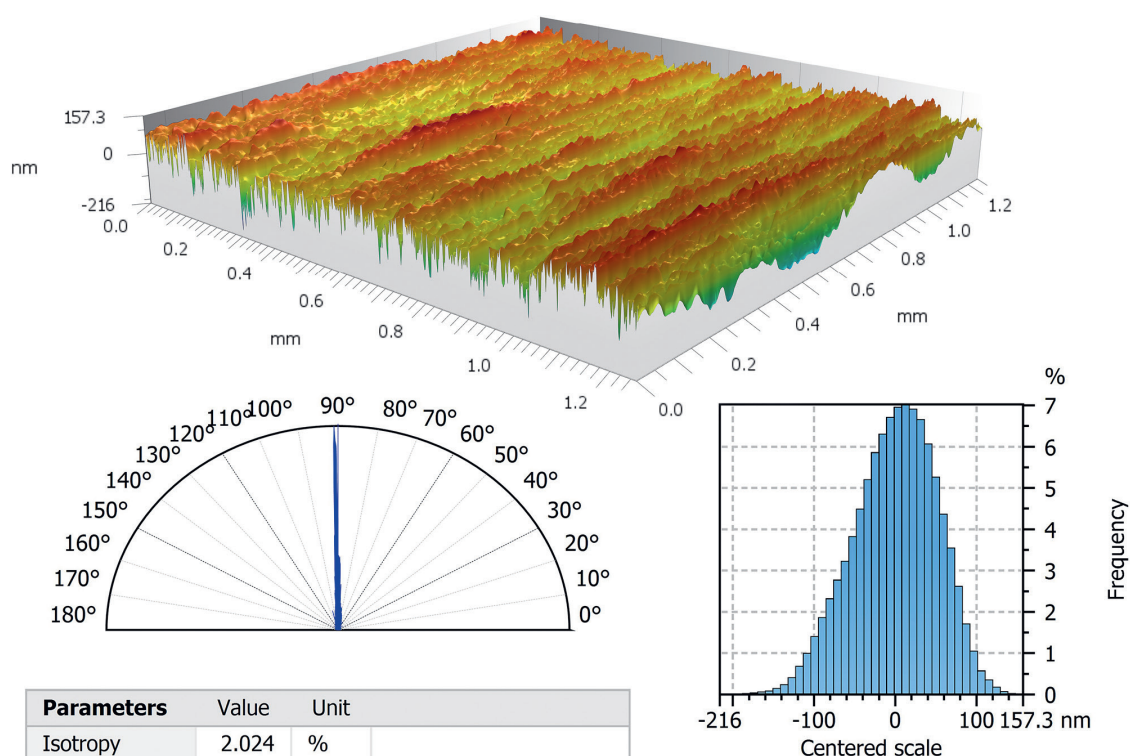


Natālija Bulaha

VIRSMAS RAUPJUMA 2D UN 3D PARAMETRI UN TO PIELIETOJUMS DETAĻU KONTAKTA UN NODILUMIZTURĪBAS PĒTĪŠANĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Mašīnbūves un biomedicīnas inženierijas institūts

Natālija Bulaha

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika” doktorante

VIRSMAS RAUPJUMA 2D UN 3D PARAMETRI UN TO PIELIETOJUMS DETAĻU KONTAKTA UN NODILUMIZTURĪBAS PĒTĪŠANĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr. sc. ing.*
OSKARS LINIŅŠ

docente *Dr. sc. ing.*
ANITA AVIŠĀNE

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

JĀNIS RUDZĪTIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2026

Bulaha, N. Virsmas raupjuma 2D un 3D parametri un to pielietojums detaļu kontakta un nodilumizturības pētīšanā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 50 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-04” 2025. gada 16. oktobra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.4/3.

Promocijas darbs daļēji izstrādāts projektā “Inovācijas, metodikas un rekomendācijas sporta nozares attīstībai un pārvaldībai Latvijā VPP-IZM-Sports-2023/1-0001”. Autore izsaka pateicību uzņēmumam “*Mitutoyo Poland*” par piekļuves nodrošināšanu “*Mitutoyo Formtracer avant S-3000*” mērišanas iekārtai un *MCubeMap* Ultimate 10 programmatūrai, kas bija nepieciešamas šī pētījuma veikšanai.



Vāka attēla autore Natālija Bulaha.

<https://doi.org/10.7250/9789934372568>

ISBN 978-9934-37-256-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 4. februārī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas iela 6B, 417.auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.* Ernests Jansons,
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Dr. eng.* Daniel Grochala,
Rietumpomerānijas Tehnoloģiju universitāte, Polija

Profesors *Dr. Juozas Padguskas*,
Vītauta Dižā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi 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.

Natālija Bulaha (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 65 attēli, 22 tabulas, viens pielikums, kopā 114 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 81 nosaukums.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
IZMANTOTO APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	9
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	11
1.1. Virsmas raupjuma parametru lietojums berzes virsmu nodiluma aprēķinos.....	11
1.2. Virsmas 2D un 3D raupjuma parametru aprēķinu iespējas	13
1.3. Virsmas raupjuma ordinātu sadalījuma novērtējums	16
1.4. Virsmas datorapstrādes operāciju ietekme uz raupjuma parametru noteikšanas precizitāti.....	17
1.5. Secinājumi	18
2. VIRSMAS RAUPJUMA EKSPERIMENTĀLĀ NOTEIKŠANA	19
2.1. 3D un 2D raupjuma mērīšanas eksperiments	19
2.2. Tekstūras līmeņošanas operācijas korekta izvēle	19
2.3. Virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējā izvietojuma noteikšana.....	21
2.4. Secinājumi	22
3. VIRSMAS 3D un 2D RAUPJUMA PARAMETRU APRĒĶINI.....	23
3.1. Virsmas neregulārā raupjuma modeļa atbilstības pārbaude Normālam sadalījuma likumam	23
3.2. Virsmas vidējais aritmētiskais augstums Sa	25
3.3. Virsmas tekstūras indekss Str	27
3.4. Profila elementu vidējais platums Rsm	28
3.5. Materiāla tilpums Vm	30
3.6. Secinājumi	32
4. RAUPJUMA PARAMETRU NOTEIKŠANAS PRECIZITĀTE	33
4.1. Vidējais aritmētiskais augstums Sa	33
4.2. Profila elementu vidējais platums Rsm	34
4.3. Materiāla tilpums Vm	35
4.4. Secinājumi	36
4.5. Rekomendācijas raupjuma parametru noteikšanai.....	36
5. VIRSMAS DILŠANAS INTENSITĀTES UN NODILUMA NOTEIKŠANA.....	37
5.1. Nodiluma aprēķins elastīgā kontakta gadījumā	38
5.2. Nodiluma aprēķins plastiskā kontakta gadījumā	39
5.3. Analītisko aprēķina rezultātu un berzes eksperimentā iegūto datu salīdzinājums.....	41
5.4. Secinājumi	43
5.5. Nodiluma noteikšanas metodika	43
PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	45
REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI.....	46
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI	47

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Berzes pāru virsmu nodilumizturības nodrošināšanas jautājums ir bijis aktuāls visos laikos. Spēja kontrolēt un prognozēt nodilumu ļauj optimizēt vairākus procesus: 1) detaļas izgatavošanu, t. i., izvēlēties piemērotus materiālus un apstrādes režīmus, lai izejā iegūtu produktu ar nepieciešamajām mehāniskām īpašībām un vajadzīgo kvalitāti; 2) eļļošanas procedūras; 3) darba parametrus – slodzi, ātrumu, temperatūru, lai pagarinātu normālo ekspluatācijas periodu. Svarīga ir arī tehniskās apkopes plānošana, ar kuras palīdzību var samazināt dīkstāves laiku un maksimāli palielināt komponentu kalpošanas laiku.

Kā zināms, detaļu dilšanas intensitāti ietekmē vairāki faktori: materiāls un tā īpašības; vides apstākļi; eļļošana; slodze; spiediens; arī virsmas kvalitāte. Īpaša nozīme šajā jautājumā ir detaļas virsmas kvalitātei, jo apstrādes veids un raupjuma parametri lielā mērā nosaka virsmas ekspluatācijas īpašības un kalpošanas laiku. Mašīnu aparātu berzes pāros pārsvarā tiek izmantotas ar abrazīviem instrumentiem apstrādātas virsmas, kas nodrošina nepieciešamo virsmas gludumu un precizitāti. Pēc tādas apstrādes virsmām ir raksturīgs neregulārs mikroizciļņu izvietojums un izteikts apstrādes pēdu virziens. Savukārt tādas tekstūras īpatnības apgrūtina raupjuma parametru precīzu noteikšanu gan analītiskajos aprēķinos, gan datorapstrādes programmās. Pirmkārt, tas ir saistīts ar ordinātu sadalījuma novirzi no normālā sadalījuma likuma, kā arī ar virsmas raupjuma profila īpatnībām paralēli apstrādes pēdām, kas neļauj precīzi noteikt raupjuma soli berzes virzienā. Turklāt liela nozīme ir virsmas tekstūras datorapstrādes operācijām, kas lielā mērā ietekmē virsmas ģeometriju un raupjuma parametru vērtības.

Esošie nodiluma aprēķinu modeļi ietver 2D raupjuma parametrus, kuru lietošanas pareizība un noteikšanas precizitāte nav pamatota, kas samazina iegūto rezultātu ticamību. Lai korekti un precīzi noteiktu un prognozētu berzes pāru virsmu nodiluma lielumu, ir nepieciešams izveidot uzlabotu nodiluma noteikšanas modeli ar pareizi noteiktiem raupjuma parametriem. Šim nolūkam tika noformulēti darba mērķi un uzdevumi.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis

Izstrādāt precizētu nodiluma un dilšanas intensitātes aprēķina modeli slīdes berzes pārim, kas balstās materiāla noguruma teorijā, un nodrošināt tajā iekļauto raupjuma parametru noteikšanas precizitāti.

Promocijas darba uzdevumi

1. Informācijas avotu izpēte un analīze.
2. Virsmas 2D un 3D raupjuma eksperimentālā noteikšana.
3. Līmeņošanas operācijas izvēle virsmas ģeometrijas un vidusplaknes noteikšanai.
4. 3D virsmas ar neregulāru raupjumu matemātiskā modeļa pārbaude.
5. 3D un 2D raupjuma parametru noteikšanas precizitātes pārbaude.
6. Nodiluma un dilšanas intensitātes aprēķina modeļa izstrāde.

Pētījuma metodika

1. Virsmas 2D un 3D raupjuma eksperimentālā noteikšana īstenojās pēc kontaktmetodes (mērtausts – pētāmā virsma), izmantojot profilometru *Mitutoyo Formtracer avant S-3000*.
2. Eksperimentālo rezultātu apstrāde tika veikta datorapstrādes programmā *McubeMapUltimate 10*.
3. Virsmas tekstūras līmeņošana īstenojās pēc mazāko kvadrātu metodes, minimālās zonas metodes, vidējā atņemšanas.
4. Virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas atbilstība normālam sadalījuma likumam tika pārbaudīta pēc normālās gadījuma funkcijas 3. un 4. momentam.
5. Virsmu ar neregulāru raksturu 3D raupjuma parametru matemātiskai noteikšanai tika lietota gadījuma funkcijas / lauka teorija.
6. Virsmas raupjuma soļa noteikšanai paralēli apstrādes pēdām tika lietota *Robust* Gausa filtrācija.
7. Detaļu berzes pāra nodiluma un dilšanas intensitātes aprēķini tika balstīti materiāla noguruma teorijā.
8. Aprēķinu daļai, rezultātu salīdzināšanai un grafiku konstruēšanai tika izmantota programma *Excel*.

Darba zinātniskā novitāte

1. Jauns nodiluma un dilšanas intensitātes aprēķina modelis, kas ietver kontaktvirsmas 3D un 2D raupjuma parametrus un materiāla noguruma raksturlielumus elastīgā un plastiskā kontakta gadījumā.
2. Jauna pieeja raupjuma parametru precizitātes nodrošināšanai.
 - 2.1. Līmeņošanas operācijas un korekcijas koeficienta lietošana raupjuma soļa RSm_2 noteikšanai pie standartizētā trases garuma.
 - 2.2. Raupjuma ordinātu sadalījuma funkcijas ekscesa vērtības iekļaušana vidējā aritmētiskā augstuma aprēķinos.
 - 2.3. Virsmas raupjuma anizotropijas izvērtēšana, izmantojot standarta *ISO 25178-2* 3D raupjuma parametru Str – virsmas tekstūras indeksu.
 - 2.4. Deformētā materiāla apjoma noteikšana, izmantojot standarta *ISO 25178-2* 3D raupjuma parametru Vm – materiāla tilpumu.

Praktiskais lietojums

1. Jaunu nodiluma un dilšanas intensitātes aprēķina modeli var pielāgot *FEM* videi, lai noteiktu un prognozētu berzes pāra virsmu nodilumu konkrētam ciklu skaitam.
2. Raupjuma parametru aprēķinu formulas var izmantot raupjuma parametru kontrolei *FEM* vidē virsmas dilšanas simulācijas periodā.
3. Iegūtās sakarības var izmantot reālu berzes mezglu pētījumos.

Promocijas darba aprobācija

Starptautiskajās konferencēs

1. 24. starptautiskā konference “*Engineering for rural development 2025*”.
Ziņojums “*Influence of various factors on determination accuracy of surface profile elements for engineering calculations*”.
2. 16. starptautiskā konference “*Engineering for rural development 2017*”.
Ziņojums “*Analysis of Model and Anisotropy of Surface with Irregular Roughness*”.
3. RTU 58. starptautiskā zinātniskā konference – 2017.
Ziņojums “*Virsmas 3D raupjuma parametru pielietojums inženierjautājumu risināšanai*”.
4. 15. starptautiskā konference “*Engineering for rural development 2016*”.
Ziņojums “*Measurement Principles of 3D Roughness Parameters*”.
5. RTU 57. starptautiskā zinātniskā konference – 2016.
Ziņojums “*Virsmu ar neregulāru raupjumu soļa parametru noteikšanas analīze*”.
6. RTU 56. starptautiskā zinātniskā konference – 2015.
Ziņojums “*Lepētu un honētu virsmu raupjuma struktūras un 3D parametru analīze*”.
7. 14. starptautiskā konference “*Engineering for rural development 2015*”.
Ziņojums “*Surface Texture Parameters for Flat Grinded Surfaces*”.
8. 10. starptautiskā konference “*Environment. Technology. Resources*”.
Ziņojums “*Analysis of Service Properties of Cylindrically Ground Surfaces, Using Standard ISO 25178-2:2012 Surface Texture Parameters*”.
9. RTU 55. starptautiskā zinātniskā konference – 2014.
Ziņojums “*The Measurement of Surface Texture for Nanostructured Coatings*”.
10. 8. starptautiskā konference “*Materials, Environment, Technology, MET-2013*”.
Ziņojums “*Analysis of standardization development of surface roughness parameters*”.

Publikācijas

1. Bulaha, N. Influence of various factors on determination accuracy of surface profile elements for engineering calculations. No: 24th International Scientific Conference “*Engineering for Rural Development*”: Proceedings. Vol.24, 2025, 519.–530. lpp. **(SCOPUS)**.
2. Bulaha, N., Liniņš, O., Avišāne, A. Application of 3D Roughness Parameters for Wear Intensity Calculations. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2021, Vol. 58, No. 5, 27.–37. lpp. **(SCOPUS)**.
3. Bulaha, N., Rudzītis, J. Calculation Possibilities of 3D Parameters for Surfaces with Irregular Roughness. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2018, Vol. 55, No. 4, 70.–79. lpp. **(SCOPUS)**.
4. Bulaha, N. Calculations of surface roughness 3D parameters for surfaces with irregular roughness. No: 17th International Scientific Conference “*Engineering for Rural Development*”: Proceedings. Vol. 17, Latvija, Jelgava, 23.–25. maijs, 2018. Jelgava: 2018, 1437.–1444. lpp. **(SCOPUS)**.

5. Bulaha, N., Rudzītis, J. Analysis of Model and Anisotropy of Surface with Irregular Roughness. No: 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol.16, Latvija, Jelgava, 24.–26. maijs, 2017. Jelgava: Vol. 16, 2017, 1123.–1130. lpp. **(SCOPUS)**.
6. Bulaha, N., Rudzītis, J., Lungevičs, J., Liniņš, O., Krizbergs, J. Research of Surface Roughness Anisotropy. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2017, Vol. 54, No. 2, 46.–54. lpp. **(SCOPUS)**.
7. Rudzītis, J., Bulaha, N., Lungevičs, J., Liniņš, O., Bērziņš, K. Theoretical Analysis of Spacing Parameters of Anisotropic 3D Surface Roughness. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2017, Vol. 54, No. 2, 55.–63. lpp. **(SCOPUS)**.
8. Sprīngis, G., Rudzītis, J., Geriņš, Ē., Bulaha, N. Theoretical Approach of Wear for Slide-Friction Pairs. No: Solid State Phenomena, Polija, Bialystok, 3.–8. jūlijs, 2016. Poland: Trans Tech Publications, 2017, 202.–211. lpp. **(Research Gate)**.
9. Bulaha, N., Lungevičs, J., Rudzītis, J. Measurement Accuracy Problems of the Surface Texture Parameters. No: 12th International Conference “Mechatronic Systems and Materials Intelligent Technical Systems”: Solid State Phenomena. Volume 260, Polija, Bialystok, 3.–8. jūlijs, 2016. Bialystok: Bialystok University of Technology, 2017, 227.–234. lpp. **(SCOPUS)**.
10. Bulaha, N., Rudzītis, J., Lungevičs, J., Čudinovs, V. Measurement Principles of 3D Roughness Parameters., No: 15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol. 15, Latvija, Jelgava, 25.–27. maijs, 2016. Jelgava: 2016, 1059.–1064. lpp. **(SCOPUS)**.
11. Leitāns, A., Bulaha, N., Lungevičs, J. Tribological Properties of Sputter Deposited Carbon-Copper Composite Films. No: *Proceedings of VIII International Scientific Conference BALTTTRIB' 2015*, Lietuva, Kaunas, 26.–27. novembris, 2015. Kaunas: Aleksandras Stulginskis University, 2016, 61.–65. lpp. **(SCOPUS)**.
12. Bulaha, N., Rudzītis, J. Surface Texture Parameters for Flat Grinded Surfaces. No: 14th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol. 14, Latvija, Jelgava, 21.–22. maijs, 2015. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2015, 810.–816. lpp. **(SCOPUS)**.
13. Bulaha, N. Analysis of Service Properties of Cylindrically Ground Surfaces, Using Standard ISO 25178-2:2012 Surface Texture Parameters. No: Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Vol. 1, Latvija, Rēzekne, 18.–20. jūnijs, 2015. Rēzekne: Rēzeknes Augstskola, 2015, 16.–21. lpp. **(SCOPUS)**.

IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

Ssk	–	virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas asimetrija
Sku	–	virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas ekscess
Sq	–	virsmas vidējais kvadrātiskais augstums, μm
Sa	–	virsmas vidējais aritmētiskais augstums, μm
Str	–	virsmas tekstūras indekss
Sz	–	raupjuma maksimālais augstums, μm
$Smr(c)$	–	materiāla atbalsta laukums, mm^2
Vm	–	materiāla tilpums, mm^3
c	–	virsmas līmenis, μm
γ	–	relatīvais deformācijas līmenis
$\Phi()$	–	Laplasa funkcija
Xs	–	raupjuma profila elementa platums, mm
RSm_1	–	profila elementu vidējais platums perpendikulāri apstrādes pēdām, mm
RSm_2	–	profila elementu vidējais platums paralēli apstrādes pēdām, mm
WSm	–	viļņainības profila elementu vidējais platums, mm
Ra	–	profila vidējais aritmētiskais augstums, μm
Rsk	–	profila ordinātu sadalījuma funkcijas asimetrija
Rku	–	profila ordinātu sadalījuma funkcijas ekscess
Rq	–	profila vidējais kvadrātiskais augstums, μm
Rp	–	vidējais pīķu augstums, μm
Rv	–	vidējais ieplaku dziļums, μm
C	–	anizotropijas koeficients
Aa	–	virsmas nominālais laukums, mm^2
$N(0)$	–	krustojumu skaits ar viduslīniju
$n(0)$	–	nuļļu skaits uz garuma vienību, mm^{-1}
k_{pr}	–	korekcijas koeficients
$f_{ACF}(t_x, t_y)$	–	korelācijas funkcija
S_{al}	–	korelācijas funkcijas garums, mm
R	–	korelācijas funkcijas šķēluma rādiuss, mm
s	–	korelācijas funkcijas šķēluma līmenis
$E\{\}$	–	matemātiskā sagaidāmā vērtība
$D\{\}$	–	dispersija
L	–	profila trases garums, mm
l	–	profila bāzes garums, mm
$LSPL$	–	mazāko kvadrātu plaknes līmeņošana
$TLSP$	–	totālo mazāko kvadrātu plaknes līmeņošana
$MZPL$	–	minimālās zonas plaknes līmeņošana
PL	–	polinoms
RMS_{vid}	–	vidējā kvadrātiskā novirze, μm

h_{x_max}	–	X ass profila viduslīnijas maksimālā novirze no vidusplaknes, μm
h_{y_max}	–	Y ass profila viduslīnijas maksimālā novirze no vidusplaknes, μm
n_{Sa}	–	mērīšanas eksperimentu skaitu
t_β	–	tabulēta vērtība, atkarīga no ticamības varbūtības β
ε	–	parametra relatīvā kļūda, %
α	–	korelācijas funkcijas aproksimācijas parametrs
Jh	–	lineārā dilšanas intensitāte
V'	–	deformētā materiāla tilpums, mm^3
h	–	lineāra nodiluma lielums, μm
n	–	ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai
d	–	kontakta garums, mm
KK	–	kontakta veida kritērijs
θ	–	materiāla elastības konstante, MPa^{-1}
θ_{sum}	–	summārā elastīgā kontakta konstante, MPa^{-1}
μ	–	Puasona koeficients
E	–	elastības modulis, MPa
H	–	cietība, MPa;
σ_0, e_0	–	noguruma līknes ekstrapolētās vērtības
t_{el}, t_{plast}	–	noguruma līknes parametri
q_{el}, q_{plast}	–	slodze, MPa
k_{el}, k_{plast}	–	koeficienti, kas ir atkarīgi no virsmas tekstūras indeksa Str
σ_T	–	materiāla tecēšanas robeža, MPa
L_{ber}	–	berzes ceļš, mm
f	–	berzes koeficients
V	–	diska rotācijas ātrums, m/s
t	–	darba laiks, s

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Virsmas raupjuma parametru lietojums berzes virsmu nodiluma aprēķinos

Nodilumizturības nodrošināšanas jautājumi ir aktuāli visās mašīnbūvniecības sfērās. Dilšanas intensitātes aprēķini dod iespēju noteikt sakarības starp nodilumu un materiāla īpašībām, virsmas raupjumu, vides apstākļiem un darba parametriem. Pamatā eksistē trīs galvenās nodiluma noteikšanas metodes – analītiskā, eksperimentālā un skaitliskā simulācija.

Nodiluma analītiskā noteikšanas metode iekļauj nodiluma aprēķinu modeļus. Tā 18. gadsimtā G. Amontons un Š. O. Kulons bija atklājuši trīs galvenos triboloģijas pamatlikumus, uz kuru pamata bija izveidots berzes ģeometriskais modelis [1]. Tribologs **J.T.Dezangjulje** tajos laikos bija piedāvājis adhēzijas berzes koncepciju [2]. Viņš uzskatīja, ka adhēzija ir viens no procesiem, kas īstenojas berzes laikā, bet tas bija pretrunā ar eksperimentu rezultātiem. **1950. gadā J.T.Dezangjulje** adhēzijas berzes koncepcija ieguva tālāku attīstību, jo tika veiksmīgi izmantota **F. Boudena** un **D. Tabora** pētījumos par kontaktu metāls-metāls [3]. **F. Boudens** un **D. Tabors** pierādīja, ka statiskais berzes spēks starp divām slīdošām virsmām ir stipri atkarīgs no reālā kontaktlaukuma, kas izteikts kā attiecība starp normālo slodzi un mīkstākā materiāla cietību.

1953. gadā J.F.Arčards izveidoja nodiluma prognozēšanas modeli, kas arī pamatojās uz adhēzijas nodiluma mehānismu [4]. **J.F.Arčarda** modelis nosaka, ka plastiskā kontakta gadījumā nodiluša materiāla apjoms V_v ir tieši proporcionāls slodzei F , slīdēšanas distancē s_R un nodiluma koeficientam k , savukārt apgriezti proporcionāls materiāla cietībai H :

$$V_v = \frac{k}{H} \times F \times s_R \quad (1.1.)$$

1958. gadā E.Rabinovičs piedāvāja nodiluma prognozēšanas modeli, kas iekļāva virsmas enerģijas efektus [5]. Viņa teorija nosaka saiti starp berzes koeficientu un cietu ķermeņu virsmas enerģijām. **1968. gadā I.V.Kragelskis** noformulēja **J.F.Arčarda** modelim pilnīgi pretēju zema nodiluma nosacījumu – mehānisko īpašību pozitīvā gradienta principu [6]. Tas nozīmē, ka virskārtas slāņu stiprībai jābūt mazākai nekā dziļāko slāņu stiprībai, citādi radīsies katastrofāls nodilums. **I. V. Kragelskis** uzskatīja, ka berze raksturojas ar molekulāras mijiedarbības spēku pārvarēšanu uz faktiskā kontakta plankumiem un deformējamā materiāla pretestību cietākā ķermeņa mikronelīdzenumu pārvietošanai tajā.

1980. gadā G.Fleišners izgudroja nodiluma noteikšanas modeli, kas balstījās enerģētiskajā pieejā, ka slīdes berzes laikā ģenerētā enerģija uzkrājas materiālā [7]. Ja uzkrātā enerģija ir sasniegusi kritisko robežu, tad materiāla režģa enerģija tiek pārvarēta un rodas nodilums. Tas tika aprakstīts ar berzes enerģijas blīvumu e_R . **2016. gadā S.Čun**, balstoties **P.W.Rowe** un **J.F.Arčarda** nodiluma noteikšanas modeļos, savos aprēķinos bija iekļāvis smērvielu ietekmi uz kontaktu [8]. Viņš ieviesa parametru Ψ , kas raksturo reālā kontakta laukuma attiecību pret nominālo kontakta laukumu. **S.Čun** apskatīja virsmas nelīdzenumu deformāciju kā elastīgi plastisko. **2018. gadā K.P.Liješs** izgudroja termodinamisko pieeju nodiluma noteikšanai [9], [10]. Viņa darbos nodiluma koeficienta k vietā figurē degradācijas koeficients B , kas veido sakarību starp dilšanas ātrumu un entropijas koeficientu. Taču autors neņem vērā virsmas tekstūras ietekmi uz nodilumu.

G.Ksiangam pieder arī moderna pieeja nodiluma noteikšanai, kas iekļauj divus nodiluma mehānismus – raupjuma pīķu deformāciju un noguruma mehānismu [11], [12]. Autors piedāvā noteikt nodilušā materiāla apjomu, nosakot atdalītā materiāla daļu plastiskās deformācijas dēļ un noguruma plaisu īpatsvaru. Reālā kontaklaukuma noteikšanai tika lietots **J.A.Grinvuda** un **J.B.P.Viljamsona** statistikas modelis, lai aprakstītu raupjas virsmas [13], [14]. Šeit tiek uzskatīts, ka virsmas nelīdzenumu sadalījums atbilst normālam sadalījuma likumam, lai aprakstītu nelīdzenumu kontaktu kā smērvielas plēves biezuma funkciju.

2023. gadā G. Sprīngis aktualizēja materiālu noguruma teorijā balstīto **J. Rudziša** un **G. Konrāda** nodiluma aprēķinu modeli [15], [16], integrējot tajā 3D virsmas raupjuma augstuma parametru Sa [17]. Pamatsakarība nodiluma noteikšanai ir līdzīga zinātnieka **G.Ksianga** darbā izmantotai izteiksmei. Nodiluma aprēķina modeli **G. Sprīngis** iekļāva vairākus nodilumu ietekmējošus faktorus – virsmas raupjuma raksturojumus, mehāniskās īpašības, materiāla noguruma raksturlielumus, savukārt konkrētais modelis ir ierobežots ar kontakta veidu, jo tas der elastīgā kontakta gadījumam, un virsmas ordinātu Gausa sadalījumu.

1.1.tabulā apkopoti galvenie nodiluma noteikšanas modeļi, kuros integrēti virsmas raupjuma parametri.

1.1. tabula

Raupjuma parametru pielietojums nodiluma aprēķinu modeļos

N. p. k.	Autors	Raupjuma parametri
1.	E.Rabinovičs [5]	θ – nelīdzenumu slīpuma leņķis; r – nelīdzenumu izliekuma rādiuss.
2.	J.F.Arčards [4]	R – nelīdzenumu izliekuma rādiuss.
3.	I. V. Krageļskis [6]	b, v – raupjuma atbalsta līknes parametri; R_{max} – nelīdzenumu maksimālais augstums; R – nelīdzenumu izliekuma rādiuss.
4.	S.Čun [8]	n – nelīdzenumu blīvums; β – nelīdzenumu izliekuma rādiuss; σ – ekvivalentā augstuma vidējā kvadrātiskā novirze.
5.	J. Rudzītis [15], G. Konrāds [16]	Ra – profila vidējais aritmētiskais augstums; c – anizotropijas koeficients; Pc – nelīdzenumu blīvums; RSm_1 – nelīdzenumu solis X ass virzienā; RSm_2 – nelīdzenumu solis Y ass virzienā.
6.	G.Ksiangs [11,12]	β – nelīdzenumu izliekuma rādiuss; D – nelīdzenumu blīvums; σ – augstuma vidējā kvadrātiskā novirze; γ – virsmas raupjuma orientācija.
7.	G. Sprīngis [17]	Sa – virsmas vidējais aritmētiskais augstums; Str – virsmas tekstūras indekss; Pc – nelīdzenumu blīvums; RSm_1 – nelīdzenumu solis X ass virzienā; RSm_2 – nelīdzenumu solis Y ass virzienā.

Vairākos nodiluma aprēķinu modeļos figurē nodiluma koeficients. To nosaka, veicot berzes eksperimentus uz tribometra. Taču, lai precīzi noteiktu dilšanas ātrumu, ir nepieciešams veikt virkni eksperimentu un statistisko analīzi, kas prasa ilgu laiku un rada iekārtas nolietojumu. Turklāt tribotestu lietojamība ir ierobežota ar testēšanas diapazonu. Tāpēc ir svarīgi atzīmēt galīgo elementu metodes (*FEM*) lietošanas lietderību. Tā ļauj prognozēt virsmas dilšanas mehānismus un vizualizēt kontaktspriegumu sadalījumu konkrētam berzes pārim, pamatojoties uz tribotesta mērījumu rezultātā iegūtajiem datiem un nodiluma analītisko aprēķinu modeli.

Mūsdienās eksistē vairākas datorprogrammas, kas nodrošina kontaktu modelēšanu un nodiluma aprēķināšanu, t. i., *Abaqus*, *Ansys*, *Redsy*, *Mathlab*, *Prepromax* u. c. Vairākos nodiluma pētījumos figurē tieši programmas *Abaqus* modulis *UMESHMOTION*, kas spēj apstrādāt kontaktējošo virsmu ģeometrijas izmaiņas. Atkarībā no uzdevuma pētnieki lieto 2D vai 3D nodiluma simulācijas modeļus. Pastāv dažādi varianti, kā var modelēt kontaktu starp divām virsmām: 1) kontakts starp divām gludām virsmām; 2) kontakts starp raupju un gludu virsmu; 3) kontakts starp divām raupjām virsmām. Pastāv vairākas iespējas ģenerēt raupju virsmu. Tā programmas *ABAQUS* izstrādātāji piedāvā [18], [19]: 1) importēt ar profilometru uzņemto virsmas 2D/3D ģeometriju *UMESHMOTION* vidē; 2) ģenerēt raupju virsmu *Abaqus* vidē ar funkciju “*Rough surface generator plug-in*”; 3) importēt no *Matlab* ģenerēto raupjo virsmu.

Pētnieka **Liang Yan** komanda veikusi apjomīgu analīzi par modeļiem nodiluma prognozēšanai ar *FEM* metodi [20]. Lielākā daļa pētnieku (ap 70 %) izmanto J.F.Arčarda modeli, otrajā vietā ir enerģijas izkliedes modelis – 20 %. Šo modeļu popularitāti var izskaidrot ar to vienkāršību un ātru aprēķinu laiku. Citi nodiluma noteikšanas modeļi iekļauj elektroķīmiskus vienādojumus korozijas nodilumam [21], rūdīšanas likumu (*power hardening law*) termomehāniskam nodilumam [22], elastīgi plastisko deformācijas modeļi [23], kas ir adoptēti J.F.Arčarda modelim.

Veicot atbilstošās literatūras analīzi, tika izpētīts, cik bieži pētnieki veic dilšanas procesu simulāciju, izmantojot raupjas virsmas kontaktmodeli [24]–[35]. Vairāki zinātnieki savos pētījumos bija vienkāršojuši virsmu kontakta modeli, pieņemot, ka abas virsmas ir gludas, t. i., raupjums nebija ņemts vērā. Tāds kontakta modelēšanas veids vienkāršo nodiluma aprēķinu, bet ietekmē rezultātu precizitāti. Lielāka daļa pētnieku atzīmē, ka nodiluma aprēķinu rezultāti pēc tribotesta un *FE* metodes atšķiras, kļūda dažos gadījumos sasniedz 30 %, kas arī ir izskaidrojams ar *FE* modeļa pieņēmumiem. Taču ir svarīgi atzīmēt gan raupjuma ietekmi uz modeļa precizitāti, gan arī tādu faktoru ignorēšanu kā materiāla nogurums, korozija, oksidācija, šķērsvirziena bīdes spriegumi, temperatūra un *EDZ* vielas u. c.

1.2. Virsmas 2D un 3D raupjuma parametru aprēķinu iespējas

Veicot berzes pāra virsmu nodiluma aprēķinu un prognozēšanu, ir svarīgi matemātiski izteikt raupjuma parametrus un salīdzināt, vai eksperimentāli noteikto parametru vērtības atbilst analītisko aprēķinu rezultātiem. Šis salīdzinājums dos iespēju izmantot analītiskās formulas raupjuma parametru kontrolei dilšanas laikā, kuras var pielāgot galīgo elementu

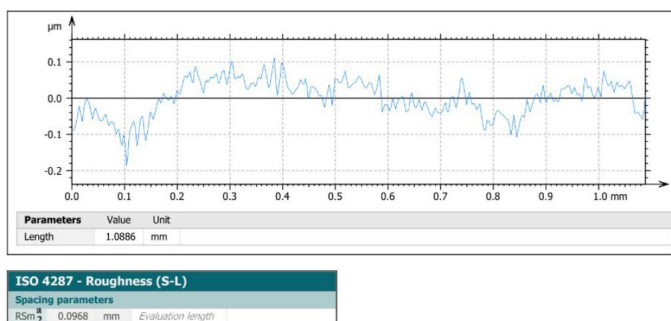
videi. Promocijas darbā tika apskatīti tie raupjuma parametri, kuru precīza noteikšana ir nepieciešama nodiluma aprēķinos pēc materiāla noguruma teorijas.

Viens no svarīgākajiem raupjuma raksturotājiem ir parametrs Sa , kas raksturo virsmas augstuma īpašības. **P. Husu, J. Ruzītis** izmantoja gadījuma lauku teoriju parametra Sa analītiskai noteikšanai [36]–[38]. Autori apskatīja gadījumu, kad virsmas ordinātu sadalījums aprakstīts ar normālā sadalījuma likuma funkciju $f(z)$. Ņemot vērā gadījuma lauka stacionaritāti, vidējo aritmētisko augstumu tika piedāvāts rēķināt pēc 1.2. formulas:

$$E\{Sa\} \sim Sq \sqrt{\frac{2}{\pi}}. \quad (1.2.)$$

Autori atzīmē, ka 1.2. sakarība pārvēršas vienādībā tikai normālā sadalījuma likuma gadījumā, ja ir maza signāla/trokšņa attiecība.

Dilšanas procesu ietekmē arī virsmas apstrādes pēdas. **G. Sprīngis**, pētot nodilumu berzes pārim tērauds-bronza, savos aprēķinos izmantoja parametru RSm_2 virzienā paralēli apstrādes pēdām, t. i., berzes virzienā [17]. 1.1. attēlā redzama nodilumu aktivizējošās lodītes virsmas profilogramma pēc piestrādes stadijas.



1.1. att. Nodilumu aktivizējošās lodītes virsmas profils berzes pēdu virzienā [17].

RSm_2 vērtība raupjuma profilam veido tikai 0,0968 mm pēc virsmas datorapstrādes programmas datiem. Tas pilnībā neatbilst profila ģeometrijai, kam vizuāli var izcelt vienu platu soli, kura garums ir apmēram 0,6 mm, nosakot RSm_2 abos profilogrammas virzienos.

Neprecizitāte parametra RSm_2 noteikšanā tika pamanīta arī **Irene Buj-Corral** darbā par drukāšanas orientācijas ietekmi uz virsmas raupjumu ar kausētas nogulsnešanās modelēšanas metodi (FDM) [39]. Palielinoties drukāšanas leņķim no 55 grādiem līdz 85 grādiem, raupjuma profilam radās tā saucamais “subraupjums”, kas negatīvi ietekmēja RSm_2 nolasīšanas rezultātu.

M. Kumermanim, pētot plakanslīpētas virsmas, datorprogrammā aprēķinātajam raupjuma solim bija kļūdainas vērtības. Trases garumā 0,8 mm profilam bija tikai daži krustojumi ar viduslīniju, kas kalpoja par “nulles” elementiem, attiecīgi raupjuma soļa definēšanai pietrūka krustojumu ar viduslīniju [40].

Liela nozīme berzes procesos ir arī virsmas tekstūras īpatnībām. **J. Rudzītis** nodiluma aprēķinos izmantoja anizotropijas koeficientu C , kas nosaka sakarību starp virsmas profila

soļiem perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām [36], [37]. Autors piedāvāja noteikt virsmas anizotropiju pēc 1.3. izteiksmes:

$$C = \frac{RSm_1}{RSm_2}. \quad (1.3.)$$

Attiecīgi, ja virsma ir izotropā, $RSm_1 = RSm_2$ un $C = 1$. Savukārt, ja virsma ir anizotropā, $RSm_2 \rightarrow \infty$, $C \rightarrow 0$. Šis parametrs nav standartizēts, bet tiek aktīvi lietots virsmas raupjuma pētījumos.

G. Sprīngis, I. Boiko ar kolēģiem piedāvāja izmantot standartizēto 3D raupjuma parametru Str , lai noteiktu virsmas anizotropiju [41]. Standartā *EN ISO 25178-2* parametrs Str – virsmas tekstūras indekss – tiek definēts, ka attiecība starp korelācijas funkcijas $f_{ACF(x,y)}$ horizontālām distancēm, kas raksturojas ar funkcijas ātrāko un lēnāko dilšanu intervālā no 0 līdz 1. Līdzīgu pieeju izmantoja 20. gadsimta pētnieks **P. Husu**, pētot virsmas raupjuma anizotropijas ietekmi uz nodilumizturību [38]. Parametra Str lietošanas iespējamība nodiluma aprēķinos ir jāpārbauda, jo pētījumi par virsmas tekstūras indeksa un parametra C identiskumu netika veikti. Ja šo parametru vērtībām būs augsta sakritība, tad virsmas tekstūras indeksu būs iespējams izmantot raupjuma soļa aprēķinos.

Nodilušā materiāla apjoms figurē vairākos nodiluma aprēķinu modeļos. Lai matemātiski noteiktu šo parametru, daži autori izmanto 3D un 2D raupjuma parametru kopu. **G. Sprīngis** kopējo deformēto tilpumu izteica kā i-tā izciļņa atdalītā tilpuma reizinājumu ar deformēto izciļņu skaitu [17]. **J. Rudzītis** bija cits formulējums nodilušā materiāla apjomam [37]. Viņš ieviesa parametru Vu – izciļņu tilpumu pie virsmas šķērsslīmeņa u . Šī parametra aprēķins arī pamatojās uz normālā gadījuma lauka teoriju. Autors piedāvāja noteikt parametru Vu , integrējot virsmas šķērsgriezuma laukumu $A(u)$ pa līmeņiem, pieņemot vidusplakni par atskaites punktu. Pēc attiecīgo pārveidojumu veikšanas analītiski šo parametru tika piedāvāts rēķināt, izmantojot 1.4. izteiksmi:

$$E\{Vu\} \sim Sq \times Aa \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{c^2}{2Sq^2}\right) - \frac{c}{Sq} \left[1 - \Phi\left(\frac{c}{Sq}\right)\right] \right\}. \quad (1.4.)$$

M. Kumermanis salīdzināja pēc 1.4. formulas noteiktās Vu vērtības ar eksperimentāliem datiem – parametru Vm [40]. Autors atzīmēja, ka piestrādes stadijā ($u < 30\%$) un normālās dilšanas stadijā ($u \sim 30..70\%$) Vu vērtības ir mazākas par Vm , tikai katastrofālās dilšanas stadijā, kad $u > 70\%$, parametru Vm vērtības ir tuvas teorētiskām. M. Kumermanis, salīdzinot analītiski noteiktās materiāla tilpuma vērtības ar eksperimentāliem datiem, nebija ņēmis vērā atšķirību mērvienībās. Tā, nosakot materiāla tilpumu teorētiski pēc 1.4. formulas, parametra Vu mērvienība ir mm^3 , savukārt datorapstrādes programma nosaka parametra vērtības mm^3/mm^2 . Tāpēc, lai definētu secinājumus par 1.4. izteiksmes lietošanas iespējamību materiāla tilpuma noteikšanai, ir jāveic papildu izpēte.

Ņemot vērā to, ka nodiluma aprēķini un analītiskās formulas raupjuma parametru noteikšanai virsmām ar neregulāru raksturu balstās gadījuma lauka teorijā un normālā sadalījuma likumā, ir svarīgi noteikt, vai novirzes no normālā sadalījuma likuma ietekmēs aprēķina rezultātu precizitāti.

1.3. Virsmas raupjuma ordinātu sadalījuma novērtējums

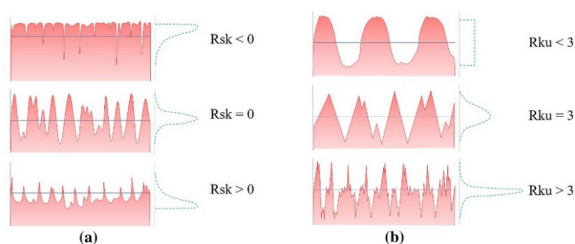
Kā bija minēts iepriekš, vairāki nodiluma aprēķinu modeli balstījās konkrētā pieņēmumā, ka virsmām ar neregulāru raksturu raupjums tiek aprakstīts ar normālo gadījuma funkciju. Tāds pieņēmums tika definēts, balstoties 20. gadsimta vidū veiktajos pētījumos par virsmas raupjuma ordinātu sadalījuma atbilstību Gausa sadalījumam. Virsmu ordinātu sadalījums tika pārbaudīts uz varbūtībteorētiskā papīra, pēc korelācijas funkcijām, saskaņas kritērija ω^2 [15], [38], [42], [43], Pirsona un Kolmogorova kritērijiem, asimetrijas, ekscesa vērtībām, atbalsta līkni [17]. Turklāt pētījumu rezultāti liecināja par ordinātu sadalījuma daļēju atbilstību normālam sadalījuma likumam.

Mūsdienīgu pētījumu par virsmas raupjuma modeļa atbilstību normālam sadalījuma likumam ir ļoti maz. **Nikolaos E. Karkalos** mēģināja veikt virsmas raupjuma modeļa analīzi pēc hidroabrazīvas griešanas, salīdzinot asimetrijas Rsk un ekscesa Rku vērtības ar normāla sadalījuma funkcijas parametriem [44]. Atšķirība starp nomērīto un standartizēto Rsk vērtību bija vairāk par 100 %, Rku vērtības atšķīrās par 40 %, tikai dažiem paraugiem bija redzama sakritība. **Peerapon Wechsuwanmanee** veica raupjuma ordinātu statistiskā sadalījuma salīdzināšanu ar pielāgoto normālā sadalījuma līkni, analizējot virsmas raupjuma ietekmi uz aukstuma formējamību lieces procesos [45]. Rezultāti liecināja par tuvu atbilstību Gausa sadalījumam. **Margarida Martins Quezada**, pētot zobu protezēšanas akrila sveķu virsmas pēc manuālas un mehāniskas pulēšanas, virsmas modeļa pārbaudei izmantoja ordinātu sadalījuma funkciju un tās raksturotājus Rsk un Rku [46]. Autore atzīmēja, ka pie mehanizētas pulēšanas Rku vērtības ir tuvas $Rku = 3$, relatīva novirze ir ap 10 %, taču ir redzama asimetrija ordinātu sadalījumā – Rsk vērtības tiecās uz 1. Pamatojoties uz autoru pētījumiem, var secināt, ka virsmām raupjuma ordinātu sadalījums ir tikai tuvs normālam, bet pilnīgi tam neatbilst. To var izskaidrot ar atsevišķu profilu ordinātu sadalījuma novērtējumu, kas nevar pilnībā atspoguļot visas virsmas raksturu.

Pastāv ļoti daudz metožu gadījuma lieluma sadalījuma pārbaudei atbilstībai normālam sadalījuma likumam. 2021. gadā **Hugo Hernandez** veica apjomīgu analīzi par eksistējošiem normalitātes testiem, iekļaujot tajā 55 dažādas metodes, un to salīdzināšanu pēc Monte Karlo $power$ kritērija ($1-\beta$), lai noteiktu testa spēju pareizi identificēt izlasi [47]. Hugo Hernandez apkopoja 20 pētījumus, kas veikti no 1990. līdz 2021. gadam, kuros tika salīdzināta normalitātes testu jauda. Viņš ņēma vērā tikai tos rezultātus, kas iegūti mazai izlasei ($n < 35$), jo jaudas atšķirības starp testiem bija acīmredzamākas. Vislabākos rezultātus uzrādīja Shapiro-Wilk regresijas tests, empīriskās kumulatīvās sadales funkcijā balstīts Andersona-Darlinga tests un Hoskinga L momenta tests.

Ņemot vērā to, ka pie virsmas raupjuma ģeometrijas uzņemšanas tiek ģenerēta virsma, kas sastāv no miljoniem punktu, lielākai daļai normalitātes testu jauda sasniegs 100 %. Un, tā kā jebkurā gadījumā virsmām ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījuma funkcijai būs viena virsotne un tā neierobežoti dils ar argumenta palielināšanos pēc absolūtas vērtības, sadalījuma blīvums atšķirsies no normālā galvenokārt ar asimetrijas un ekscesa vērtībām. Tāpēc, ja ir zināms pieņēmums par novirzes veidu no normālā sadalījuma likuma, t. i., tiek apskatīts sadalījums, kuram asimetrijas un ekscesa vērtības atšķiras no vērtībām, kas raksturīgas

normālam sadalījumam, ir lietderīgi izmantot momentos balstītus testus. Tas nozīmē, ka var aprobežoties ar asimetrijas Rsk un ekscesa Rku vērtību noteikšanu.

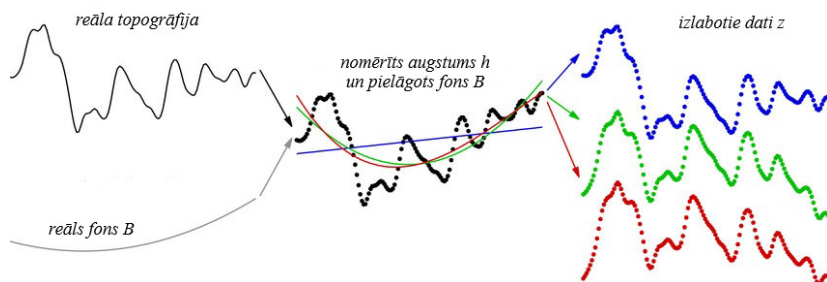


1.2. att. Virsmas ordinātu sadalījuma attēlojumi atkarībā no sadalījuma funkcijas asimetrijas (Rsk) un ekscesa (Rku) vērtībām [48].

1.4. Virsmas datorapstrādes operāciju ietekme uz raupjuma parametru noteikšanas precizitāti

Pēc virsmas raupjuma mērīšanas eksperimenta veikšanas ir ļoti svarīgi pareizi apstrādāt uzņemto topogrāfiju, lai rezultātā iegūtu precīzu virsmas 3D un 2D raupjuma ģeometriju un virkni parametru, kas atklāj virsmas īpatnības un raksturo tās ekspluatācijas īpašības [49], [50]. Šīm nolūkam ir nepieciešams nolīmeņot virsmu un/vai atdalīt formu, lai ģenerētu vidusplakni/viduslīniju raupjuma parametru noteikšanai [51]. Šīm operācijām ir primāra ietekme uz virsmas raupjuma ģeometriju. Tādas datorapstrādes programmas kā *MCube Map Ultimate*, *TalyMap*, *MountainsSPIP* u. c. piedāvā vairākus līmeņošanas veidus – pēc mazāko kvadrātu metodes – *LSP* vai *TLSP* līmeņošana, pēc minimālās zonas metodes – *MZP* līmeņošana, kā arī katra atsevišķa profila līmeņošana, kad katras līnijas ordinātu vidējā vērtība tiek nobīdīta pie 0 – *line by line* līmeņošana. Virsmas raupjuma standartos *ISO 25178* un *ISO 21920* ir dotas rekomendācijas un paskaidrojumi virsmas filtrēšanai un tās secībai, savukārt, kādi operatori un filtri ir jāizmanto konkrētam virsmas tipam, nav definēti.

David Nečas veica apjomīgu pētījumu par to, kā līmeņošana izmaina 2D raupjuma mērīšanas rezultātus un kā no tā izvairīties [52], [53]. D. Nečas ilustrēja profila līmeņošanu ar 1., 2. un 3. kārtas polinomiem, kur fona pielāgošana noņem ne tikai īsto fonu B , bet arī raupjuma komponentes (1.3. att.). Tāpēc nolīmeņotas virsmas raupjuma parametriem ir samazinātas vērtības.



1.3. att. Vispārīgā shēma, kā pielāgotais fons izkropļo virsmas ģeometrijas datus [53].

Ņemot vērā to, ka nodiluma aprēķinos figurē 2D raupjuma soļa parametri, to vērtības ir jānosaka, veicot atsevišķus 2D mērīšanas eksperimentus vai izvelkot no nolīmeņotas virsmas atsevišķus profilus. Bet dažreiz atsevišķi 2D mērījumi fiziski nav iespējami virsmas tekstūras īpatnību un citu faktoru dēļ [54]. Savukārt standarts *ISO 25178-3* brīdina [55], ka profila un tekstūras filtrēšana pie vienāda filtra veida un *cut-off/nesting* indeksa var dot pilnīgi atšķirīgus rezultātus. Analizējot atbilstošo literatūru, pētījumi par 3D virsmas līmeņošanas ietekmi uz atsevišķo profilu ģeometriju netika atrasti. Tāpēc svarīgi noteikt piemērotu līmeņošanas operāciju, kas saglabātu profilu ģeometriju. Turklāt ir aktuāls jautājums par profila viduslīnijas un vidusplaknes savstarpējo izvietojumu, jo no vienotā virsmas apraksta 2D raupjuma parametru atskaites bāzēm (viduslīnijām) ir jāatrodas virsmas vidējās plaknes līmenī, tikai tad 2D parametri raksturo 3D virsmu, bet to savukārt arī ietekmē līmeņošanas operācijas.

1.5. Secinājumi

Pēc literatūras analīzes var izcelt vairākas problēmas, kas saistītas ar virsmas raupjuma parametru lietojumu **berzes virsmu nodiluma aprēķinos**.

1.1. Vairāki nodiluma aprēķinu modeļi ar integrētiem raupjuma parametriem ir ierobežoti ar:

- 2D raupjuma parametriem;
- pieņēmumu par ordinātu sadalījuma atbilstību normālam sadalījuma likumam;
- vienu konkrētu kontakta veidu.

1.2. Veicot nodiluma simulāciju un aprēķinu ar *FE* metodi, vairākos gadījumos tiek lietoti J.F.Arčarda un G.Fleišnera nodiluma aprēķina modeļi un berzes pāra kontakta tips – gluda virsma-gluda virsma, kur virsmas raupjums nav ņems vērā, kas samazina rezultātu ticamību.

2. Raupjuma parametru noteikšana.

- 2.1. Nav precizēta ordinātu sadalījuma ietekme uz vidējā aritmētiskā augstuma *Sa* aprēķinu.
- 2.2. Datorapstrādes programma dod raupjuma soļa *RSm₂* samazinātas vērtības.
- 2.3. Nav pārbaudīta virsmas tekstūras indeksa *Str* atbilstība anizotropijas koeficientam *C*.
- 2.4. Nav veikta materiāla tilpuma *Vm* korekta analītiskā noteikšana.

3. Virsmas 2D un 3D ģeometrijas datorapstrāde.

- 3.1. Nav veikta izpēte par 3D virsmas līmeņošanas ietekmi uz atsevišķo profilu ģeometriju.
- 3.2. Nav pētīts jautājums par profila viduslīnijas un vidusplaknes savstarpējo izvietojumu, kas ietekmē 2D raupjuma parametru noteikšanu.

4. Raupjuma ordinātu sadalījuma likuma novērtējums.

- 4.1. Normalitātes pārbaudes rezultāti liecina par virsmu ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījuma daļēju atbilstību normālam sadalījuma likumam, kas var ierobežot gadījuma lauka teorijā balstīto formulu lietošanu raupjuma parametru noteikšanai.

Hipotēze. Virsmas 3D un 2D raupjuma parametru precizēta noteikšana un integrēšana, kā arī atsevišķu materiāla noguruma raksturlielumu izmantošana dilšanas intensitātes aprēķinos un prognozēšanā paaugstinās rezultātu ticamību elastīgā un plastiskā kontakta gadījumos.

2. VIRSMAS RAUPJUMA EKSPERIMENTĀLĀ NOTEIKŠANA

2.1. 3D un 2D raupjuma mērīšanas eksperiments

Promocijas darbā virsmas 3D un 2D raupjuma parametru mērīšanas process tika realizēts pēc kontakta metodes. Eksperimentu veikšanai tika izvēlēts profilometrs *Mitutoyo Formtracer avant S-3000*. Šī iekārta ir aprīkota ar smalku dimanta adatu 12AAC731, kuras virsotnes noapaļojuma rādiuss ir 2 μm , konusa leņķis – 60 grādi, mērīšanas spēks – 0,75 mN.

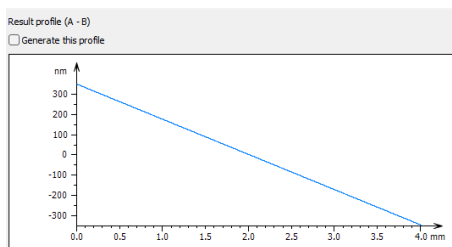
Eksperimentu veikšanai tika izvēlēti TESA RUGOTEST raupjuma etalonparaugi no nerūsējošā niķeļa un citi eksperimentālie paraugi no tērauda. Sakarā ar to, ka šajā darbā tika pētītas virsmas ar neregulāru raupjumu, eksperimentam bija izvēlēti vairāki etalonparaugi, kas iegūti abrazīvās apstrādes un elektroerozijas rezultātā. Katram etalonparaugam tika pētītas virsmas ar atšķirīgu virsmas vidējo nelīdzenumu augstumu un attiecīgi cut-off vērtību.

3D topogrāfijas uzņemšanai tika definēti mērīšanas laukuma (kvadrāta malu) izmēri – $L = 5l$ (pēc ISO 25178-2 un ISO 21920-2 standarta rekomendācijām); 2D mērījumiem raupjuma profila novērtēšanas garums bija ierobežots ar parauga izmēriem, t. i., tika izvēlēts maksimāli iespējamais novērtēšanas garums X un Y ass virzienos.

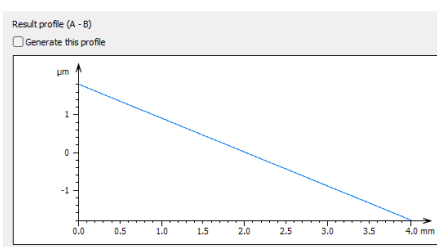
2.2. Tekstūras līmeņošanas operācijas korekta izvēle

Pēc 3D raupjuma mērīšanas eksperimentā iegūtie dati par virsmas topogrāfiju tika apstrādāti datorprogrammā McubeMapUltimate 10 [56]. Pētāmām virsmām tika lietotas dažādas līmeņošanas operācijas ar mērķi atrast optimālo variantu virsmas ģeometrijas saglabāšanai un attiecīgi raupjuma parametru precizitātes nodrošināšanai.

Plakanslīpētās virsmas 3D ģeometrijas un izvilkto profilu perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām analīze pirms datorapstrādes liecina par to, ka profiliem X ass virzienā nav redzams izteikts sašķiebums, savukārt otrā virzienā ir skaidri izteikts slīpums, kas neļauj adekvāti novērtēt raupjuma soli šajā virzienā. Ar datorprogrammas funkcijas “Subtract” palīdzību tika iegūtas sākotnējo profilu references līnijas (mazāko kvadrātu līnijas) virzienā perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām. Salīdzinot profilus pirms un pēc līmeņošanas, var redzēt, ka X ass sākotnējā profila references līnijas slīpums ir vairākās reizēs mazāks, salīdzinot ar Y ass profilu (2.1. att.) un profila ordinātu izvietojums attiecībā pret viduslīniju pēc līmeņošanas izmainās minimāli.



a



b

2.1. att. Sākotnējā profila references līnijas slīpums: a – profils virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām; b – profils virzienā paralēli apstrādes pēdām.

Attiecīgi Y ass profilam pirms līmeņošanas krustojumu skaits ar viduslīniju dos raupjuma soļa RSm_2 kļūdainu vērtību. Lai atrisinātu šo problēmu un izvēlētos optimālu profila līmeņošanas veidu, parauga *Rugotest 104* virsmas N.6 brīvi izvēlētam profilam tika veikta līmeņošana ar funkcijām *LSL*, *TLSL* un *MZL leveling*. Salīdzinot profila raupjuma parametrus pirms un pēc līmeņošanas (2.1. tab.), var redzēt, ka vidējā aritmētiskā augstuma Ra vērtības pēc līmeņošanas samazinās, savukārt raupjuma soļa RSm vērtības palielinās un šajā gadījumā atbilst profila ģeometrijai pēc līmeņošanas pēc mazāko kvadrātu metodes.

2.1. tabula

Sākotnējā profila P un nolīmeņoto profilu raupjuma parametri

Raupjuma parametrs	P	P_{LSL}	P_{TLSL}	P_{MZL}
Ra	1,06	0,57	0,57	0,66
RSm	1,45	1,71	1,71	0,81

Nākamais solis bija virsmas līmeņošana, lietojot atšķirīgas līmeņošanas operācijas, ar tālāku profilu izvilkšanu. Lai noteiktu sākotnēji nolīmeņotā profila sakritības pakāpi ar dažādi nolīmeņotas virsmas izvilktiem profiliem, tika izmantots datorprogrammas funkcijas “*Subtract*” parametrs RMS – vidējā kvadrātiskā novirze, kas tiek rēķināta pārklāšanās zonas garumā. 2.2. tabulā redzamas RMS vērtības virsmas profiliem atkarībā no līmeņošanas veida. Jo mazāka ir RMS vērtība, jo augstāka ir profilu sakritības pakāpe. Pētījuma gaitā salīdzinājumam tika izvēlēti plakanslīpētās virsmas 100 profili X ass virzienā un tik pat daudz profilu Y ass virzienā, lai pārbaudītu, kurš no virzieniem 3D līmeņošanas operācijās tiek ietekmēts vairāk.

2.2. tabula

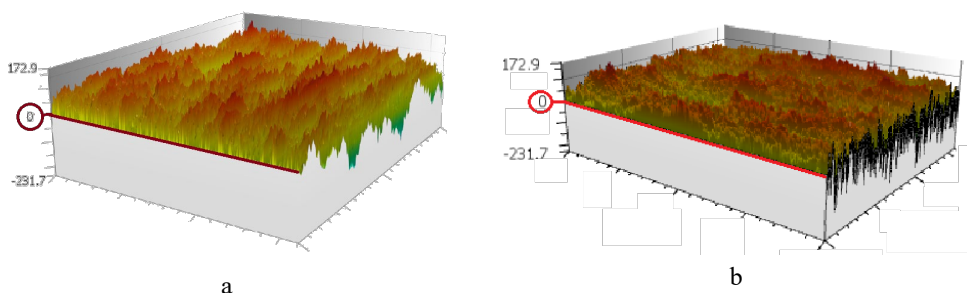
RMS vērtības profiliem atkarībā no līmeņošanas veida

N. p. k.	Līmeņošanas veids	RMS_{vid} , nm (X ass)	RMS_{vid} , nm (Y ass)
1.	<i>LSPL</i>	1,45e-7	2,59e-7
2.	<i>TLSP</i>	1,28e-7	2,66e-7
3.	<i>MZPL</i>	1,87e-7	2,78e-7
4.	<i>Leveling line by line – subtract the mean + LS-polynomial, $P = 1$</i>	2,35e-10	3,54e-7
5.	<i>Leveling column by column – subtract the mean + LS-polynomial, $P = 1$</i>	1,09e-6	2,89e-10

Pēc 2.2. tabulas datiem var secināt, ka *Leveling line by line + LS-polynomial, $P = 1$* dod visprecīzāko sakritību ar X ass sākotnēji nolīmeņotiem profiliem, savukārt *Leveling column by column + LS-polynomial, $P = 1$* dod gandrīz pilnu sakritību ar Y ass sākotnēji nolīmeņotiem profiliem. Ņemot vērā to, ka virsmas 3D ģeometrija ir jāuzņem perpendikulāri apstrādes pēdām, izvēlēties *Leveling column by column* nav korekti, jo virsmai parādīsies mākslīgi ģenerēti ekstrēmi pīķi. Attiecīgi, balstoties RSM_{vid} vērtībā, *Leveling line by line* kopā ar *LS-polynomial* ir labākais variants.

2.3. Virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējā izvietojuma noteikšana

Šajā apakšnodaļā grafiski pamatots, kādā veidā profilu viduslīnijas ir saistītas ar virsmas vidusplakni un kā to izvietojumu ietekmē līmeņošanas operācijas. Šim nolūkam *MCubeMAP Ultimate 10* datorprogrammā 3D virsmai pēc dažāda veida līmeņošanas mākslīgi tika izveidotas divas renītes līdz virsmas vidusplaknei, lai salīdzinātu X ass un Y ass virzienos profilu viduslīniju izvietojumu attiecībā pret virsmas vidusplakni (2.2. att.).



2.2. att. Virsmas ar mākslīgi izveidotām renītēm pēc LSPL:

a – renīte perpendikulāri apstrādes pēdām; b – renīte paralēli apstrādes pēdām.

Šīm virsmām ar datorprogrammas funkcijas “*Extract series of profiles*” palīdzību tika iegūti visi profili savstarpēji perpendikulāros virzienos. Profilu analīze liecina par to, ka renītes izvietojums visiem profiliem Y ass virzienā svārstās no $-0,06 \mu\text{m}$ līdz $0,06 \mu\text{m}$ attiecībā pret to viduslīnijām. Savukārt X ass profiliem renītes izvietojuma svārstību amplitūda ir ievērojami mazāka – no $-0,015 \mu\text{m}$ līdz $0,025 \mu\text{m}$ attiecībā pret to viduslīnijām.

Lai izvēlētos optimālo līmeņošanas veidu, tika salīdzināts virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējais izvietojums pie atšķirīgiem līmeņošanas veidiem, nosakot profilu viduslīniju maksimālās novirzes no vidusplaknes h_{x_max} un h_{y_max} attiecībā pret maksimālo nelīdzenumu augstumu S_z .

2.3. tabulā redzamas profilu viduslīniju maksimālās novirzes no vidusplaknes virzienos paralēli un perpendikulāri apstrādes pēdām dažādi apstrādātām virsmām. Tā, veicot līmeņošanu **pēc mazāko kvadrātu metodes** abos virzienos ir redzamas viduslīniju novirzes no vidusplaknes izvietojuma; novirze pa X asi sasniedz 6 %, pa Y asi – 17 %. Līmeņošana *line by line* nodrošina pilnīgu sakritību starp X ass profilu viduslīnijām un vidusplakni, bet *column by column* līmeņošana – pilnīgu sakritību starp Y ass profilu viduslīnijām un vidusplakni. Veicot *line-by line* + PL līmeņošanu h_{i_max}/S_z , vērtība izotropām virsmām garenvirzienā ir ievērojami mazāka nekā anizotropām. Analīzes rezultāti liecina par to, ka līmeņošanas ietekmes tendence saglabājas visiem paraugiem. Ņemot vērā virsmas ģeometrijas uzņemšanas virzienu un pilnīgu sakritību starp vidusplakni un X ass profilu viduslīnijām, *leveling line by line* kopā ar mazāko kvadrātu polinomu ir optimālais variants virsmas ģeometrijas saglabāšanai.

Pētāmo paraugu virsmas profilu viduslīniju maksimālā novirze no vidusplaknes atkarībā no līmeņošanas veida

Apstrādes veids	Ass	Maksimālā novirze h_{i_max}/S_z atkarībā no līmeņošanas veida, %				
		<i>LSPL</i>	<i>Line by Line</i>	<i>Line by Line +PL</i>	<i>Column by Column</i>	<i>Column by Column +PL</i>
Plakanslīpēšana	x	4,9	0	0	10,5	6,2
	y	16,1	17,8	17,0	0	0
Apašlīpēšana	x	5,6	0	0	11,2	7,1
	y	15,2	18,2	17,7	0	0
Elektroerozija	x	1,8	0	0	13,2	9,6
	y	10,6	3,8	3,5	0	0
Apšaušana ar skrotīm	x	2,2	0	0	12,1	9,3
	y	11,4	4,5	4,1	0	0
Apstrāde ar smilšstrūklu	x	3,2	0	0	12,8	10,1
	y	12,1	6,2	5,8	0	0
Pulēšana	x	6,3	0	0	11,8	7,3
	y	17,4	18,7	18,2	0	0
Lepēšana	x	4,3	0	0	11,1	7,1
	y	15,8	17,3	16,5	0	0

2.4. Secinājumi

1. Līmeņošanas veids dažādi ietekmē virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējo izvietojumu.

1.1. Pilnīga sakritība starp X ass profilu viduslīnijām un virsmas vidusplakni ir novērojama, izvēloties līmeņošanu *line by line*.

1.2. Pilnīga sakritība starp Y ass profilu viduslīnijām un virsmas vidusplakni ir novērojama, izvēloties līmeņošanu *column by column*.

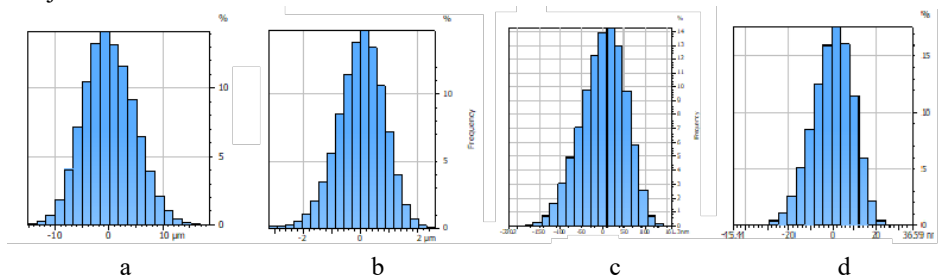
1.3. *LSP* līmeņošanas gadījumā novirze starp virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējo izvietojumu ir novērojama abos X un Y ass virzienos.

2. Ņemot vērā parametra *RMS* vērtības un vidusplaknes/viduslīnijas savstarpējā izvietojuma analīzi, tika secināts, ka līmeņošanas funkcija *leveling line by line* kopā ar *LS-polynomial* ir visoptimālākais variants virsmas ģeometrijas saglabāšanai.

3. VIRSMAS 3D un 2D RAUPJUMA PARAMETRU APRĒĶINI

3.1. Virsmas neregulārā raupjuma modeļa atbilstības pārbaude normālām sadalījuma likumam

Šajā apakšnodaļā aprakstīta veiktā paraugu virsmas raupjuma modeļa pārbaude, salīdzinot modeļa parametru teorētiskās vērtības ar eksperimentāliem datiem. 3.1. attēlā redzamas raupjuma ordinātu sadalījuma histogrammas virsmām ar neregulāru raksturu pēc abrazīvas apstrādes. Pēc histogrammu vizuālās analīzes pirmajā tuvinājumā var pieņemt, ka ordinātu sadalījums atbilst normālam, par ko liecina histogrammas zvanveida forma ar neizteiktu asimetriju.

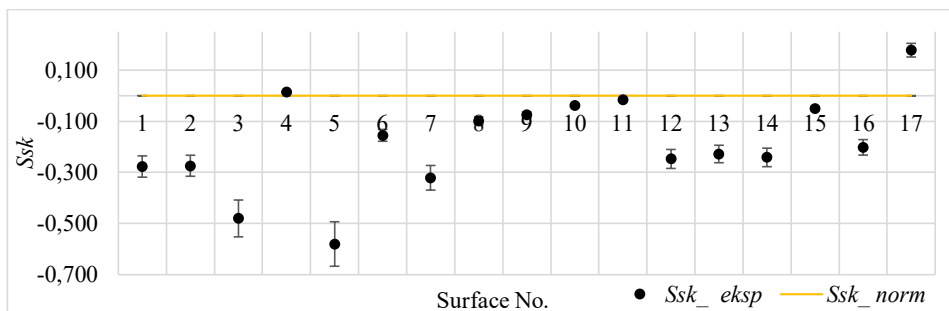


3.1. att. Virsmu ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījuma histogrammas:

a – apstrāde ar smilšstrūklu; b – apšaušana ar skrotīm; c – plakanslīpēšana; d – pulēšana.

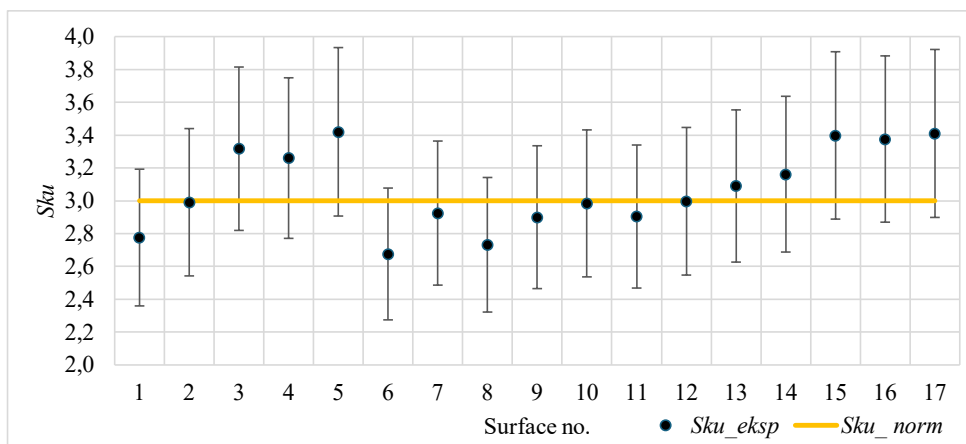
Virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas atbilstība normālām sadalījuma likumam tika pārbaudīta pēc diviem kritērijiem – Ssk – virsmas asimetrijas un Sku – virsmas ekscesa.

3.2. attēlā redzamas eksperimentāli iegūtas raupjuma ordinātu sadalījuma funkcijas asimetrijas vērtības un teorētiskais Ssk (līnija pie nulles vērtības). Veicot parametra Ssk eksperimentāli iegūto vērtību salīdzinājumu ar teorētisko, var secināt, ka nevienam paraugam Ssk vērtība neiekļaujas relatīvās novirzes intervālā $\pm 10\%$, tā sasniedz 100% . Parametra Ssk nomērītās vērtības atrodas intervālā $-0,58 < Ssk_{\text{eksp}} < 0,18$.



3.2. att. Parametra Ssk eksperimentālās un teorētiskās vērtības.

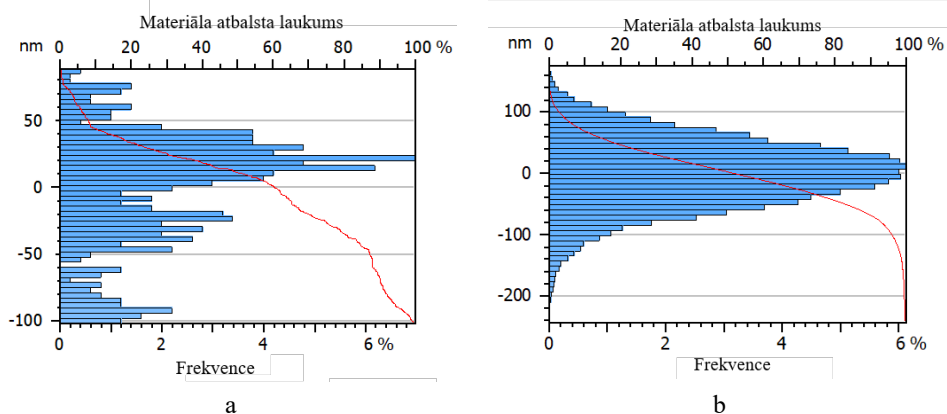
3.3. attēlā redzamas raupjuma parametra Sku vērtības. Kā bija minēts iepriekš, pēc normālām sadalījuma likuma virsmas ekscesa vērtībai jābūt vienādai ar 3. Grafiskā analīze rāda, ka visām virsmām atšķirība starp teorētisko un eksperimentālo Sku vērtību sasniedz $\pm 13\%$. Parametra Sku nomērītās vērtības atrodas robežās $2,7 < Sku_{\text{eksp}} < 3,4$.



3.3. att. Parametra Sku eksperimentālās un teorētiskās vērtības.

Veicot raupjas virsmas 3D un 2D profila parametru salīdzinājumu, var secināt, ka Rsk vērtības perpendikulāri apstrādes pēdām diezgan precīzi sakrīt ar Ssk vērtībām un atšķirība ir mazāka par 15 %, savukārt garenvirzienā Rsk vērtības atbilst Ssk vērtībām tikai tiem paraugiem, kuriem nav izteikta apstrādes pēdu virziena, t. i., virsmas pēc elektroerozijas, smilšstrūkļas apstrādes, apšaudes ar skrotīm. Virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas ekscesa vērtības ir ļoti tuvas Rku vērtībām perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām, bet izņēmums ir virsmas ar lielu anizotropiju, kurām parametra Rku vērtības Y ass virzienā atšķiras par Sku vērtībām par vairāk nekā 15 %. Šo neatbilstību var redzēt 3.4. a attēlā.

Veicot atsevišķus 2D raupjuma mērījumus, ja trases garums ir palielināts, $L = 80 \text{ l}$, var novērot pavisam citu raupjuma ordinātu sadalījumu. 3.4. b attēlā ir skaidri redzama raupjuma ordinātu sadalījuma zvanveida forma. Šajā gadījumā $Rsk_2 = -0,25$, $Rku_2 = 3,25$. Tādas atšķirības parametru vērtībās ir skaidrojamas ar ierobežotu trases garumu Y ass profiliem.



3.4. att. Plakanslīpētās virsmas profila punktu sadalījums virzienā paralēli apstrādes pēdām:
a – $L = 5 \text{ l}$; b – $L = 80 \text{ l}$.

3.2. Virsmas vidējais aritmētiskais augstums Sa

Virsmas vidējais aritmētiskais augstums Sa raksturo mikroreljefa augstuma īpašības. Kā bija minēts 1.2. apakšnodaļā, ordinātu normālā sadalījuma likuma gadījumā šis parametrs tiek noteikts pēc 1.2. formulas. Ņemot vērā to, ka praksē virsmām ar neregulāru raksturu raupjuma ordinātas nav ideāli sadalītas pēc normālā sadalījuma likuma, svarīgi saprast, kādā veidā virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas asimetrija Ssk un ekscess Sku ietekmē vidējā nelīdzenumu augstuma Sa vērtības.

Gadījuma lauks $z(x,y)$ var tikt apskatīts kā normētais gadījuma lauks $z'(x,y)$. Ordinātu sadalījuma blīvums ar $E = 0$ un $D = 1$ var būt aproksimēts ar Edžvorta rindu [15]:

$$f_2(z') = f(z') - \frac{Ssk}{3!} \Phi^{(4)}(z') + \frac{(Sku - 3)}{4!} \Phi^{(5)}(z') - \dots, \quad (3.1.)$$

kur $f(z')$ – gadījuma lieluma z' normālais sadalījuma blīvums;

$\Phi^{(i)}(z')$ – Laplasa funkcijas i -ais atvasinājums.

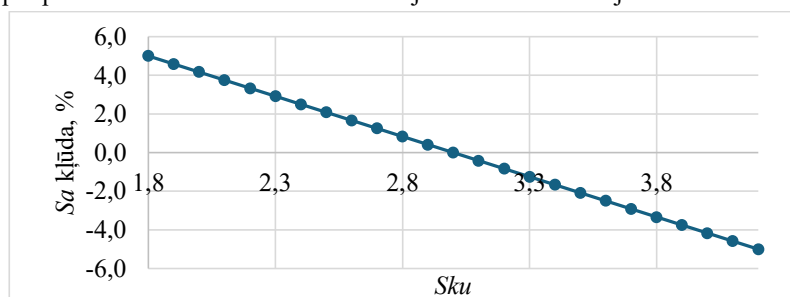
Balstoties sakarībā starp Laplasa funkcijas atvasinājumiem un Hermita polinomiem $H_n(p)$ [15], tika noteikti Laplasa funkcijas 4. un 5. atvasinājumi. Pēc pārveidojumiem tika iegūta šāda vidējā aritmētiskā augstuma aprēķinu formula:

$$E_2\{Sa\} = E\{Sa\} \times \left(1 - \frac{(Sku - 3)}{4!}\right). \quad (3.2.)$$

Ja virsmas ordinātu sadalījums likums ir normāls, tad 3.2. sakarība pāriet 1.2. sakarībā. Iegūtās sakarības analīze liecina par to, ka $E_2\{Sa\}$ vērtībā ir atkarīga no ekscesa koeficienta. Asimetrijas Ssk vērtības figurē procesa dispersijā un pie konstantas dispersijas Ssk neietekmē $E_2\{Sa\}$.

$$E_2\{Sa\} = Sq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \left(1 - \frac{(Sku - 3)}{4!}\right). \quad (3.3.)$$

3.5. attēlā redzams, ka ekscesa vērtības ietekme nav tik liela, jo Sku vērtības, lielākas par 1,2, izmaina raupjuma parametra Sa vērtību par 5 %. Taču raupjuma mērīšanas eksperimentu rezultāti liecina par to, ka Sku vērtības ir robežās no 2,7.....3,4, tāpēc teorētiski bez precizitātes zuduma par pamatu var izmantot normālā sadalījuma likuma funkciju.



3.5. att. Ordinātu sadalījuma funkcijas ekscesa ietekme uz raupjuma parametra Sa vērtību.

Nākamais etaps – salīdzināt vidējā aritmētiskā augstuma eksperimentāli noteiktās vērtības ar vērtībām, kas aprēķinātas pēc 1.2. un 3.2. vienādojuma.

3.1. tabula

Parametra Sa eksperimentālo un analītiski noteikto vērtību salīdzinājums

Apstrādes veids	N. p. k.	Sa_{eksp} , μm	Sa_{teor} , μm	Sa_{Rudz} , μm	$ \Delta Sa_{\text{teor}} $, %,	$ \Delta Sa_{\text{Rudz}} $, %,
Plakanslīpēšana	1.	0,0414	0,0413	0,0409	0,33	1,26
	2.	1,419	1,414	1,414	0,33	0,36
	3.	3,307	3,291	3,335	0,48	0,84
Apaļslīpēšana	4.	0,049	0,049	0,049	0,14	0,95
	5.	0,111	0,112	0,114	0,98	2,71
	6.	1,202	1,198	1,182	0,37	1,72
Elektroerozija	7.	0,733	0,728	0,726	0,76	1,08
	8.	1,199	1,197	1,184	0,14	1,26
	9.	2,905	2,904	2,892	0,05	0,47
Apšaušana ar skrotīm	10.	0,485	0,485	0,484	0,14	0,20
	11.	1,263	1,265	1,260	0,15	0,25
	12.	3,429	3,426	3,425	0,09	0,11
Apstrāde ar smilšstrūklu	13.	0,501	0,499	0,502	0,36	0,25
	14.	1,067	1,064	1,072	0,25	0,43
	15.	2,417	2,393	2,442	0,99	1,00
Pulēšana	16.	0,205	0,207	0,210	0,75	2,31
Lepēšana	17.	0,021	0,021	0,022	0,83	2,52

Pēc 3.1. tabulas datiem var secināt, ka vidējā aritmētiskā augstuma aprēķinātās vērtības pēc 3.2. vienādojuma precīzi sakrīt ar eksperimentāli noteiktām, novirze no teorētiskajām vērtībām ir mazāka par 1 %. Rēķinot raupjuma parametru Sa pēc 1.2. formulas, ja $Sku = 3$, novirze sasniedz 3 %.

3.2. vienādojums atšķiras no atbilstošās izteiksmes 2D parametra Ra noteikšanai tikai ar vidējo kvadrātisko novirzi. Ja tās vērtības būs vienādas gan laukam, gan procesam, tad var secināt, ka profila viduslīnija sakrīt ar virsmas vidusplaknes līmeni. 2. nodaļā bija pamatots, ka starp virsmas vidusplakni un profilu viduslīnijām ir noteikta nobīde. Lai pārbaudītu, kā šī nobīde ietekmē parametra Ra vērtības, visām paraugu sērijām pēc līmeņošanas *line by line* + *LS polynomial* tika noteikts Sa un 2D vidējais aritmētiskais augstums perpendikulāri (Ra_1) un paralēli (Ra_2) apstrādes pēdām, turklāt Ra_1 un Ra_2 lielumi ir visu X ass profilu un Y ass profilu vidējās vērtības.

Izpētes rezultāti liecina par to, ka profila parametra Ra vērtības virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām diezgan precīzi sakrīt ar parametra Sa vērtībām, maksimālā novirze sasniedz tikai 5 % robežu. Tas ir ļoti labs radītājs, pēc kura var secināt par profilu viduslīniju sakrīšanu ar virsmas vidusplaknes līmeni. Savukārt virsmām ar izteiktu anizotropiju parametra Ra vērtības virzienā paralēli apstrādes pēdām ļoti atšķiras no 3D vidējā aritmētiskā augstuma, novirze no Sa vērtībām sasniedz 34 %. To var izskaidrot ar Y ass profilu viduslīnijas un virsmas vidusplaknes savstarpējā izvietojuma novirzi.

3.3. Virsmas tekstūras indekss Str

Promocijas darbā tika pierādīts, ka anizotropijas izvērtēšanai ir lietderīgi izmantot standarta *EN ISO 25178-2* parametru Str – virsmas tekstūras indeksu, kas definēts kā attiecība starp korelācijas funkcijas $f_{ACF}(t_x, t_y)$ horizontālām distancēm, kas raksturojas ar funkcijas ātrāko un lēnāko dilšanu intervālā no 0 līdz 1. Šo definējumu var pierakstīt šādā veidā:

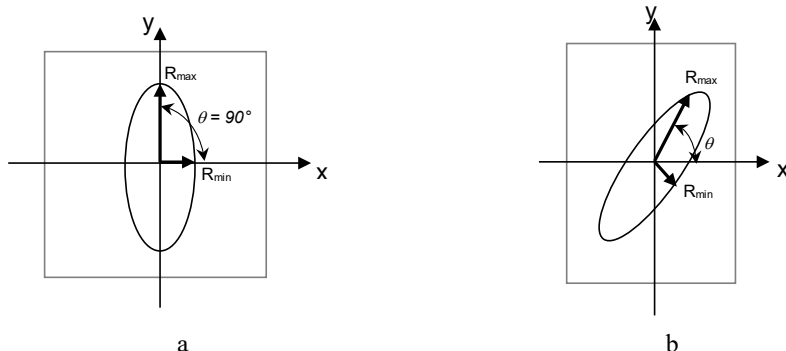
$$Str = \frac{t_x, t_y^{\min} \in R\sqrt{t_x^2 + t_y^2}}{t_x, t_y^{\max} \in R\sqrt{t_x^2 + t_y^2}}, \quad (3.4.)$$

$$Str = \frac{R_{\min}}{R_{\max}}, \quad (3.5.)$$

kur $R = \{(t_x, t_y): f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}$;

$R_{\min}, R_{\max}$ – korelācijas funkcijas centrālā izciļņa šķēluma galvenie rādiusi.

Virsmas korelācijas funkcija vispārīgā anizotropā virsmas raupjuma gadījumā var būt dažādi orientēta pret koordinātu asīm X, Y (3.6. att.).



3.6. att. Shematisks korelācijas funkcijas $R_{\max}$ un $R_{\min}$ izvietojums:

a – korelācijas funkcija ir orientēta pa X un Y asīm; b – korelācijas funkcija nav orientēta pa X un Y asīm.

Korelācijas funkcijas vērtības samazināšanās lielumu raksturo korelācijas garums Sal jeb $R_{\min}$. Tātad, ja pieņem, ka korelācijas funkcija $f_{ACF}(t_x, t_y)$ ir orientēta pa anizotropas raupjas virsmas pamatvirzieniem, tad $R_{\min} = \tau_{kx}$ X ass virzienā un $R_{\max} = \tau_{ky}$ Y ass virzienā, jo virzienā šķērsām apstrādes (berzes) pēdām virsmas profils ir ar lielāku nelīdzenumu blīvumu, pie kura arī korelācijas funkcija dilst ātrāk. Saskaņā ar 3.5. vienādojumu:

$$Str = \frac{\tau_{kx}}{\tau_{ky}}. \quad (3.6.)$$

Ir svarīgi atzīmēt, ka standartā *EN ISO 25178-2* autokorelācijas funkciju ir paredzēts noteikt pie līmeņa $0 \leq s \leq 1$ (parasti $s = 0,2$). Taču pie jebkura līmeņa s attiecība saglabā savu principiālo vērtību, tāpēc nezaudējot vispārīgo pieeju, 3.6. formulu var izmantot parametra Str

raksturošanai pie jebkuras s vērtības. Tad, izmantojot neregulāras raupjas virsmas profila korelācijas funkciju pētījumus [36], [37], monotoni dilstošai korelācijas funkcijai:

$$\tau_k = \frac{\tau_{kn}}{E\{n(0)\}}, \quad (3.7.)$$

kur τ_{kn} – korelācijas intervāla normētā vērtība; tā ir konstanta konkrētai korelācijas funkcijai [36];

$E\{n(0)\}$ – nulļu skaits uz garuma vienību.

Saskaņā ar 3.6. formulu dilstošai korelācijas funkcijai:

$$Str = \frac{E\{n_2(0)\}}{E\{n_1(0)\}}, \quad (3.8.)$$

kur indeksi 1 un 2 attiecīgi raksturo šķērsvirziena un garenvirziena profilus.

Starp nulļu skaitu uz garuma vienību un profila elementu vidējo platumu pastāv šāda sakarība:

$$E\{n(0)\} = \frac{2}{RSm}. \quad (3.9.)$$

Attiecīgi 3.8. vienādojumu var pārrakstīt šādā veidā:

$$Str = \frac{RSm_1}{RSm_2}. \quad (3.10.)$$

Salīdzinot iegūto vienādojumu ar 1.3. vienādojumu, tiek iegūts teorētiskais pamatojums virsmas tekstūras indeksa lietošanai virsmas anizotropijas novērtēšanā:

$$Str = C. \quad (3.11.)$$

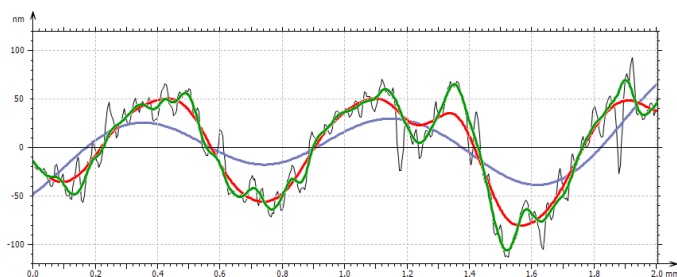
Ņemot vērā to, ka 3.11. vienādojums der gadījumiem, kad virsmas vidusplakne sakrīt ar profilu viduslīnijām, ir svarīgi precīzi noteikt RSm_2 vērtību virsmām ar neregulāru raksturu, jo, veicot līmeņošanas procedūru profilu viduslīnijām virzienā paralēli apstrādes pēdām, būs novirzes no vidusplaknes.

3.4. Profila elementu vidējais platums RSm

Standartā *ISO 21920-2* ir definēts, ka parametrs RSm tiek rēķināts pie noteiktiem sliekšņiem – pie 10 % no Rp (vidējā pīķu augstuma) un 10 % no Rv (vidējā ieplaku dziļuma), atskaitot no viduslīnijas pie standartizētā novērtēšanas garuma. Savukārt, kā minēts iepriekš, virsmām ar neregulāru raksturu ne visi profili ir derīgi raupjuma soļa novērtēšanai garenvirzienā, jo profila krustojumu skaits ar viduslīniju var būt nepietiekams, lai identificētu profila elementus. Taču eksistē daudz gadījumu, kad profila krustojumu skaits ar viduslīniju ir pārāk liels lokālo mikroizciļņu dēļ. Šajā gadījumā vidējā raupjuma soļa RSm_2 vērtības būs stipri samazinātas. Promocijas darba izstrādes gaitā tika noteikts, ka šīs problēmas risināšanai ir jāizvēlas atbilstošais sliekšnis, kas izslēgtu no raupjuma soļa nevajadzīgās komponentes, jo, palielinot sliekšni līdz 30–40 %, profilu RSm_2 vērtības sāk atbilst reālai ainai. Ņemot vērā to, ka katram profilam būs atšķirīgs sliekšnis, šajā darbā tika piedāvāts noteikt RSm_2 vērtību, izmantojot viļņainības soļi, jo tās lielums pie pareizi izvēlēta *cut-off* ir salīdzināms ar raupjuma profila elementu platumu. Svarīgi atzīmēt, ka šajā gadījumā viļņainības profils atspoguļo nevis formas

novirzi, kas rodas detaļas apstrādes laikā, bet tieši raupjuma soļa lielumu apstrādes pēdu virzienā. Ar funkcijas “*Filtered profiles*” palīdzību pastāv iespēja iegūt viļņainības profilu, izvēloties *Robust Gaussian filter*, ko neietekmē lokālie virsmas defekti, mērījumu troksnis, ekstrēmas iepakas un pīķi.

Lai pārbaudītu parametra WSm_2 vērtības atbilstību raupjuma solim RSm_2 , tika izvēlēti 100 profili, kuriem tika noteiktas RSm_2 vērtības pie sliekšņiem $H = 30\text{--}80\%$ un WSm_2 vērtības pie $H = 10\%$, izmantojot datorprogrammas aprēķinus. Izpētes rezultāti rāda, ka parametra WSm_2 vērtības ļoti labi sakrīt ar RSm_2 pie $H = 30\text{--}40\%$, atšķirība rezultātos ir mazāka par 5%. Savukārt rodas jautājums, kāda *cut-off* vērtība ir jāizvēlas, lai viļņainības profils nepazaudētu svarīgus elementus, un otrādi – neatkārtotu subraupjumu. 3.7. attēlā redzami viļņainības profili ar atšķirīgiem *cut-off*. Jo lielākā būs L filtra vērtība, jo platāks būs viļņainības solis.



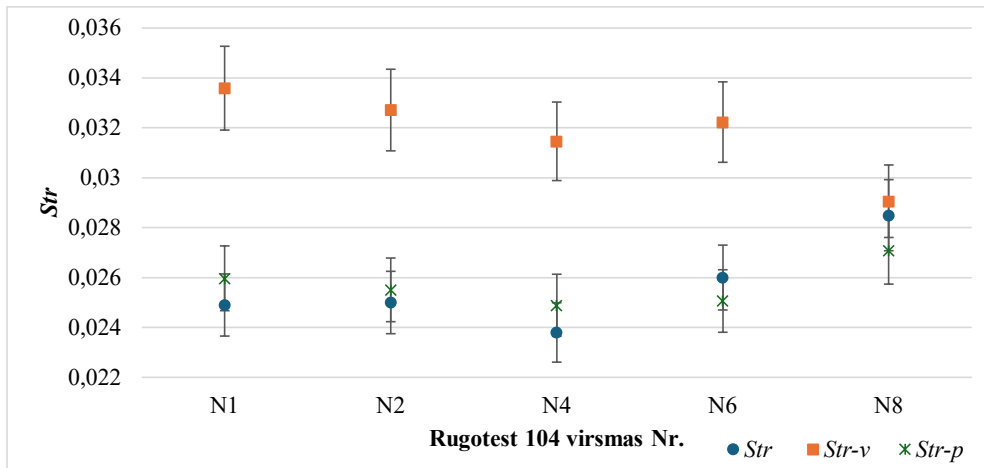
3.7. att. *Cut-off* lieluma ietekme uz viļņainības soli.

$\lambda_c = 0,08\text{ mm}$ (zaļā krāsā), $\lambda_c = 0,25\text{ mm}$ (sarkanā krāsā), $\lambda_c = 0,8\text{ mm}$ (zilā krāsā).

Pēc parametru RSm_2 un WSm_2 vērtību salīdzinājuma pie dažādiem *cut-off* tika secināts, ka viļņainības profiliem ir jāizvēlas tas *cut-off*, kas ir mazāks par standartizēto par vienu vienību.

Nākamais punkts bija WSm_2 vērtību salīdzinājums profiliem pēc 2D un 3D mērījumiem. Pamatojoties uz eksperimentāliem datiem, var secināt, ka profiliem palielinātā trases garumā parametra WSm_2 vērtības ir lielākas nekā pēc 3D mērījumiem, starpība veido 8–25% (vidēji 16%), ko var izskaidrot ar profilu viduslīniju novirzi no vidusplaknes. Rodas jautājums, kādu no WSm_2 vērtībām izvēlēties dilšanas intensitātes aprēķiniem. Šeit svarīgi atzīmēt raupjuma parametra Str (tekstūras indeksa) nozīmi. Promocijas darbā tika salīdzinātas nofiltrētās virsmas visu izvilktos X un Y ass profilu attiecība Str_v ar virsmas tekstūras indeksu Str un atsevišķi uzņemto profilu soļu RSm_{1_p} un WSm_{2_p} attiecība Str_p ar to pašu parametru Str . Šim nolūkam papildus tika veikti X ass profilu 2D raupjuma mērīšanas eksperimenti palielinātā trases garumā. Raupjuma soļa vērtību salīdzinājums perpendikulāri apstrādes pēdām liecina par to, ka RSm_1 vērtības pēc 3D un 2D mērījumiem ļoti precīzi sakrīt, atšķirība vērtībās ir maksimāli 5%. Attiecīgi var secināt, ka no virsmas izvilktos profilu RSm_{1_v} vērtības var izmantot virsmas anizotropijas novērtēšanā ($RSm_{1_v} \approx RSm_{1_p}$).

3.8. attēlā redzamas visas trīs tekstūras indeksa kombinācijas. Pēc grafika datiem var secināt, ka parametra WSm_{2_p} vērtības nodrošina pilnu sakritību starp raupjuma soļu attiecību un tekstūras indeksu Str .



3.8. att. Raupjuma soļu attiecības atbilstība virsmas tekstūras indeksam Str .

Balstoties pētījuma izstrādes gaitā iegūtajos rezultātos, tika piedāvāts virsmas raupjuma soļa noteikšanai paralēli apstrādes pēdām pie trases garuma $L = 5 l$ izmantot korekcijas koeficientu $k_{pr} = 1,16$, kas ņem vērā profilu viduslīniju novirzes no vidusplaknes. Attiecīgi raupjuma soli RSm'_2 var noteikt pēc 3.12. sakarības:

$$RSm'_2 = k_{pr} \times WSm_2. \quad (3.12.)$$

3.5. Materiāla tilpums Vm

Raupjas virsmas izcilņu tilpums līmenī c , atskaitot no vidusplaknes, ir ļoti svarīgs parametrs nodiluma aprēķinos. Virsmas materiāla tilpums pie noteiktā līmeņa izsaka deformētā materiāla apjomu berzes procesā. Standartā *ISO 25178-2* raupjuma parametrs Vm ir izteikts mm^3 uz laukuma vienību mm^2 , savukārt dilšanas intensitātes aprēķinos ir svarīgi zināt deformētā materiāla absolūto apjomu pie noteiktā līmeņa c , izteiktu mm^3 . Šim nolūkam ir lietderīgi izmantot programmatūras *MCubeMap Ultimate 10* funkciju “*Slices*”, ar kuras palīdzību tiek ģenerēta virsma, sadalīta divās daļās – materiāls un tukšumi. Izvēloties nepieciešamo līmeni (programmā apzīmēts ar “*threshold*”), pastāv iespēja iegūt vajadzīgās absolūtā materiāla tilpuma vērtības (*Volume of material*), izteiktas μm^3 .

Balstoties J. Rudziša pētījumos, vidējo materiāla tilpumu var iegūt analītiski, integrējot virsmas šķēsgriezuma laukumu $A(c)$ pa līmeņiem, atskaitot no vidusplaknes [37]:

$$Vm = \int_c^\infty A(c)dc, \quad (3.13.)$$

kur $A(c)$ – šķēsgriezuma laukums, mm^2 .

Integrējot šķēsgriezuma laukumu, kas nosakāms pēc Laplasa funkcijas, tiek iegūta nelīdzenumu tilpuma matemātiski sagaidāmā vērtība:

$$E\{Vm\} = Sq \times Aa \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0,5\gamma^2) - \gamma[1 - \Phi(\gamma)] \right\}, \quad (3.14.)$$

kur γ – relatīvais deformācijas līmenis.

$$\gamma = \frac{c}{Sq} \quad (3.15.)$$

3.14. izteiksme liecina par to, ka materiāla tilpums V_m mainās atkarībā no relatīvā deformācijas līmeņa γ . Mainoties γ no $-\infty$ līdz $+\infty$, materiāla apjoms samazinās. Ja γ vērtības ir $1 < \gamma < 3$, var uzskatīt, ka deformēta materiāla tilpums nemainās pēc lineāra likuma.

Materiāla tilpuma aprēķini un salīdzinājums ar eksperimentāliem datiem tika veikts visiem pētāmiem paraugiem (3.2. tab.). Rezultāti rāda, ka pie deformācijas līmeņiem $\gamma = -3 \dots 0$ materiāla tilpuma eksperimentālās un teorētiskās vērtības ļoti precīzi sakrīt, relatīvā novirze $|\Delta V'_m| < 4 \%$. Ja $\gamma = 1$, vairākiem paraugiem atšķirība ir $< 10 \%$, savukārt, ja deformācijas līmenis $\gamma > 1$, starpība starp aprēķināto un eksperimentāli noteikto vērtību dažos gadījumos sasniedz 100% . Tas varētu būt izskaidrojams ar parauga virsmas nepietiekamo mērīšanas laukumu; eksperimentāli noteiktais materiāla tilpums V'_m , ja $\gamma > 1$, ir mazāks par teorētisko.

3.2. tabula

Raupjuma parametra V_m aprēķināto un teorētisko vērtību salīdzinājums pie atšķirīgiem deformācijas līmeņiem

Paraugšs	N.p. k.	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = -3$, %	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = -2$, %	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = -1$, %	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = 0$, %	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = 1$, %	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = 2$, %	$ \Delta V'_m $, ja $\gamma = 3$, %
Plakanslīpēšana	1.	0,07	0,18	0,15	-0,15	-2	-36	-78
	2.	0,05	0,26	1,04	0,36	-15	-60	-86
	3.	0,02	0,57	2,02	-1,82	-25	-65	-96
Apašlīpēšana	4.	0	0	1	1	-4	-37	-70
	5.	0,18	0,83	1,58	-3,74	-25	-46	-68
	6.	0	0	1	2	-8	-50	-100
Elektroerozija	7.	0,02	0,25	1,25	1,06	-10	-70	-99
	8.	-0,01	-0,01	0,42	1,21	-6	-42	-93
	9.	0,00	0,04	0,23	0,44	-4	-26	-78
Apšaušana ar skrotīm	10.	0,01	0,01	0,18	0,07	-3	-8	0
	11.	0,01	-0,03	0,14	0,21	-1	-9	-51
	12.	0,02	0,20	1,04	0,10	-10	-51	-95
Apstrāde ar smilšstrūklu	13.	0,03	3,04	0,94	-0,15	5	-59	-66
	14.	0,03	0,24	0,84	-0,36	3	-43	-86
	15.	0,04	0,30	0,87	-1,52	-9	-14	198
Pulēšana	16.	0	0	1	-2	-7	4	-99
Lepēšana	17.	0	0	-1	-2	5	56	290

3.6. Secinājumi

Rezultāti attiecībā uz virsmas neregulārā raupjuma modeļa atbilstību normālam sadalījuma likumam

- Virsmām ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījums neatbilst normālam sadalījuma likumam pēc 3D asimetrijas kritērija Ssk , novirze sasniedz 100 %.
- Virsmām ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījums atbilst normālam sadalījuma likumam pēc 3D ekscesa kritērija Sku , maksimālā novirze – 13 %.
- Virsmas X ass un Y ass profilu raupjuma parametru Rsk un Rku vērtības sakrīt ar Ssk un Sku tikai izotropām virsmām, anizotropām – Y ass virzienā novirzes no 3D vērtībām sasniedz 100 %.
- Pie palielinātā mērījumu trases garuma Y ass profila ordinātu sadalījuma asimetrija Rsk un ekscess Rku atbilst virsmas 3D raupjuma vērtībām.

Rezultāti attiecībā uz vidējo aritmētisko augstumu Sa

- Raupjuma parametra Sa matemātiskai noteikšanai un prognozēšanai jāizmanto 3.3. izteiksme, kurā tiek iekļauta ordinātu sadalījuma funkcijas ekscesa vērtība. Atšķirība starp aprēķinātām un eksperimentāli noteiktām vērtībām ir mazāk par 1 %.
- Parametra Ra vērtībām perpendikulāri apstrādes pēdām ir minimālā novirze no 3D parametra Sa vērtības (līdz 5 %), kas apstiprina X ass profilu viduslīniju un vidusplaknes savstarpējā izvietojuma sakritību pēc līmeņošanas *line by line* + *LS-polynomial*.
- Parametra Ra vērtībām paralēli apstrādes pēdām ir ievērojamas novirzes no 3D parametra Sa vērtības (līdz 34 %), kas ir izskaidrojams ar Y ass profilu viduslīniju nobīdi no vidusplaknes.

Rezultāti attiecībā uz virsmas anizotropiju

- Standarta *ISO 25178-2* virsmas tekstūras indekss Str atbilst anizotropijas koeficientam C un izsaka attiecību starp raupjuma soļiem perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām.

Rezultāti attiecībā uz virsmas raupjuma soli RSm_2

- Virsmas raupjuma soļa noteikšanai virzienā paralēli apstrādes pēdām jāizmanto viļņainības soļa vērtība WSm_2 pie sliekšņa $H = 10$ %.
- Pie parametra WSm_2 noteikšanas ir jāizvēlas tas *cut-off*, kas ir mazāks par standartizēto par vienu vienību (atkarībā no parametra Sa vērtības).
- Nosakot vidējā raupjuma soļa RSm_2' vērtību profiliem, kas uzņemti pie $L = 5$ l, jāizmanto korekcijas koeficients $k_{pr} = 1,16$.

Rezultāti attiecībā uz materiāla tilpumu Vm

- Materiāla tilpuma Vm matemātiskai noteikšanai un prognozēšanai jāizmanto 3.14. izteiksme.
- Eksperimentāli noteiktās materiāla tilpuma Vm vērtības, ja $\gamma > 1$, ir mazākas par teorētiskām, kas varētu būt izskaidrojams ar parauga virsmas nepietiekamo mērīšanas laukumu, kas tiks pārbaudīts 5. nodaļā.

4. RAUPJUMA PARAMETRU NOTEIKŠANAS PRECIZITĀTE

Raupjuma parametru praktiskais lietojums prasa to precīzu noteikšanu eksperimentālā ceļā. Virsmas raupjuma mērīšanas precizitāte ir saistīta ar virsmas novērtēšanas laukuma izmēru noteikšanu. Praksē novērtēšanas laukums ir ierobežots ar parauga izmēriem un mērīšanas iekārtas specifikāciju, tāpēc ir jānosaka optimālais mērīšanas laukums un nepieciešamais eksperimentu skaits, kas nodrošinātu pietiekamu precizitāti inženieraprēķinu veikšanai. Inženieraprēķinos pieļaujamā relatīvā kļūda ε nedrīkst būt lielāka par 0,1, un ticamības varbūtība β parasti ir 0,8–0,95 robežās. Attiecīgi promocijas darbā raupjuma parametru mērīšanas precizitāte tika noteikta, ja $\varepsilon = 0,1$ un $\beta = 0,9$.

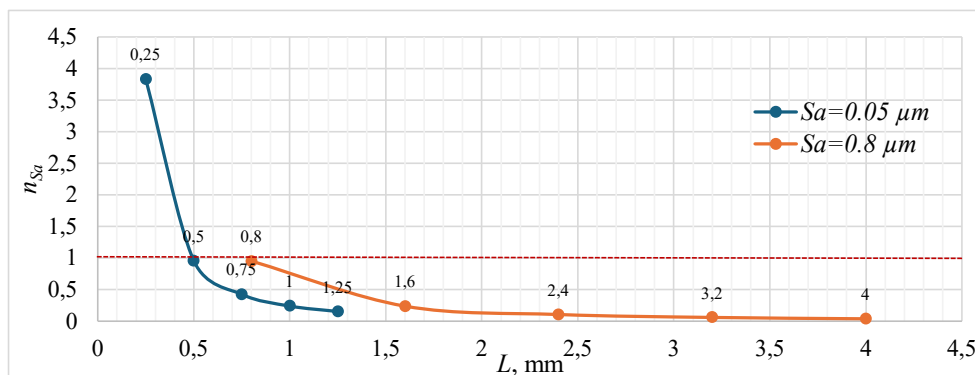
4.1. Vidējais aritmētiskais augstums Sa

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra Sa precīzai noteikšanai tiek rēķināts šādā veidā [36]:

$$n_{Sa} = \frac{t_{\beta^2 \times \pi}}{4 \times \varepsilon^2 \times Str \times \alpha_1 \times Aa}, \quad (4.1.)$$

kur α_1 – korelācijas funkcijas aproksimācijas parametrs virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām.

4.1. attēlā redzami grafiki, kuros ir atspoguļotas parametra Sa mērījumu skaita vērtības atkarībā no trases garuma L (jeb mērīšanas laukuma malas garuma) anizotropām virsmām. Katram grafikam ir izcelti pieci posmi, kas atbilst trases garuma izmēram L , kas ietver 1; 2; 3; 4 vai 5 bāzes garumus l . Atkarībā no Sa vērtības mainās bāzes garuma vērtība atbilstoši standarta ISO ISO 21920-2 datiem. Pēc grafika var secināt, ka ļoti gludām virsmām ar $Sa < 0,05 \mu\text{m}$ minimālam trases garumam L jābūt vienādam diviem bāzes garumiem, lai sasniegtu nepieciešamo parametra Sa precizitāti viena mērījuma ietvaros. Savukārt virsmām ar $Sa > 0,05 \mu\text{m}$ precīzi mērījumi, ja $n_{Sa} = 1$, tiks sasniegti, izvēloties mērīšanas laukumu ar malu, kas vienāda ar vienu bāzes garumu.



4.1. att. Parametra Sa mērījumu skaits atkarībā no trases garuma anizotropām virsmām;

$$\varepsilon = 0,1; \beta = 0,9.$$

4.2. Profila elementu vidējais platums RSm

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra RSm noteikšanai tiek rēķināts pēc 4.2. formulas:

$$n_{RSm} = \frac{t_{\beta^2 \pi \sqrt{\pi}}}{4 \times \varepsilon^2 \times L \sqrt{\alpha}}. \quad (4.2.)$$

Raupjuma parametra RSm mērījumu precizitātes aprēķinu rezultāti visām pētāmām plakanslīpētām virsmām X ass un Y ass virzienos, ja $\varepsilon = 0,1$ un $\beta = 0,9$, ir apkopoti 4.1. tabulā. Pēc profilogrammām noteiktās $N(0)$ vērtības vēlreiz tiek pierādīts fakts, ka, jo mazāka ir Sa vērtība, jo smalkāks ir nelīdzenumu solis un attiecīgi lielāks profila krustojumu skaits ar viduslīniju trases garumā. Turklāt virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām $N(0)$ skaits ir apmērām 30 reizes lielāks nekā paralēli apstrādes pēdām, kas vēlreiz liecina par plakanslīpēto virsmu anizotropiju.

4.1. tabula

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra RSm noteikšanai plakanslīpētām virsmām, ja $\varepsilon = 0,1$ un $\beta = 0,9$

Paraugs	Sa , μm	Virziens	l , mm	L , mm	$N(0)$	α , mm^{-2}	n_{RSm}	Ll mērījumam, mm
Rugotest 104, N1	0,025	X	0,25	1,25	150	70989	2	1,41
		Y			5	79	34	42,28
Rugotest 104, N2	0,05	X	0,25	1,25	175	96624	1	1,21
		Y			5	79	34	42,28
Rugotest 104, N4	0,2	X	0,8	4	136	5699	2	4,97
		Y			4	4,9	43	169,12
Rugotest 104, N6	0,8	X	0,8	4	130	5207	2	5,20
		Y			4	4,9	43	169,12
Rugotest 104, N8	3,2	X	2,5	12,5	185	1079	1	11,5
		Y			6	1,13	29	352,33

Pēc parametra RSm mērījumu precizitātes noteikšanas rezultātiem var secināt, ka virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām ir nepieciešams veikt 1–2 2D profila mērījumus, savukārt Y ass virzienā – vairāk par 30 mērījumiem, lai iegūtu ticamas RSm vērtības, ja trases garums $L = 5 l$. Veicot vienu mērīšanas eksperimentu virzienā paralēli apstrādes pēdām, ja $\varepsilon = 0,1$ un $\beta = 0,9$, nepieciešams ievērojami liels trases garums, taču ne visos gadījumos parauga izmēri ir pietiekami, lai uzņemtu garu profilogrammu.

3D raupjuma mērījumu gadījumā vairāki profili tiek uzņemti viena eksperimenta ietvaros, attiecīgi teorētiski nav jāveic papildu eksperimenti RSm_2 precizitātes nodrošināšanai. Profilu skaits X ass virzienā veido vairākus tūkstošus, Y ass virzienā – vairākus simtus. Tas nozīmē, ka viens 3D raupjuma mērījums ietver aprēķināto n_{RSm} profilam.

4.3. Materiāla tilpums V_m

Materiāla tilpuma V_m nepieciešama mērījumu skaita n_{Vm} noteikšanai tika izmantota 4.3. sakarība:

$$n_{Vm} = \frac{t_{\beta}^2 \times 2\pi \times ([1 - \Phi(\gamma)]^2 + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i^2} [\Phi^{(i-1)}(\gamma)]^2)}{\varepsilon^2 \times L^2 \times Str \times \alpha_1 \times \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\gamma^2}{2}} - \gamma [1 - \Phi(\gamma)] \right)^2}. \quad (4.3.)$$

4.2. tabulā apkopoti nepieciešamie dati plakanslīpētās virsmas n_{Vm} noteikšanai, ja $\varepsilon = 0,1$ un $\beta = 0,9$, atkarībā no deformācijas līmeņa γ un trases garuma L .

4.2. tabula
Nepieciešamais mērījumu skaits parametra V_m noteikšanai pie atšķirīgiem deformācijas līmeņiem

<i>N. p. k.</i>	<i>L</i>	<i>Str</i>	$N_l(0)$	α_l	γ	n_{Vm}
1.	0,25	0,025	34	91181,6	1	144
2.	0,5		68	91181,6		36
3.	0,75		102	91181,6		16
4.	1		136	91181,6		9
5.	1,25		170	91181,6		6

<i>N. p. k.</i>	<i>L</i>	<i>Str</i>	$N_l(0)$	α_l	γ	n_{Vm}
1.	0,25	0,025	34	91181,6	2	482
2.	0,5		68	91181,6		120
3.	0,75		102	91181,6		54
4.	1		136	91181,6		30
5.	1,25		170	91181,6		19

<i>N. p. k.</i>	<i>L</i>	<i>Str</i>	$N_l(0)$	α_l	γ	n_{Vm}
1.	0,25	0,025	34	91181,6	3	1660
2.	0,5		68	91181,6		412
3.	0,75		102	91181,6		185
4.	1		136	91181,6		103
5.	1,25		170	91181,6		65

Pēc 4.2. tabulas datiem var secināt, ka precīzai materiāla tilpuma V_m noteikšanai pat tad, ja mērīšanas laukuma izmēri ir standartizēti, ir jāveic vairāki atsevišķi 3D raupjuma mērījumi. Turklāt, palielinoties deformācijas līmenim, mērīšanas eksperimentu apjoms pieaug vairākas reizes. Tas ir pierādījums, kāpēc 3.5. apakšnodaļā parametra V_m eksperimentālajām vērtībām bija ievērojamas novirzes no aprēķinātajām.

4.4. Secinājumi

- Raupjuma parametru Sa , RSm_1 un RSm_2 noteikšanas precizitāte, ja relatīvā kļūda ir 0,1 un ticamības varbūtība ir 0,9, būs nodrošināta ar vienu 3D raupjuma mērījumu pie standartizētā trases garuma, kas veido piecus bāzes garumus.
- Materiāla tilpuma Vm noteikšanas precizitātes nodrošināšanai, ja relatīvā kļūda ir 0,1 un ticamības varbūtība ir 0,9, ir jāveic no seši līdz 65 3D raupjuma mērījumiem atkarībā no deformācijas līmeņa.

4.5. Rekomendācijas raupjuma parametru noteikšanai

Izstrādātās rekomendācijas ir piemērotas raupjuma parametru Sa , RSm_1 , RSm_2 , Str , Vm kompleksai eksperimentālai un analītiskai noteikšanai virsmām ar neregulāru raksturu un izteikto anizotropiju.

1. Pirms virsmas 3D ģeometrijas uzņemšanas:

- 1.1. jāizvēlas mērīšanas laukuma (kvadrāta) malas izmērs, kas atbilst pieciem bāzes garumiem; bāzes garums jāizvēlas atkarībā no iepriekš noteiktās vai jau zināmas Ra/Sa vērtības pēc ISO 21920 standarta datiem;
- 1.2. atkarībā no mērīšanas laukuma izmēriem jāizvēlas atbilstošais attālums starp virsmas punktiem pa X un Y asīm un punktu skaits, ņemot vērā mēriekārtas specifikāciju un mērīšanas eksperimenta ierobežojums (piemēram, maksimālo punktu skaitu);
- 1.3. jānodrošina topogrāfijas uzņemšana perpendikulāri apstrādes pēdām; ja parauga izmēri ir mazāki par pieciem bāzes garumiem, jāveic papildu eksperimenti; to skaits atkarībā no parametra jāaprēķina pēc formulām, kas publicētas 4. nodaļā.

2. Pēc virsmas 3D ģeometrijas uzņemšanas:

- 2.1. jāveic virsmas līmeņošana, izmantojot funkciju *leveling line-by-line* kopā ar 1. vai 2. kārtas polinomu;
- 2.2. parametra Sa noteikšanai jāizvēlas attiecīga datoroperācija “*calculate*”;
- 2.3. parametru RSm jānosaka starp visiem profiliem X ass un Y ass virzienos, izmantojot funkciju “*extract all profiles*” un izvēloties attiecīgo profilu virzienu;
- 2.4. parametra RSm_1 noteikšanai visiem X ass profiliem jāizmanto datoroperācija “*calculate*” → standarts ISO 21920 → un sliekšnis 10 %;
- 2.5. parametra RSm_2 noteikšanai pastāv divi varianti:
 - 2.5.1. parametrs RSm_2 jānosaka, izmantojot virsmas tekstūras indeksu Str pēc 3.10. vienādojuma;
 - 2.5.2. no nolīmeņotās virsmas jāizvelk visi Y ass profili; izmantojot datorprogrammas funkciju “*calculate*” → standarts ISO 21920, jāizvēlas “*Waviness*” profils ar *cut-off* par vienu vienību mazāku nekā bāzes garums → sliekšnis 10 ; jāaprēķina RSm_2 , izmantojot korekcijas koeficientu k_{pr} ;
- 2.6. parametra Str noteikšanai jāizvēlas attiecīga datoroperācija “*calculate*”;
- 2.7. parametra Vm noteikšanai pie konkrētā deformācijas līmeņa jāizvēlas funkcija “*slices*”; ievadot vajadzīgo līmeni – $1Sq$, $2Sq$ utt., jānolasa “*volume of material*” vērtība.

5. VIRSMAS DILŠANAS INTENSITĀTES UN NODILUMA NOTEIKŠANA

Promocijas darbā tika veikta virsmu kontaktēšanas procesa un nodilumizturības analīze ar pieņēmumu, ka viena virsma ir pilnīgi gluda un cieta, kas izslēdz nepieciešamību noteikt virsmas kontaktēšanas varbūtību, kas rada sarežģītu aprēķinu nepieciešamību. Saskaņā ar [6], dilšanas intensitāte I_h tiek noteikta pēc 5.1. vienādojuma:

$$I_h = \frac{V'}{n \times d \times Aa}, \quad (5.1)$$

kur V' – deformētā materiāla tilpums, mm^3 ;
 n – ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai;
 d – kontakta garums, mm .

Inženieruzdevumu risināšanas sākumā ir svarīgi noteikt, kā deformēsies pētāmas virsmas mikroizciļņi – pārsvarā elastīgi vai plastiski. Kontakta laukums lielākā mērā raksturojas ar virsmas mikroizciļņu spēju elastīgi deformēties, ko var aprakstīt ar kontakta veida kritēriju KK [37]:

$$KK = \frac{RSm_1 \times \theta \times H}{Sa}, \quad (5.2.)$$

kur θ – materiāla elastības konstante, MPa^{-1} ;
 H – cietība, MPa .

Materiāla elastības konstante tiek aprēķināta pēc 5.3. formulas:

$$\theta = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi \times E_2}, \quad (5.3.)$$

kur μ – Puasona koeficients;
 E – elastības modulis, MPa .

Ja kontakta veida kritērija vērtība ir $\geq 1,74$, tad izpildās elastīgas deformācijas nosacījums, bet, ja $KK \leq 0,7$, kontakts ir plastisks.

Dilšanas intensitātes noteikšana saskaņā ar 5.1. vienādojumu prasa arī kontakta izmēra izpēti, kas tiek izteikts kā reāla kontakta laukuma garums d berzes virzienā [57]:

$$d = RSm[1 - \Phi(\gamma)]e^{\frac{\gamma^2}{2}}. \quad (5.4.)$$

Deformācijas līmenis γ un ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai tiek noteikts atkarībā no kontakta veida – elastīgā vai plastiskā.

Analizējot 5.1. vienādojumu, var secināt, ka nav nepieciešamības meklēt deformētā materiāla tilpuma precīzu vērtību, jo V' jebkurā gadījumā tiks nokoriģēts ar pusempīrisko lielumu n – ciklu skaitu līdz materiāla sagraušanai. Tāpēc parametra V' vietā var izmantot standarta *ISO 25178-2* parametru Vm (pēc funkcijas “slices” lietošanas), kas noteikts konkrētam deformācijas līmenim.

5.1. Nodiluma aprēķins elastīgā kontakta gadījumā

Pēc elastīgā kontakta veida definēšanas nākamais solis ir deformācijas līmeņa γ noteikšana:

$$F_1(\gamma) = \left(\frac{q_{el} \times \theta_{sum}}{k_{el}} \right) \times \left(\frac{RSm_1}{Sa} \right), \quad (5.5.)$$

kur $F_1(\gamma)$ – tabulēta funkcija [37];

q_{el} – slodze, MPa;

k_{el} – koeficients, kas ir atkarīgs no virsmas tekstūras indeksa Str [37];

θ_{sum} – summāra materiāla elastības konstante, MPa^{-1} .

Summāro elastīgo konstanti aprēķina, ņemot vērā abu kontaktējošo detaļu fizikāli mehāniskos raksturlielumus:

$$\theta_{sum} = \frac{1-\mu_1^2}{\pi \times E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi \times E_2}. \quad (5.6.)$$

Pēc funkcijas $F_1(\gamma)$ aprēķinātās vērtības nosaka deformācijas līmeni γ [37]. Ciklu skaitu līdz materiāla sagraušanai pēc dažiem pārveidojumiem var izteikt ar 5.7. vienādojumu [6]:

$$n_{el} = \left(\frac{3\theta\sigma_0}{4kf\sqrt{2\pi(4\gamma-\gamma^2)}} \times \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{el}}, \quad (5.7.)$$

kur k – konstanta, atkarīga no to berzes un nogurumu raksturlielumiem [6];

f – berzes koeficients;

σ_0 – materiāla ilgzturības spriegumu robežvērtība, MPa;

t_{el} – noguruma līknes parametrs [6].

Dilšanas intensitāti elastīgā kontakta gadījumā tiek piedāvāts rēķināt pēc 5.8. formulas:

$$I_{h_{el}} = \frac{V_m}{\left(\frac{3\theta\sigma_0}{4kf\sqrt{2\pi(4\gamma-\gamma^2)}} \times \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{el}} \times RSm_2 [1-\Phi(\gamma)] e^{\frac{\gamma^2}{2}} \times Aa}. \quad (5.8)$$

Pēc 5.8. vienādojuma var secināt, ka berzes koeficienta izmaiņas rada ievērojamas dilšanas intensitātes izmaiņas, it īpaši, ja $f=0,2..0,3$. Nodilums palielinās līdz ar elastības moduļa palielināšanos, turklāt, palielinoties Puasona koeficienta μ vērtībām, dilšanas intensitāte samazinās. Parametra σ_0 palielināšanās samazina nodiluma lielumu jo vairāk, jo lielāks ir noguruma līknes parametrs t . Dilšanas intensitāte ir atkarīgā no detaļas vidējā aritmētiskā augstuma Sa un raupjuma soļiem RSm_1 un RSm_2 . Analīze liecina par to, ka Sa vērtības samazināšana un RSm vērtību palielināšana pazemina dilšanas intensitāti, jo šajā gadījumā virsmas nelīdzenumiem ir lēzens raksturs.

5.2. Nodiluma aprēķins plastiskā kontakta gadījumā

Plastiskā kontakta gadījumā deformācijas līmenis γ tiek noteikts pēc funkcijas $F_2(\gamma)$ aprēķinātās vērtības:

$$F_2(\gamma) = \frac{q_{plast.}}{H \times k_{plast}}, \quad (5.9.)$$

kur $F_2(\gamma)$ – tabulētas funkcija [37];

q_{plast} – slodze, MPa;

k_{plast} – koeficients, kas ir atkarīgs no virsmas tekstūras indeksa Str [37].

Pēc funkcijas $F_2(\gamma)$ aprēķinātās vērtības tiek noteikts deformācijas līmenis γ [37]. Ciklu skaits šajā gadījumā tiek izteikts ar 5.10. vienādojumu [6]:

$$n_{plast} = \left(\frac{e_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_T - 2fH}{\sigma_T + 2fH}} \times \frac{1}{\pi(4\gamma - \gamma^2)} \times \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{plast}}, \quad (5.10.)$$

kur σ_T – materiāla tecēšanas robeža, MPa;

t_{plast} – noguruma līknes parametrs [6].

Dilšanas intensitāti plastiskā kontakta gadījumā tiek piedāvāts rēķināt pēc 5.11. formulas:

$$I_{h_plast} = \frac{V_m}{\left(\frac{e_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_T - 2fH}{\sigma_T + 2fH}} \times \frac{1}{\pi(4\gamma - \gamma^2)} \times \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{plast}} \times RSm_2 [1 - \Phi(\gamma)] e^{\frac{\gamma^2}{2} \times Aa}}. \quad (5.11.)$$

Lineāra nodiluma lielums h tiek izteikts ar 5.12. formulu:

$$h = I \times L_{ber}, \quad (5.12.)$$

kur L_{ber} – berzes ceļš, mm.

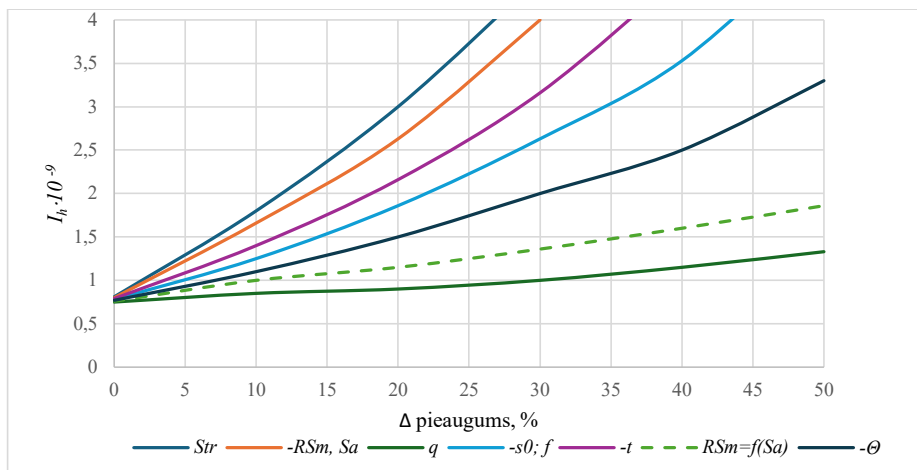
$$L_{ber} = V \times t, \quad (5.13.)$$

kur V – gājiena ātrums, m/s;

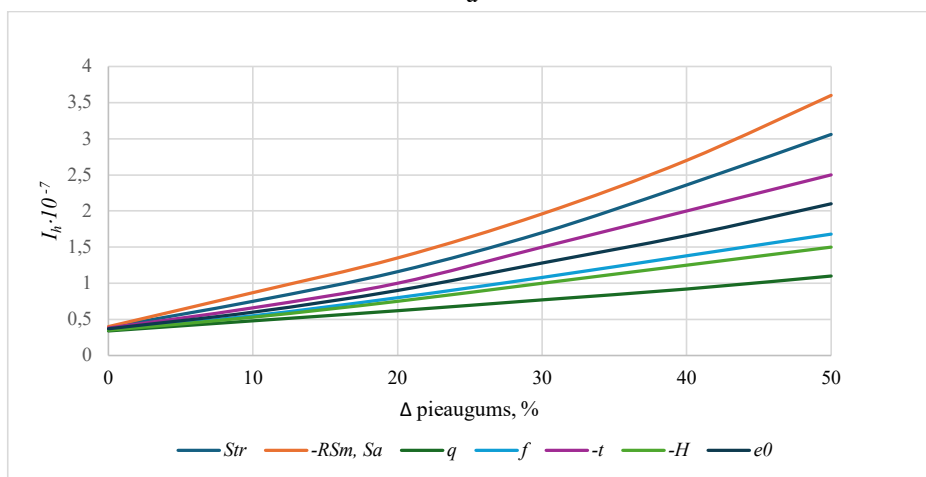
t – darba laiks, s.

Tātad plastiskā kontakta gadījumā nozīmīga ietekme ir berzes koeficientam f . Ja berzes koeficients $f > 0,2$, notiek dilšanas intensitātes strauja palielināšanās. Turklāt, palielinoties parametra σ_T vērtībai, dilšanas intensitāte samazinās. Palielinoties cietībai H un samazinoties spriegumam q , dilšanas intensitāte arī samazinās. Nodiluma lieluma jutīgums pret Sa/RSm attiecību ir mazāks, salīdzinot ar elastīgo kontaktu, ko var izskaidrot ar papildu saiti starp virsmas raupjuma parametriem un deformācijas līmeni γ .

Diezgan svarīgi ir salīdzināt dažādu parametru ietekmi uz dilšanas intensitāti, nosakot tās īpatnējo svaru. Šim nolūkam tika konstruētas sakarības, kas atspoguļo dažādu parametru ietekmi uz dilšanas intensitāti elastīgā un plastiskā kontakta gadījumos, kā tas redzams 5.1. a un b attēlā. Tajos ir parādītas parametru vērtību izmaiņas un tiem atbilstošais I_h pieaugums.



a



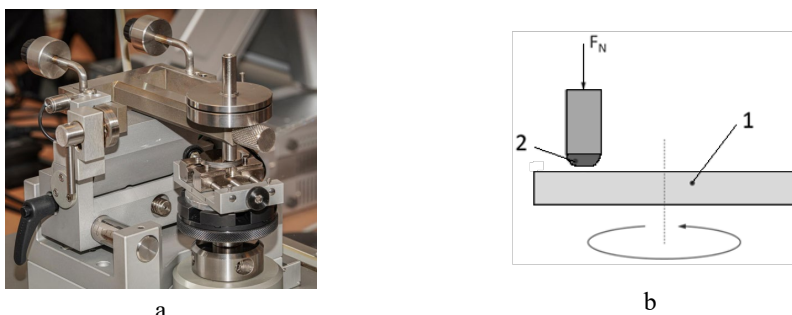
b

5.1. att. Parametru izmaiņas ietekme uz dilšanas intensitāti I_h :
a – elastīgā kontakta gadījumā; b – plastiskā kontakta gadījumā.

Ja tiek pieņemts, ka nodilumu ietekmējošo parametru vērtības izmainās neatkarīgi cita no citas, var secināt, ka dilšanas intensitāti visvairāk ietekmē raupjuma parametri. Šādus rezultātus var izskaidrot ar korelāciju starp atsevišķiem parametriem. Šāda saite ir parametriem Sa un RSm , Sa un f u. c. Raupjuma parametriem Sa un RSm ir vienāda, bet pretēja ietekme uz I_h izmaiņām, un tas nozīmē, ka nodilumizturības paaugstināšanai ir nepieciešams samazināt nelīdzenumu augstumu Sa vai palielināt raupjuma soli RSm .

5.3. Analītisko aprēķina rezultātu un berzes eksperimentā iegūto datu salīdzinājums

Lai pārbaudītu nodiluma noteikšanas modeļa pareizību, ir nepieciešams salīdzināt analītiskā aprēķina rezultātus ar eksperimentālajiem datiem. Šim nolūkam tika veikta berzes pāra tērauds (102Cr6)-bronzas (CW307G) testēšana uz tribometra *CSM Instruments* pēc shēmas lode-disks [17]. Berzes eksperimenta shēma un tam nepieciešamais aprīkojums redzams 5.2. attēlā. Lodītes virsma pirms berzes eksperimenta bija noslīpēta, lai būtu nodrošināts konstants nominālais kontakta laukums starp lodītes virsmu un rotējošo disku.



5.2. att. Berzes eksperimenta attēlojums:
a – tribometrs *CSM Instruments*; b – testēšana pēc shēmas lode (2)-disks (1).

Lineārā nodiluma noteikšanai tika veikti pieci eksperimenti ar diska rotācijas ātrumu $v = 0,3$ m/s un pielikto slodzi $q = 1,45$ MPa, un aprēķināta vidējā vērtība. Nodiluma aprēķinam bija nepieciešams izpētīt tribotreka šķērsriezuma laukumu. Šim nolūkam datorapstrādes programmā *McubeMapUltimate 10* tika veikti tribotreka profilu mērījumi četrās vietās.

Nākamais solis bija berzes pāra tērauds-bronzas dilšanas intensitātes un nodiluma aprēķins. Nodilums tika analītiski noteikts bronzas diskam pēc piestrādes stadijas. Konstruktīvie raksturlielumi atbilst berzes eksperimenta iestatījumiem. Raupjuma parametru Sa , Str , RSm_1 , RSm_2 vērtības atbilst eksperimentāli noteiktām pēc piestrādes stadijas. Fizikāli mehāniskie un berzes-noguruma raksturlielumi bija noteikti pēc materiālu standartiem un rokasgrāmatām.

- 1) Pirmkārt, tika noteikta materiāla elastības konstante:

$$\theta = \frac{1-0.34^2}{1.15 \times 10^5} = 0.24 \times 10^{-5} (\text{MPa}^{-1}).$$

- 2) Attiecīgi kontakta veida kritērijs KK :

$$KK = \frac{0.035 \times 0.24 \times 10^{-5} \times 200}{1.7 \times 10^{-3}} = 0,01.$$

Tika pieņemts, ka šajā gadījumā tiek nodrošināts **plastiskais kontakts** ($KK \leq 0,7$).

- 3) Relatīvais deformācijas līmenis γ plastiskā kontakta gadījumā tika noteikts šādi:

$$F_2\{\gamma\} = \frac{1,45}{200 \times 1.147^*} = 0,63 \times 10^{-2}.$$

* $k_{plast} = 1,147$ – tabulēta vērtība, iegūta pie $Str = 0,03$.

Šajā gadījumā aprēķinātais līmenis $\gamma = 2,5$.

4) Ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai:

$$n_{plast} = \left(\frac{0,39}{2\pi} \sqrt{\frac{360-2 \times 0,18 \cdot 200}{360+2 \times 0,18 \cdot 200}} \times \frac{1}{\pi(4 \times 2,5-2,5^2)} \times \frac{1,16}{1,7 \times 10^{-3}} \right)^2 = 4699.$$

5) Kontakta laukuma garums:

$$d = 1,16 \times [1 - \Phi(2,5)] e^{\frac{2,5^2}{2}} = 0,135(\text{mm}).$$

6) Deformētā materiāla tilpums:

$$Vm = 3,46 \times 2,15 \times 10^{-3} \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{2,5^2}{2}} - 2,5[1 - \Phi(2,5)] \right\} = 1,49 \times 10^{-5}(\text{mm}^3).$$

7) Dilšanas intensitāte:

$$I_h = \frac{1,49 \times 10^{-5}}{4699 \times 3,46 \times 0,135} = 5,62 \times 10^{-9}.$$

8) Berzes ceļš tika noteikts pēc rotācijas ātruma un darba laika:

$$L_{tr} = 0,3 \times 13334 = 4000 (\text{m}).$$

9) Lineārais nodilums:

$$h = 5,62 \times 10^{-9} \times 4000 \times 10^6 = 22,48 (\mu\text{m}).$$

Lineārā nodiluma eksperimentāli noteiktās un aprēķinātās vērtības pēc konkrētā berzes ceļa apkopotas 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Lineāra nodiluma eksperimentālās un aprēķinātās vērtības

Vērtība	Eksperimentālais lineārais nodilums, μm							
	Pēc 500 m	Pēc 1000 m	Pēc 1500 m	Pēc 2000 m	Pēc 2500 m	Pēc 3000 m	Pēc 3500 m	Pēc 4000 m
Teorētiskā vērtība	2,92	5,62	8,43	11,24	14,05	16,86	19,67	22,48
Eksperimentālā vid.vērtība	3,07	5,75	8,41	11,22	13,53	16,67	18,74	21,33
Relatīvā novirze, %	-4,88	-2,26	0,24	0,18	3,84	1,14	4,96	4,95

Salīdzinot eksperimentālos datus ar aprēķina rezultātiem, var secināt, ka relatīvā novirze starp vērtībām veido maksimāli 5 %, kas ir labs pamatojums tam, ka aprēķiniem pēc piedāvātā nodiluma aprēķinu modeļa ir augsta precizitāte.

5.4. Secinājumi

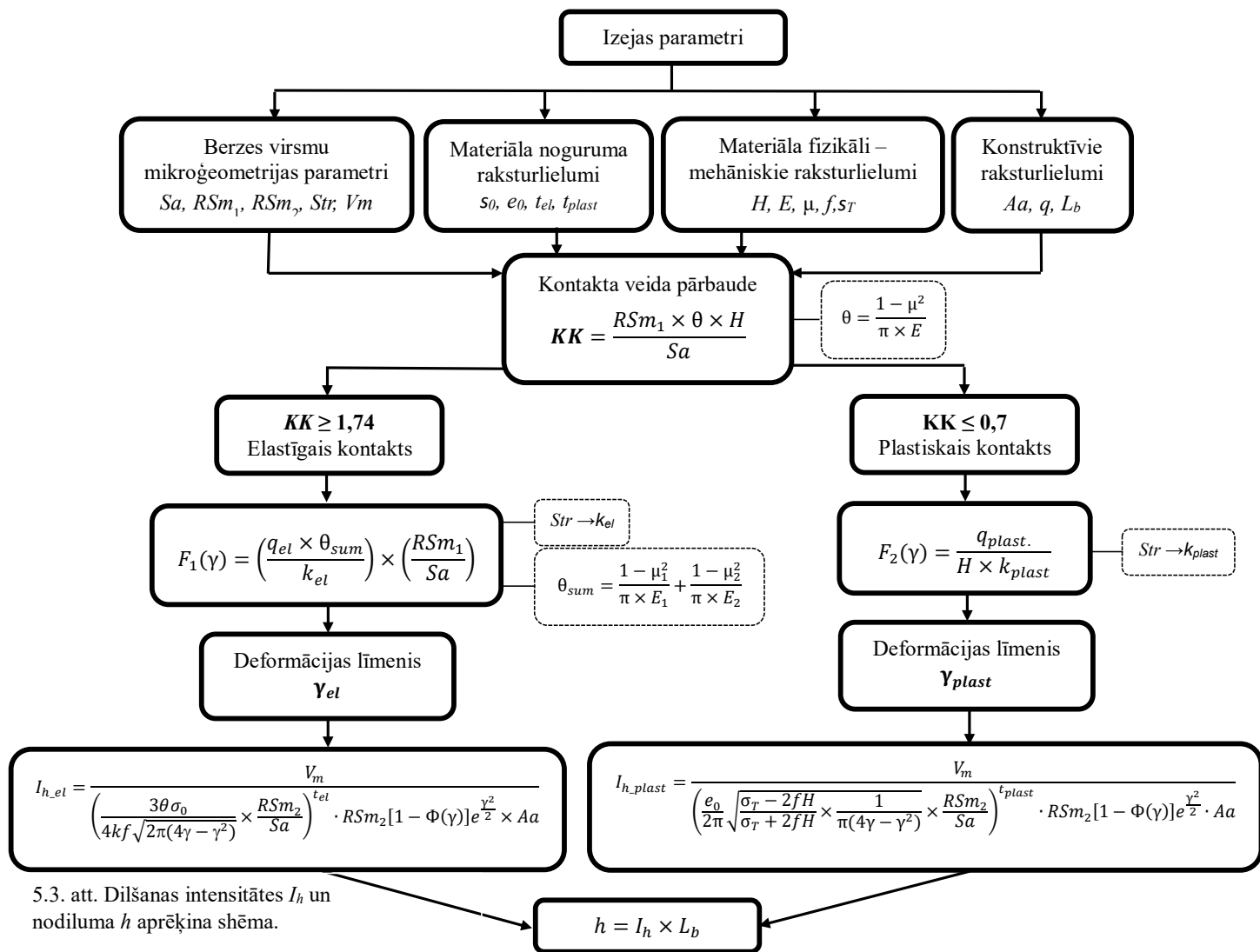
1. Relatīvā novirze starp nodiluma analītiskā aprēķina rezultātiem un eksperimenta rezultātiem nepārsniedz 5 %.
2. Sa/RSm attiecības palielināšana rada dilšanas intensitātes pieaugumu.
3. Pareizai dilšanas intensitātes noteikšanai un prognozēšanai jāņem vērā korelācija starp raupjuma parametriem Sa un RSm .
4. Jo mazāka ir virsmas anizotropija (lielāka Str vērtība), jo lielāka ir tā ietekme uz dilšanas intensitāti.
5. Lai paaugstinātu nodilumizturību, galvenā uzmanība ir jāpievērš berzes pāra detaļu materiāla izvēlei, bet piestrādes laika samazināšanai – berzes virsmu raupjuma parametriem, lai būtu nodrošināta minimālā Sa/RSm attiecība.

5.5. Nodiluma noteikšanas metodika

Piedāvātā metodika ir piemērota dilšanas intensitātes un nodiluma noteikšanai plakanām berzes virsmām ar neregulāru raupjumu, ja notiek materiāla virskārtas nogurumsagrušana. Dilšanas intensitātes aprēķinu veic šādā secībā.

1. Nosaka izejas datus:
 - 1.1. berzes virsmu mikroģeometrijas parametrus: Sa , RSm_1 , RSm_2 , Str , Vm ;
 - 1.2. materiāla virsslāņa fizikāli mehāniskos raksturlielumus: H , E , μ , f , σ_T ;
 - 1.3. materiāla noguruma raksturlielumus: σ_0 , e_0 , t ;
 - 1.4. konstruktīvos raksturlielumus: Aa , q , L_b .
 - Berzes virsmu ģeometriju uzņem, izmantojot profilgrāfu-profilometru. Raupjuma parametrus nosaka pēc rekomendācijām, kas publicētas 4.5. apakšnodaļā. Nodiluma prognozēšanas gadījumā mainot Sq vērtību, analītiski nosaka Sa un Vm .
 - Materiāla fizikāli mehāniskos un noguruma raksturlielumus nosaka pēc mehānisko pārbaužu rezultātiem un tehniskām rokasgrāmatām.
 - Konstruktīvie parametri tiek noteikti pēc berzes mezgla rasējuma un uzstādītiem darba apstākļiem.
2. Aprēķina kontakta elastīgo konstanti θ dilstošai detaļai un summāro elastīgo konstanti θ_{sum} abām berzes virsmām.
3. Nosaka kontakta veida kritēriju.
4. Pēc kontaktēšanas formulām atkarībā no kontakta veida kritērija nosaka relatīvo deformācijas līmeni γ .
5. Atbilstošajam kontakta veidam pēc formulas nosaka dilšanas intensitāti un arī lineāro nodilumu.

5.3. attēlā redzama dilšanas intensitātes un nodiluma aprēķina shēma, ņemot vērā kontakta veida kritēriju.



5.3. att. Dilšanas intensitātes I_h un nodiluma h aprēķina shēma.

PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Mūsdienās vairākiem nodiluma noteikšanas modeļiem ir savi ierobežojumi, t. i., 2D raupjuma parametri, pieņēmums par ordinātu sadalījuma normalitāti, kā arī viens konkrēts kontakta veids. Veicot nodiluma simulāciju un aprēķinu galīgo elementu vidē, vairākos gadījumos pētnieki lieto J.F.Arčarda un G.Fleišnera nodiluma aprēķinu modeļus un vienkāršo berzes pāra kontakta tipu (gluda virsma-gluda virsma), kur virsmas raupjums nav ņemts vērā, kas attiecīgi samazina rezultātu ticamību. Turklāt esošajos nodiluma aprēķinu modeļos raupjuma parametru lietošanas pareizība un noteikšanas precizitāte nav pamatota, kas arī samazina iegūto rezultātu ticamību. Lai atrisinātu eksistējošo problēmu, tika izvirzīta šāda hipotēze: virsmas 3D un 2D raupjuma parametru precizēta noteikšana un integrēšana, kā arī atsevišķu materiāla noguruma raksturlielumu izmantošana dilšanas intensitātes aprēķinos un prognozēšanā paaugstinās rezultātu ticamību elastīga un plastiskā kontakta gadījumos. Šīs hipotēzes apstiprinājums ir redzams sasniegtajos rezultātos.

1. Sakarā ar to, ka līmeņošanas veids ietekmē raupjuma ģeometriju, virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējo izvietojumu, tika izvēlēts optimālais līmeņošanas veids virsmas profilu ģeometrijas saglabāšanai, t. i., *leveling line by line* kopā ar 1./2. kārtas mazāko kvadrātu polinomu.
2. Virsmām ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījums ir tuvs normālam, bet pilnīgi tam neatbilst pēc 3D asimetrijas un ekscesa kritēriju *Ssk* un *Sku* eksperimentālām vērtībām, savukārt šīm novirzēm nav izteiktas ietekmes uz vidējā aritmētiskā augstuma *Sa* analītisko noteikšanu. Taču, lai paaugstinātu rezultātu precizitāti, tika piedāvāts parametru *Sa* aprēķināt, ņemot vērā *Sku* vērtības.
3. Tika pierādīts, ka standarta *ISO 25178-2* virsmas tekstūras indekss *Str* atbilst anizotropijas koeficientam, attiecīgi to var izmantot raupjuma soļa *RSm₂* noteikšanai, kas ir apgrūtināta ar novirzi starp virsmas vidusplakni un profilu viduslīnijām.
4. Raupjuma parametru *Sa*, *RSm₁* un *RSm₂* noteikšanas precizitāte, ja relatīvā kļūda ir 0,1 un ticamības varbūtība ir 0,9, būs nodrošināta ar vienu 3D raupjuma mērījumu pie standartizētā trases garuma.
5. Deformētā materiāla tilpuma *Vm* eksperimentālai noteikšanai pie deformācijas līmeņiem $\gamma > 1$ ir jāveic virkne papildmērījumu, lai nodrošinātu šī parametra noteikšanas precizitāti. Viena mērīšanas eksperimenta ietvaros iegūtās *Vm* vērtības ir mazākas par aprēķinātajām.
6. Promocijas darbā tika izstrādāta metodika raupjuma parametru *Sa*, *RSm₁*, *RSm₂*, *Vm* noteikšanai, ņemot vērā virsmu ar neregulāru raksturu īpatnības.
7. Nodiluma analītiskā aprēķina rezultāti pēc izstrādāta modeļa dod augstu sakritību ar berzes eksperimenta rezultātiem plastiskā kontakta gadījumā, atšķirība rezultātos ir 5 %.

8. Promocijas darbā tika izstrādāta metodika dilšanas intensitātes un nodiluma noteikšanai plakanām berzes virsmām ar neregulāru raupjumu, ja notiek materiāla virskārtas nogurumsagrūšana.
9. Pareizai dilšanas intensitātes noteikšanai jāņem vērā korelācija starp raupjuma parametriem Sa un RSm . Sa/RSm attiecības palielināšana rada dilšanas intensitātes pieaugumu.

REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI

1. Pārbaudīt nodiluma noteikšanas modeļa atbilstību eksperimentālajiem datiem elastīgā kontakta gadījumā.
2. Veikt dilšanas intensitātes aprēķinus galīgo elementu vidē (*FEM*) un salīdzināt iegūtos rezultātus ar eksperimentālajiem datiem.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge Univ. Press, 1985, 452 p.
2. Lockrey A. *An evaluation of adhesive contact models for elastic solids using atomic force microscopy*. University of Southampton, United Kingdom, 2021, 43 p.
3. Bowden F. P.; Tabor D. *The friction and lubrication of solids*. Oxford at the Clarendon press, 1950, 331 p.
4. Archard J. F. *Elastic deformation and the laws of friction*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 243, no. 1233, 1957, pp. 190–205.
5. Popova, E.; Popov, V. L.; Kim, D.E. *60 years of Rabinowicz' criterion for adhesive wear*. Friction, vol.6, 2018, pp. 341–348.
6. Kragelsky, I. V.; Alisin, V. V. *Tribology: Lubrication, Friction and Wear*. UK: Professional Engineering Publishing limited London and Bury St Edmunds, 2005, 948 p.
7. Fleischer, G; Gröger, H.; Thum, H. *Verschleiß und Zuverlässigkeit, 1st ed.*; Verlag Technik: Berlin, Germany, 1980, 244 p.
8. Chun, S. M.; Khonsari, M. M. *Wear simulation for the journal bearings operating under aligned shaft and steady load during start-up and coast-down conditions*. Tribol. Int., vol.97, 2016, pp. 440–466.
9. Lijesh, K. P.; Khonsari, M. M. *On the Modeling of Adhesive Wear with Consideration of Loading Sequence*. Tribol. Lett., vol.66, iss.3, 2018, art. no. 105.
10. Lijesh, K.; Khonsari, M.; Kailas, S. V. *On the integrated degradation coefficient for adhesive wear: A thermodynamic approach*. Wear, vol. 408–409, 2018, pp.138–150.
11. Xiang, G.; Han, Y.; Wang, J.; Wang, J.; Ni, X. *Coupling transient mixed lubrication and wear for journal bearing modeling*. Tribol. Int., vol. 138, 2019, pp. 1–15.
12. Xiang, G.; Yang, T.; Guo, J.; Wang, J.; Liu, B.; Chen, S. *Optimization transient wear and contact performances of water-lubricated bearings under fluid-solid-thermal coupling condition using profile modification*. Wear, vol. 502-503, 2022, art. no. 204379.
13. Lehmann, B.; Trompetter, P.; Guzmán, F. G.; Jacobs, G. *Evaluation of Wear Models for the Wear Calculation of Journal Bearings for Planetary Gears in Wind Turbines*. Lubricants, vol. 11, iss.9, 2023, art. no. 364.
14. Greenwood, J. A.; Williamson, J. P., 1966. *Contact of nominally flat surfaces*. Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences, vol. 295, 1966, pp. 300–319.
15. Рудзит Я. А. *Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей*. Рига, Зинатне, 1975, 211 стр. (in Russian).
16. Konrads G. *Mašīnu detaļu slīdes virsmu dilšana*. – Rīga, RTU Izdevniecība, 2006. 80 lpp. (in Latvian)
17. Sprīģis G. *Slīdes berzes pāra detaļu nodiluma analīze un noteikšana*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 101 lpp.
18. Youngbin L., Sangyul H. *RufGen: A plug-in for rough surface generation in Abaqus/CAE*. SoftwareX 22, 2023.

19. David Bergström. *Rough surface generation & analysis* [online]. [25.08.2025] Available from: https://www.mysimlabs.com/surface_generation.html.
20. Yan L., Guan L., Wang D., Xiang D. *Application and prospect of wear simulation based on ABAQUS: A Review*. Lubricants, Vol. 12, art. no. 57, 2024, pp. 1–26.
21. Fallahnezhad, K.; Oskouei, R. H.; Taylor, M. *Development of a fretting corrosion model for metallic interfaces using adaptive finite element analysis*. Finite Elem. Anal. Des. 2018, vol. 148, pp.38–47.
22. Gan, L.; Xiao, K.; Pu, W.; Tang, T.; Wang, J. X. *A numerical method to investigate the effect of thermal and plastic behaviors on the evolution of sliding wear*. Meccanica, vol.56, 2021, pp.2339–2356.
23. Shen, F.; Hu, W.; Meng, Q. *A damage mechanics approach to fretting fatigue life prediction with consideration of elastic-plastic damage model and wear*. Tribol. Int. 2015, 82, 176–190.
24. Duo, Yang, et al. *Discrimination of Wear Performance Based on Surface Roughness Parameters Arithmetic Mean Height (Sa) and Skewness (Ssk)*. Wear, vol. 548–549, 2024, p. 1–10.
25. Hao, Q.; Yin, J.; Liu, Y.; Jin, L.; Zhang, S.; Sha, Z. *Time-Varying Wear Calculation Method for Fractal Rough Surfaces of Friction Pairs*. Coatings, vol.13, iss.2, 2023, art. no.270.
26. Li L., Li G. H., Wang J. J., Fan C. Q., Cai A. J. *Fretting wear mechanical analysis of double rough surfaces based on energy method*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 237, iss. 2, 2023, pp. 356–368.
27. Awwad K., Fallahnezhad K., Yousif BF., et al. *Finite element analysis and experimental validation of polymer–metal contacts in block-on-ring configuration*. Friction, vol.12, iss. 3, 2023, pp. 554–568.
28. Maier M., Pusterhofer M., Grün F. *Modelling Approaches of Wear-Based Surface Development and Their Experimental Validation*. Lubricants, vol. 10, iss.10, 2022, art. no. 335.
29. Tandler R., Bohn N., Gabbert U., Woschke E. *Analytical wear model and its application for the wear simulation in automotive bush chain drive systems*. Wear, vol. 446–447, 2020, art. no. 203193.
30. Ting, Chen; Weiguo, Ma; Kaihui, Zhu; Zilong, Hu. *Wear simulation of UHMWPE against the different counterface roughness in reciprocating unidirectional sliding motion*. Scientific reports, vol.14, iss.1, 2024, art. no.15858.
31. Bose, K.; Ramkumar, P. *Finite Element Sliding Wear Simulation of 2D Steel-on-Steel Pin-on-Disc Tribometer*. SAE Technical Paper 2018-28-0011, 2018.
32. Li, C., Karimbaev, R., Wang, S., Amanov, A., Wang, D., Abdel Wahab, M. *Fretting Wear Behavior of Inconel 718 Alloy Manufactured by DED and Treated by UNSM*. Sci. Rep., vol.13, iss.1, 2023, art. no. 1308.
33. Terwey, J. T.; Fourati, M. A.; Pape, F.; Poll, G. *Energy-Based Modelling of Adhesive Wear in the Mixed Lubrication Regime*. Lubricants, vol. 8, iss. 2, 2020, art. no. 16.
34. Winkler, A.; Bartz, M.; Wartzack, S. *Numerical Wear Modeling in the Mixed and Boundary Lubrication Regime*. Lubricants, vol.10, iss. 12, 2022, art. no. 334.
35. Xue Y.; Chen J.; Guo S. *Finite element simulation and experimental test of the wear behavior for self-lubricating spherical plain bearings*. Friction, vol. 6, iss. 3, 2018, pp. 297–306.

36. Рудзитис Я. А. *Контактная механика поверхностей. Часть 1. (Mechanics of surface contact. Part 1)*. Рига: РТУ, 2007, 193 p. (in Russian).
37. Рудзитис Я. *Контактная механика поверхностей, 2-ая часть – Микротопография шероховатости поверхности (Surface contact mechanics – part 2 – Surface roughness microtopography)*. Рига: РТУ, 2007, 213 стр. (In Russian).
38. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. *Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход (Surface roughness: theoretically-probabilistic approach)*. Москва: Наука, 1975, 344 стр. (In Russian).
39. Buj-Corral I.; Domínguez-Fernández A.; Durán-Llucià R. *Influence of print orientation on surface roughness in fused deposition modeling (FDM) processes*. Materials, vol. 12, iss. 23, 2019, art. no. 3834.
40. Kumermanis M. *Cietu ķermeņu neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi. (Investigations of 3D roughness parameters of solid bodies' surfaces with irregular character)*. Riga: Riga Technical University, 2012. 120 p. (In Latvian).
41. 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, Iss. 4, 2023, pp. 729–741.
42. Whitehouse, D. J.; Archard, J. F. *The properties of random surfaces of significance in their contact*. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A. Math. Phys. Sci. 1970, vol. 316, pp.97–121.
43. Stout K. J., Sullivan P. J., Dong W. P., Mainsah E., Mathia N. T., Zahouani H. *Development of Methods for Characterization of Roughness in Three Dimensions, First edition*. London: Penton Press, 1993, 384 p.
44. Karkalos, N. E.; Thangaraj, M.; Karmiris-Obrata'nski, P. *Evaluation of the Feasibility of the Prediction of the Surface Morphologies of AWJ-Milled Pockets by Statistical Methods Based on Multiple Roughness Indicators*. Surfaces, vol. 7, 2024, 340–357.
45. Wechsuanmanee, P.; Lian, J.; Shen, F.; Münstermann, S. *Influence of surface roughness on cold formability in bending processes: A multiscale modelling approach with the hybrid damage mechanics model*. Int. J. Mater. Form., vol. 14, pp. 235–248.
46. Quezada, M. M.; Fernandes, C.; Montero, J.; Correia, A.; Salgado, H.; Fonseca, P. *A Different Approach to Analyzing the Surface Roughness of Prosthetic Dental Acrylic Resins*. Appl. Sci., vol. 14, iss.2, 2024, art. no. 619.
47. Hernández, H. *Testing for Normality: What is the Best Method*. ForsChem Research Reports, vol. 6, 2021, pp. 1–38.
48. *Schematic illustrations demonstrate the meaning of parameters Rsk (a) and Rku (b)* [online] [27.02.2025] Available at: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustrations-demonstrate-the-meaning-of-parameters-Rsk-a-and-Rku-b_fig1_374990091.
49. Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н. *Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007, 136 стр. (in Russian)*
50. Todhunter L., Leach R., Blateyron F. *Mathematical approach to the validation of form removal surface texture software*. Surface Topography: Metrology and Properties, vol. 8, iss. 4, 2020, pp. 1–10.

51. *Leveling and form removal*. [online] [27.02.2025] Available at: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-leveling-form-removal.html>.
52. Necas D., Valtr M., Klapetek P. *How levelling and scan line corrections ruin roughness measurement and how to prevent it*. Scientific Reports , vol. 10, iss. 1, 2020, art. no. 15294.
53. Nečas, D.; Klapetek, P.; Valtr, M. *Estimation of roughness measurement bias originating from background subtraction*. Measurement science and technology, vol. 31, iss. 9 , 2020, art. no. 094010.
54. Jansons, E., Lungevics, J., Gross, K. *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, pp. 687– 695.
55. LVS EN ISO 25178-3:2012. *Izstrādājumu ģeometriskās specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: laukums. 3. daļa: Specifificēšanas operatori*. (in Latvian)
56. McubeMap Ultimate 10. *The Analysis software and the Reference guide*. Digital Surf: www.digitalsurf.com.
57. Тихонов В. И. *Выбросы случайных процессов*. Москва: Наука, 1970, 392 с.



Natālija Bulaha dzimusi 1990. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi profesionālo bakalaura grādu mašīnu un aparātu būvniecībā un mehānikas inženiera kvalifikāciju (2012) un inženierzinātņu maģistra grādu mašīnbūves tehnoloģijā (2014). No 2011. gada sākusī strādāt RTU par zinātnisko asistenti, veicot profilometriskos pētījumus par virsmas tekstūru, paralēli koordinējot ERAF, ESF projektus par karstumizturīgiem un nodilumizturīgiem nanopārklājumiem, kā arī vadot laboratorijas darbus metroloģijā. Paralēli strādājusi par ekspertu metinātāju un metināšanas tehnoloģiju sertifikācijas jomā SIA "TUV Nord Baltik", kā arī par izglītības programmas "Metālapstrāde" priekšsēdētāja vietnieci SIA "Buts" kvalifikācijas eksāmenā. Patlaban ir RTU Būvniecības un mašīnzinību fakultātes pētniece mašīnbūves un mehānikas jomā, pētot virsmas raupjuma īpatnības dažāda tipa virsmām un to ietekmi uz nodilumizturību. Zinātniskās intereses saistītas ar virsmas raupjuma datorapstrādi un simulācijas iespējām galīgo elementu vidē, kā arī berzes procesiem un dilšanas mehānismiem.