2. Jaunizstrādātā slīdošu objektu virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumu metodoloģija ļauj salīdzināt triboloģiskās īpašības pa ledu virsmām, kas izgatavotas ar dažādām ražošanas metodēm, tostarp skrāpētām, apstrādātām ar smilšu strūklu, teksturētām ar frēzi vai lāzeri, ķīmiski kodinātām. Izmantojot iepriekš zināmās metodoloģijas, triboloģiskos rādītājus varēja salīdzināt tikai paraugiem, kas izgatavoti ar vienu un to pašu ražošanas metodi. Detalizētāki pierādījumi – **5. publikācijā**.
3. Pierādīts, ka, lai nodrošinātu konkrētu berzes koeficientu uz ledus, jāņem vērā slīdoša objekta virsmas makroģeometrija un mikroģeometrija. Novērots, ka slīdoša objekta virsmas makroģeometrija (forma) ietekmē saskares laukumu starp slīdošo objektu un ledu. Pētījums, kas aplūkots **5. publikācijā**, pierādīja, ka, palielinot saskares laukumu starp slīdošo objektu un ledu par 60 %, objekta vidējais slīdēšanas ātrums samazinās par 7 %. Tomēr saskares laukumu būtiski ietekmē arī mikroģeometrija (raupjuma izciļņi). Pētījumā, kas aplūkots **7. publikācijā**, pierādīts, ka raupjuma negludumu nopulēšana no slīdoša objekta virsmas var izmainīt tā vidējo slīdēšanas ātrumu par 12 %.
4. Secināts, ka, nosakot slīdošu objektu virsmu makroģeometrijas un mikroģeometrijas ietekmi uz berzes koeficientu uz ledus, jāņem vērā slīdošā objekta virsmas temperatūra. Eksperimenti, kas izklāstīti **3. un 4. publikācijā**, kad kontaktpiediens starp slīdošā objekta virsmu un ledu bija lielāks par 1 MPa, pierādīja, ka slīdošā objekta virsmai, kuras temperatūra ir par 9 °C zemāka par ledus temperatūru, saskares laukuma samazinājums par 30 % berzes koeficientu samazina divas reizes. Tomēr, ja slīdošā objekta virsmas temperatūra ir par 14 °C siltāka par ledus temperatūru, tāds pats saskares laukuma samazinājums par 30 % izraisīja divas reizes lielāku berzes koeficientu, apgriežot virsmas

tekstūras ietekmes tendenci diametrāli pretēji. Detalizētāki pierādījumi – **3. un 4. publikācijā.**

Ņemot vērā šajā promocijas darbā iegūtos rezultātus, turpmākajos pētījumos par virsmas tekstūras ietekmi uz berzes koeficientu uz ledus būtu jāievieš jaunizveidotā slīdoša objekta virsmu mērīšanas metodoloģija, kas paredz slīdoša objekta virsmas makroģeometrijas un mikroģeometrijas mērījumus. Papildus tam būtu nepieciešami berzes eksperimentu termisko procesu videoieraksti. Slīdoša objekta virsmas ģeometrijas un termisko novērojumu kombinācija ietvertu nepieciešamo informāciju, kas ļauj detalizētāk izskaidrot slīdošas virsmas mijiedarbību ar ledu. Izstrādātā virsmu mērīšanas metodoloģija būtu jāpārbauda ar dažāda izmēra un formas paraugiem klimatiskajos apstākļos, kas nav iekļauti šajā promocijas darbā, lai vēl plašāk aprobētu metodoloģijas lietojamību.

ATSAUCES

- [1] I. Olovsson, "Snow, ice and other wonders of water: A tribute to the hydrogen bond," *Snow, Ice And Other Wonders Of Water: A Tribute To The Hydrogen Bond*, pp. 1–86, Dec. 2015, doi: 10.1142/9928/SUPPL_FILE/9928_CHAP01.PDF.
- [2] "Physics and Chemistry of Ice," *Physics and Chemistry of Ice*, 2007, doi: 10.1039/9781847557773.
- [3] F. Du, P. Ke, and P. Hong, "How ploughing and frictional melting regulate ice-skating friction," *Friction* 2022, pp. 1–23, Mar. 2023, doi: 10.1007/S40544-022-0711-9.
- [4] I. Velkavrh, J. Voyer, T. Wright, J. Lungevičs, E. Jansons, and I. Boiko, "Variations of ice friction regimes in relation to surface topography and applied operating parameters," *Proceedings of the International Conference of DAAAM Baltic*, vol. 2021-April, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1140/1/012033.
- [5] K. A. Gross, J. Lungevics, E. Jansons, I. Jerane, M. J. Wood, and A. M. Kietzig, "Surface hierarchy: Macroscopic and microscopic design elements for improved sliding on ice," *Lubricants*, vol. 9, no. 10, p. 103, Oct. 2021, doi: 10.3390/LUBRICANTS9100103/S1.
- [6] I. Velkavrh, J. Lungevičs, E. Jansons, S. Klien, J. Voyer, and F. Ausserer, "The Influence of Isotropic Surface Roughness of Steel Sliders on Ice Friction Under Different Testing Conditions," *Lubricants* 2019, Vol. 7, Page 106, vol. 7, no. 12, p. 106, Nov. 2019, doi: 10.3390/LUBRICANTS7120106.
- [7] E. Jansons, J. Lungevics, I. Jerane, and K. A. Gross, "A smaller bearing ratio, as a surface texture measure, promotes faster sliding on ice," *J Tribol*, vol. 143, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.1115/1.4049704/1095466.
- [8] F. Ripamonti *et al.*, "Dynamic behaviour of miniature laser textured skis," <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1512730>, vol. 36, no. 12, pp. 1250–1260, Dec. 2018, doi: 10.1080/02670844.2018.1512730.
- [9] R. Böttcher, M. Seidelmann, and M. Scherge, "Sliding of UHMWPE on ice: Experiment vs. modeling," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 141, pp. 171–180, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.COLDREGIONS.2017.06.010.
- [10] M. Scherge, R. Böttcher, A. Spagni, and D. Marchetto, "High-Speed Measurements of Steel–Ice Friction: Experiment vs. Calculation," *Lubricants* 2018, Vol. 6, Page 26, vol. 6, no. 1, p. 26, Mar. 2018, doi: 10.3390/LUBRICANTS6010026.
- [11] B. Weber *et al.*, "Molecular Insight into the Slipperiness of Ice," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 9, pp. 2838–2842, 2018, doi: 10.1021/acs.jpclett.8b01188.
- [12] C. A. Brown, "Surface Metrology Principles for Snow and Ice Friction Studies," *Front Mech Eng*, vol. 7, p. 98, Dec. 2021, doi: 10.3389/FMECH.2021.753906/BIBTEX.
- [13] J. von Schleinitz, L. Wörle, M. Graf, and A. Schröder, "Modeling ice friction for vehicle dynamics of a bobsled with application in driver evaluation and driving simulation," *Tribol Int*, vol. 165, p. 107344, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2021.107344.
- [14] N. S. Vracas, D. Short, J. Banks, D. J. Taunton, and S. R. Turnock, "A trajectory simulation model to analyse the factors influencing the descent of a Skeleton athlete," *Proc Inst Mech Eng P J Sport Eng Technol*, p. 175433712211508, Jan. 2023, doi: 10.1177/17543371221150820.
- [15] J. Lungevics, E. Jansons, I. Boiko, I. Velkavrh, J. Voyer, and T. Wright, "A Holistic Approach Towards Surface Topography Analyses for Ice Tribology Applications," *Front Mech Eng*, vol. 7, p. 56, Jun. 2021, doi: 10.3389/FMECH.2021.691485/BIBTEX.
- [16] R. W. Liefferink, F.-C. Hsia, B. Weber, and D. Bonn, "Friction on Ice: How Temperature, Pressure, and Speed Control the Slipperiness of Ice," *Phys Rev X*, vol. 11, no. 1, p. 011025, Feb. 2021, doi: 10.1103/physrevx.11.011025.

- [17] I. Stafiecka, L. Pluduma, J. Lungevics, and K. A. Gross, *Effect of surface modification on the wettability and static coefficient-of-friction between steel and ice*, vol. 800 KEM. 2019. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.800.293.
- [18] S. Kim, H. Kang, D. Kim, Y. Z. Lee, and J. Lee, "Measurement of sliding friction coefficient of micro-line patterned surfaces on ice," *Appl Phys Lett*, vol. 111, no. 21, p. 211601, Nov. 2017, doi: 10.1063/1.4995493.
- [19] E. Jansons, J. Lungevics, K. Stiprais, L. Pluduma, and K. A. Gross, "Measurement of sliding velocity on ice, as a function of temperature, runner load and roughness, in a skeleton push-start facility," *Cold Reg Sci Technol*, vol. 151, 2018, doi: 10.1016/j.coldregions.2018.03.015.
- [20] S. Bengaluru Subramanyam, V. Kondrashov, J. Ruhe, and K. K. Varanasi, "Low Ice Adhesion on Nano-Textured Superhydrophobic Surfaces under Supersaturated Conditions," *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, doi: 10.1021/acsami.6b01133.
- [21] N. Maeno, M. Arakawa, A. Yasutome, N. Mizukami, and S. Kanazawa, "Ice-ice friction measurements, and water lubrication and adhesion-shear mechanisms," *Can J Phys*, vol. 81, no. 1–2, pp. 241–249, Jan. 2003, doi: 10.1139/p03-023.
- [22] M. Scherge, R. Bottcher, M. Richter, and U. Gurgel, "High-Speed Ice Friction Experiments under Lab Conditions: On the Influence of Speed and Normal Force," *ISRN Tribology*, vol. 2013, pp. 1–6, Dec. 2013, doi: 10.5402/2013/703202.
- [23] F. Braghin, E. Belloni, S. Melzi, E. Sabbioni, and F. Cheli, "Friction Between Runner and Ice," in *The Engineering Approach to Winter Sports*, New York, NY: Springer New York, 2016, pp. 33–51. doi: 10.1007/978-1-4939-3020-3_3.
- [24] S. Rohm *et al.*, "Friction Between Steel and Snow in Dependence of the Steel Roughness," *Tribol Lett*, vol. 59, no. 1, p. 27, Jul. 2015, doi: 10.1007/s11249-015-0554-x.
- [25] J. J. de Koning, G. de Groot, and G. J. van Ingen Schenau, "Ice friction during speed skating.," *J Biomech*, vol. 25, no. 6, pp. 565–71, Jun. 1992.
- [26] E. Jansons, J. Lungevics, and K. A. Gross, "Surface roughness measure that best correlates to ease of sliding," in *Engineering for Rural Development*, 2016.
- [27] G. Amit and Gilead, "Why is ice slippery?," *New Sci (1956)*, vol. 227, no. 3037, p. 38, Sep. 2015, doi: 10.1016/S0262-4079(15)31136-2.
- [28] A. Mills and Allan, "The coefficient of friction, particularly of ice," *Phys Educ*, vol. 43, no. 4, pp. 392–395, Jul. 2008, doi: 10.1088/0031-9120/43/4/006.
- [29] A. M. Kietzig, S. G. Hatzikiriakos, and P. Englezos, "Ice friction: The effects of surface roughness, structure, and hydrophobicity," *J Appl Phys*, vol. 106, no. 2, p. 024303, Jul. 2009, doi: 10.1063/1.3173346.
- [30] A. M. Kietzig, S. G. Hatzikiriakos, and P. Englezos, "Ice friction: The effect of thermal conductivity," *Journal of Glaciology*, vol. 56, no. 197, pp. 473–479, Aug. 2010, doi: 10.3189/002214310792447752.
- [31] A.-M. Kietziga, M. N. Mirvakilia, S. Kamalb, P. Englezosa, and S. G. Hatzikiriakosa, "Nanopatterned Metallic Surfaces: Their Wettability and Impact on Ice Friction," *J Adhes Sci Technol*, vol. 25, no. 12, pp. 1293–1303, Jan. 2011, doi: 10.1163/016942411X555872.
- [32] A. M. Kietzig, S. G. Hatzikiriakos, and P. Englezos, "Physics of ice friction," *J Appl Phys*, vol. 107, no. 8, p. 081101, Apr. 2010, doi: 10.1063/1.3340792.
- [33] A. Spagni, A. Berardo, D. Marchetto, E. Gualtieri, N. M. Pugno, and S. Valeri, "Friction of rough surfaces on ice: Experiments and modeling," *Wear*, vol. 368–369, pp. 258–266, 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.10.001.

- [34] R. S. Pritchard, G. S. Knoke, and D. C. “Skip” Echert, “Sliding friction of sea ice blocks,” *Cold Reg Sci Technol*, vol. 76–77, pp. 8–16, 2012, doi: 10.1016/j.coldregions.2011.04.001.
- [35] S. Ducret, H. Zahouani, A. Midol, P. Lanteri, and T. G. Mathia, “Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice,” in *Wear*, 2005, pp. 26–31. doi: 10.1016/j.wear.2004.09.026.
- [36] L. Baurle, T. U. Kaempfer, D. Szabo, and N. D. Spencer, “Sliding friction of polyethylene on snow and ice: Contact area and modeling,” *Cold Reg Sci Technol*, vol. 47, no. 3, pp. 276–289, 2007, doi: 10.1016/j.coldregions.2006.10.005.
- [37] S. Sukhorukov and A. Marchenko, “Geometrical stick-slip between ice and steel,” *Cold Reg Sci Technol*, vol. 100, pp. 8–19, 2014, doi: 10.1016/j.coldregions.2013.12.007.
- [38] B. Weber *et al.*, “Molecular Insight into the Slipperiness of Ice,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 2838–2842, Jun. 2018, doi: 10.1021/ACS.JPCLETT.8B01188/SUPPL_FILE/JZ8B01188_SI_002.WMV.
- [39] J. Lungevics, E. Jansons, and K. A. Gross, *Skeleton runner roughness and surface contact area influence on sliding ability: Field experiments*, vol. 800 KEM. 2019. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.800.303.
- [40] E. P. Lozowski and K. Szilder, “Derivation and new analysis of a hydrodynamic model of speed skate ice friction,” *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 104–111, 2013.
- [41] E. Lozowski, K. Szilder, and L. Poirier, “A bobsleigh ice friction model,” *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 52–60, 2014, [Online]. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84883697973&partnerID=40&md5=99c2f74e6a8d18d646d46b27f63c4c4c>.
- [42] E. Lozowski, K. Szilder, and S. Maw, “A model of ice friction for a speed skate blade,” *Sports Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 239–253, Dec. 2013, doi: 10.1007/s12283-013-0141-z.
- [43] L. Poirier, E. P. Lozowski, S. Maw, D. J. Stefanyshyn, and R. I. Thompson, “Experimental analysis of ice friction in the sport of bobsleigh,” *Sports Engineering*, vol. 14, no. 2–4, pp. 67–72, Dec. 2011, doi: 10.1007/s12283-011-0077-0.
- [44] E. J. Y. Ling, V. Uong, J. S. Renault-Crispo, A. M. Kietzig, and P. Servio, “Reducing Ice Adhesion on Nonsmooth Metallic Surfaces: Wettability and Topography Effects,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 13, pp. 8789–8800, Apr. 2016, doi: 10.1021/acsami.6b00187.
- [45] K. A. Gross, J. Lungevics, J. Zavickis, and L. Pluduma, “A comparison of quality control methods for scratch detection on polished metal surfaces,” *Measurement*, vol. 117, pp. 397–402, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.12.022.
- [46] L. Poirier, E. P. Lozowski, and R. I. Thompson, “Ice hardness in winter sports,” *Cold Reg Sci Technol*, vol. 67, no. 3, pp. 129–134, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.coldregions.2011.02.005.
- [47] E. Lozowski, K. Szilder, and S. Maw, “A model of ice friction for a speed skate blade,” *Sports Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 239–253, Dec. 2013, doi: 10.1007/s12283-013-0141-z.
- [48] S. C. Colbeck, L. Najarian, and H. B. Smith, “Sliding temperatures of ice skates,” <http://jobs.aapt.org/>, 1998, doi: 10.1119/1.18576.
- [49] D. D. Higgins, B. A. Marmo, C. E. Jeffree, V. Koutsos, and J. R. Blackford, “Morphology of ice wear from rubber-ice friction tests and its dependence on temperature and sliding velocity,” *Wear*, vol. 265, no. 5–6, pp. 634–644, 2008, doi: 10.1016/j.wear.2007.12.015.

- [50] J. Lungevics, E. Jansons, and K. A. Gross, “An Ice Track Equipped with Optical Sensors for Determining the Influence of Experimental Conditions on the Sliding Velocity,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 55, no. 1, 2018, doi: 10.2478/lpts-2018-0007.
- [51] Uddeholm, “Uddeholm Ramax ® HH”.



Jānis Lungevičs dzimis 1990. gadā Madonā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu un inženiera kvalifikāciju mehatronikā (2014) un akadēmisko maģistra grādu ražošanas tehnoloģijā (2016). Kopš 2014. gada strādā RTU, ieņemot Mehānikas un mašīnbūves institūta zinātniskā asistenta amatu, patlaban ir pētnieks un lektors mašīnbūves un mehānikas (mēraparāti un metroloģija) nozarē. Piedalījies vairākos nacionālajos un Eiropas zinātniskajos projektos, kas saistīti ar virsmu triboloģiskajām īpašībām. Vada ģeometriskās metroloģijas laboratoriju un piedalās vairāku studiju kursu vadīšanā un satura pilnveidošanā. Aktīvi darbojas RTU un ražošanas industrijas sadarbības veicināšanā.