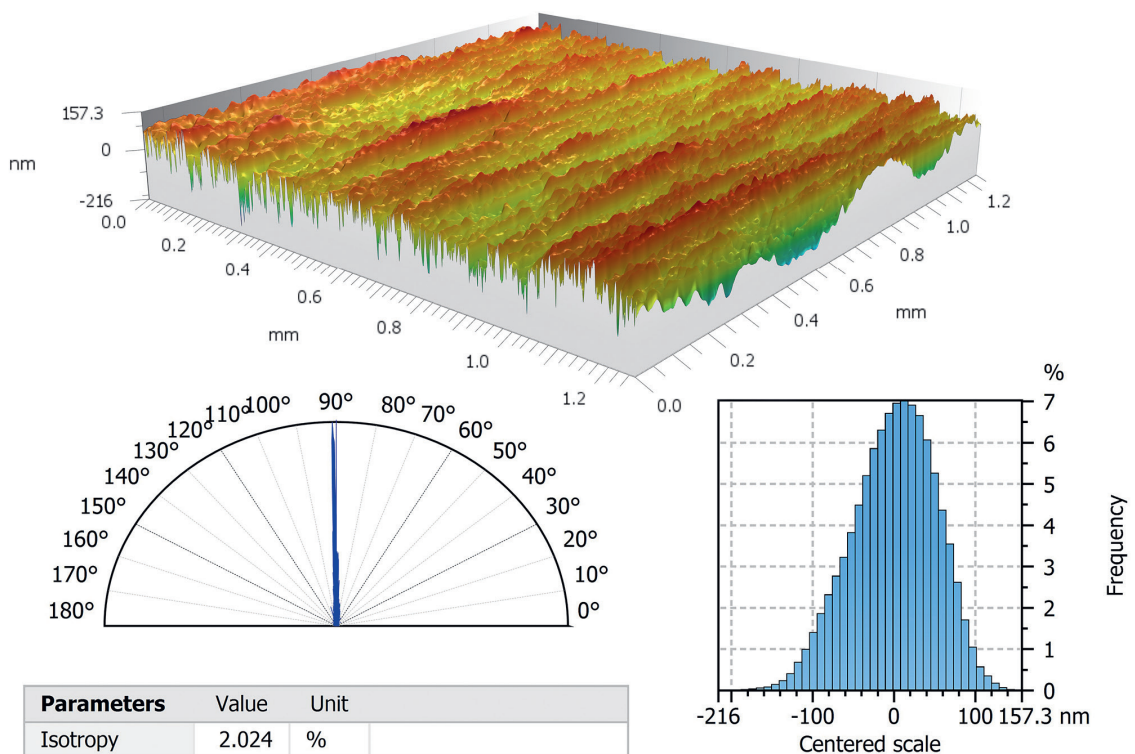


Natālija Bulaha

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

Promocijas darbs



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 darbs

Zinātniskie vadītāji

profesors *Dr.sc.ing.*
OSKARS LINIŅŠ

docente *Dr.sc.ing.*
ANITA AVIŠĀNE

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

JĀNIS RUDŽĪTIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2026

Bulaha N. Virsmas raupjuma 2D un 3D parametri un to pielietojums detaļu kontakta un dilumizturības pētīšanā. Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 114 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*” mērīšanas iekārtai un *MCubeMap* Ultimate 10 programmatūrai, kas bija nepieciešamas šī pētījuma veikšanai.



ANOTĀCIJA

Kā ir zināms detaļas nodilumizturību ietekmē virkne faktoru un virsmas raupjumam ir īpaša loma šajā jautājumā. Esošajos diluma aprēķinu modeļos raupjuma parametru pielietošanas pareizība un noteikšanas precizitāte nav pamatota, kas samazina iegūto rezultātu ticamību. Promocijas darbs “*Virsmas raupjuma 2D un 3D parametri un to pielietojums detaļu kontakta un nodilumizturības pētīšanā*” tika izstrādāts ar mērķi izveidot uzlaboto dilšanas intensitātes un lineārā nodiluma aprēķina modeli slīdes berzes pārim, kas ietver sevī precizētus kontaktvirsmas 3D un 2D raupjuma parametrus, kā arī materiāla noguruma raksturlielumus elastīgā un plastiskā kontakta gadījumam.

Uzstādīto mērķu sasniegšanai promocijas darba ietvaros, pirmkārt, tika veikti virsmas 2D un 3D raupjuma mērīšanas eksperimenti ar iegūto datu tālāko datorapstrādi, kas iekļāva optimālās līmeņošanas operācijas izvēli virsmas ģeometrijas saglabāšanai un specifisko funkciju izmantošanu raupjuma soļa noteikšanai. Otrkārt, bija pārbaudīts 3D virsmas ar neregulāru raupjumu matemātiskais modelis, lai veiktu raupjuma parametru analītisko izteikšanu un to noteikšanas precizitātes pārbaudi. Pēdējais solis bija dilšanas intensitātes aprēķina modeļa izstrāde un diluma aprēķina rezultātu salīdzinājums ar berzes eksperimentā iegūtajiem.

Promocijas darba pētījumu rezultāti norāda uz to, ka izstrādātais berzes pāra dilšanas intensitātes noteikšanas modelis dod iespēju precīzi noteikt un prognozēt nodiluma lielumu, pateicoties precizētiem raupjuma parametriem un materiāla noguruma raksturlielumiem. Iegūto rezultātu aprobācija ir atspoguļota 13 publikācijās un 10 konferencēs.

Promocijas darbs ir latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, rezultātus, secinājumus, rekomendācijas tālākai izpētei, literatūras sarakstu, 1 pielikumu, 65 attēlus, 22 tabulas. Darba apjoms – 109 lapaspuses teksta. Literatūras sarakstā ir 81 informācijas avoti.

ANNOTATION

As is known, the wear resistance of a part is influenced by several factors and surface roughness plays a special role in this matter. In existing wear calculation models, the correctness of the application of roughness parameters and the accuracy of determination are not justified, which reduces the reliability of the obtained results. The doctoral thesis "*Application of 3D and 2D surface roughness parameters in contact and wear resistance evaluation*" was developed with the aim of creating an improved wear intensity and linear wear calculation model for a sliding friction pair, which includes specified 3D and 2D roughness parameters of the contact surface, as well as material fatigue characteristics for cases of elastic and plastic contact.

To achieve the set goals, within the framework of the doctoral thesis, first, 2D and 3D surface roughness measurement experiments were carried out with further computer processing of the obtained data, which included the selection of the optimal leveling operation to preserve the surface geometry and the use of specific functions to determine the roughness step. Secondly, the mathematical model of a 3D surface with irregular roughness was tested to perform an analytical expression of the roughness parameters and check the accuracy of their determination. The last step was the development of a wear intensity calculation model, and a comparison of the wear calculation results with those obtained in the friction experiment.

The results of the doctoral thesis research indicate that the developed wear intensity determination model of a friction pair allows for the accurate determination and prediction of the wear value, thanks to the specified roughness parameters and material fatigue characteristics. The approbation of the results obtained has been reflected in 13 publications and 10 conferences.

The doctoral thesis is in Latvian, contains an introduction, 5 chapters, results, conclusions, recommendations for further research, a list of literature, 1 appendix, 65 figures, 22 tables. The volume of the work is 109 pages of text. The list of literature contains 81 sources of information.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	6
IZMANTOTO APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	10
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	12
1.1. Virsmas raupjuma parametru lietojums berzes virsmu nodiluma aprēķinos.....	12
1.2. Virsmas 2D un 3D raupjuma parametru aprēķinu iespējas.....	26
1.3. Virsmas raupjuma ordinātu sadalījuma likuma novērtējums	31
1.4. Virsmas datorapstrādes operāciju ietekme uz raupjuma parametru noteikšanas precizitāti.....	36
1.5. Secinājumi	41
2. VIRSMAS RAUPJUMA EKSPERIMENTĀLĀ NOTEIKŠANA	42
2.1. 3D un 2D raupjuma mērīšanas eksperiments	42
2.2. Tekstūras līmeņošanas operācijas korekta izvēle	45
2.3. Virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējā izvietojuma noteikšana.....	52
2.4. Secinājumi	56
3. VIRSMAS 3D un 2D RAUPJUMA PARAMETRU APRĒĶINI.....	57
3.1. Virsmas neregulārā raupjuma modeļa atbilstības pārbaude	57
3.2. Virsmas vidējais aritmētiskais augstums Sa	62
3.3. Virsmas tekstūras indekss Str	66
3.4. Profila elementu vidējais platums RSm	69
3.5. Materiāla tilpums Vm	75
3.6. Secinājumi	79
4. RAUPJUMA PARAMETRU NOTEIKŠANAS PRECIZITĀTE	80
4.1. Vidējais aritmētiskais augstums Sa	80
4.2. Profila elementu vidējais platums RSm	82
4.3. Materiāla tilpums Vm	84
4.4. Secinājumi	85
4.5. Rekomendācijas raupjuma parametru noteikšanai.....	86
5. VIRSMAS DILŠANAS INTENSITĀTES UN NODILUMA NOTEIKŠANA.....	87
5.1. Nodiluma aprēķins elastīgā kontakta gadījumā	88
5.2. Nodiluma aprēķins plastiskā kontakta gadījumā	92
5.3. Analītisko aprēķina rezultātu un berzes eksperimentā iegūto datu salīdzinājums.....	96
5.4. Secinājumi	99
5.5. Nodiluma noteikšanas metodika	100
PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	102
REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI.....	103
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI	104
PIELIKUMI	110

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, kā 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 precīzētu 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 (mēртаusts – 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 lietotas 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”

Publikācijās

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.-531.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, Iss.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, Iss.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, Iss.2, 55.-63.lpp. **(SCOPUS)**
8. Sprinģis, 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 BALTRIB' 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)**

IZMANTOTO APZĪMĒJUMU SARAKSTS

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;
$TLSPL$	–	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}	–	summāra 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 noteikšanas 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 sevī nodiluma aprēķinu modeļus. Lielākā daļa mūsdienīgo pētījumu par virsmas dilšanas procesiem ir balstīti uz veciem nodiluma noteikšanas modeļiem. Triboloģijas pamatus **16.gadsimtā** ir licis zinātnieks **L.Da Vinči** un to attīstību **18.gadsimtā** bija turpinājuši **G.Amontons**, **J. Desanguliers**, **L.Euler** un **Č.Kulons** [1]. Amontons un Kulons bija izgudrojuši trīs galvenos triboloģijas pamatlikumus, uz kuru pamata bija izveidots berzes ģeometriskais modelis:

$$F_K = \mu \cdot F_N \quad (1.1.)$$

kur F_K – berzes spēks, N;

μ – kinētiskās berzes koeficients;

F_N – normālspiediena spēks, N.

Tribologs **Dezangulje** tajos laikos bija piedāvājis adhēzijas berzes koncepciju [2]. Viņš uzskatīja, ka adhēzija ir viens no procesiem, kurš īstenojas berzes laikā, bet tas gāja pretrunā ar eksperimentiem sakarā ar to, ka berze nav atkarīga no kontakta laukuma. Jautājums bija atrisināts ieviešot reālā kontakta laukuma koncepciju, ka reālais kontakta laukums sastāv no vairākiem maziem apgabaliem, kur arī notiek kontakts starp atomiem.

1950.gadā Dezangulje adhēzijas berzes koncepcija ieguva tālāko attīstību, jo bija veiksmīgi izmantota **Boudena un Tabora** pētījumos par kontaktu metāls-metāls [3]. Boudens un Tabors parādīja, ka statiskais berzes spēks starp divām slīdošām virsmām ir stipri atkarīgs no reālā kontakta laukuma. Pēc viņu pētījumiem adhēzijas nodiluma gadījumā kontaktējošie nelīdzenumi plastiski deformējas virs kritiskās bīdes pretestības, kura ir atkarīga no divu virsmu adhēzijas spēkiem kontaktā. Pieņemot, ka slīdes berzes laikā visi nelīdzenumu deformējas pilnīgi plastiski, tika pierādīts, ka berze mainās lineāri pieliktai slodzei kā to prasa pirmais Amontona likums. Reālais kontakta laukums bija izteikts kā attiecība starp normālo slodzi un mīkstāka materiāla cietību, bet berzes koeficients – kā attiecība starp mīksta materiāla bīdes stiprības robežu un trīskāršotu materiāla tecēšanas robežu. Pie tam, svarīgi atzīmēt, ka pēc dotās adhēzijas teorijas berzes koeficients ir konstants:

$$\mu \approx \frac{\sigma_{crit}}{2.8Y} \quad (1.2.)$$

kur σ_{crit} – bīdes stiprības robeža, MPa;

Y – materiāla tecēšanas robeža, MPa.

Citos savos darbos viņi apgalvoja, ka berze ir ne tikai metināšanas tiltiņu spēja pretoties cirpei, bet arī mīkstāka ķermeņa spēja pretoties deformācijai ar cietākā ķermeņa daļiņām. Tas nozīmē, ka berzes spēkam ir divas sastāvdaļas – adhēzija un deformācija. Taču pēc zinātnieku domām šī berzes spēka sastāvdaļa ir niecīga, neskatoties uz to, ka tā būtībā var spēlēt ļoti svarīgu lomu raupju virsmu berzes procesos.

1953.gadā Arčards bija izveidojis nodiluma prognozēšanas modeli, kurš arī pamatojās uz adhēzijas nodiluma mehānismu [4]. Viņa modeļa pamatā bija Holma (1946) empīriskā lineārā sakarība starp diluma apjomu W un pielikto slodzi q ar proporcionalitātes koeficientu z , kurš atspoguļoja atoma attālināšanas varbūtību. Arčarda modelis nosaka, ka plastiskā kontakta gadījumā nodiluša materiāla apjoms ir tieši proporcionāls slodzei, slīdēšanas distancei un nodiluma koeficientam, un apgriezti proporcionāls materiāla cietībai:

$$V_v = \frac{k}{H} \cdot F \cdot s_R \quad (1.3.)$$

kur H – cietība, MPa.

k – nodiluma koeficients, kurš izsaka materiāla atdalīšanas varbūtību mikronelīdzenuma deformācijas rezultātā;

F_k – normālais berzes spēks, MPa;

s_R – slīdēšanas distance, mm.

1958.gadā Rabinowicz piedāvāja diluma prognozēšanas modeli, kurš iekļāva sevī virsmas enerģijas efektus [5, 6]. Viņa teorija nosaka saiti starp berzes koeficientu un cietu ķermeņu virsmas enerģijām.

$$f = \frac{S}{p} \left(1 + \frac{2 \cdot W_{ab} \cdot \text{ctg} \theta}{p \cdot r} + \dots \right) \quad (1.4.)$$

kur S – metināšanas tiltiņa bīdes spriegums, MPa;

p – efektīvais kontaktspriegums, MPa;

W_{ab} – adhēzijas saišu enerģija, erg/cm²;

θ – nelīdzenuma slīpuma leņķis,°;

r – kontaktrādiuss, μm.

Dotā izteiksme pāriet Boudena un Tabora izteiksmē, kad leņķis θ ir pārāk liels, kas piemīt raupji apstrādātām virsmām. Rabinowicz apgalvoja, ka glūdām virsmām, kurām ir raksturīgā liela adhēzija, virsmas enerģija būtiski ietekmē berzes koeficientu. Nodilumu viņš pievadāja rēķināt pēc sekojošas formulas:

$$V = k \frac{W \cdot L}{H} \left(1 + \frac{\gamma}{r \cdot H} \right) \quad (1.5.)$$

kur γ – virsmas enerģija;

r – nelīdzenumu rādiuss, μm;

W – normāls spēks, N;

K – nodiluma koeficients;

H – cietība, MPa;

L – slīdēšanas distance, mm.

Vienādojums (1.5.) ir Arčarda modeļa modifikācija, jo šajā modelī tiek ņemti vērā adhēzijas diluma mehānismi un materiāla pārnese starp virsmām. Tas nodrošina precīzāku adhēzijas nodiluma aprēķinu un piemērots materiālu kombinācijām ar ievērojamām atšķirībām virsmas enerģijā.

Pamatojoties uz Arčarda diluma modeli, var veikt secinājumu, ka palienoties materiālā cietībai, nodilums samazinās. Taču diluma koeficients K , kura vērtības mainās no 10^{-7} līdz 10^{-2} , atspēko doto pieņēmumu. **1968.gadā Kragelskis** bija noformulējis pilnīgi pretējo zema nodiluma nosacījumu – mehānisko īpašību pozitīvā gradienta principu [6,7]. Tas nozīmē, ka virskārtas slāņiem jābūt ar mazāko stiprību par dziļākiem slāņiem, citādi – notiks katastrofālais nodilums.

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0 \quad (1.6.)$$

kur σ_x - sagraujošais spriegums pieskares plaknes virzienā, MPa;

z – koordināte, perpendikulārā pieskares plaknei

I.V.Kragelskis uzskatīja, ka berzei ir divējāds raksturs: molekulārais un mehāniskais, t.i. berze raksturojas ar molekulāras mijiedarbības spēku pārvarēšanu uz faktiskā kontakta plankumiem un deformējamā materiāla pretestību cietākā ķermeņa mikronelīdzenumu pārvietošanai tajā. Dotās teorijas pareizība tika pierādīta ar vairākiem eksperimentiem. Doto teoriju tālāk attīstīja N.B.Demkins, V.S.Kombalovs, lai būtu iespējams noteikt gandrīz visas kontakta īpašības inženieruzdevumu risināšanai.

Pamatojoties uz dilšanas intensitātes noteikšanas lineāro sakarību, kura nosaka attiecību starp nodilušā materiāla apjomu, nominālo kontakta laukumu un slīdēšanas distanci (XX), Kragelskis piedāvāja noteikt dilšanas intensitāti elastīgā kontakta gadījumā pēc sekojošās pamatformulas:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot 2^{-\frac{1}{2}\gamma} \cdot p_a \cdot p_c^{-\frac{1}{2}\gamma} p_r^{t_f-1-\frac{1}{2}\gamma} \Delta^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_{ml}}{\sigma_0} \right)^{t_f} \quad (1.7.)$$

kur K_1 – faktors, kuru nosaka pēc individuāla nelīdzenuma ģeometrijas un augstuma, $k=0.2$

α – attiecība starp reālo un nominālo kontakta laukumu;

γ – deformācijas līmenis;

p_a – nominālais spiediens, N/m²;

p_c – kontūrspiediens, N/m²;

p_r – reālais spiediens, N/m²;

n – ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai;

k – faktors, kurš raksturo kontaktspriegumu stāvokli;

σ_0 – maksimālā stiprības robeža, ko materiāls spēj izturēt pirms lūzuma, MPa;

Δ – virsmas raupjuma kompleksais parametrs;

t_f – nogurumu līknes parametrs;

f_{ml} – berzes koeficienta molekulārā komponente.

Zinātnieks piedāvāja vairākus variantus dilšanas intensitātes noteikšanai atkarībā no virsmas kontakta veida: kontakts starp raupjām virsmām bez viļņainības ($p_c = p_a$), kontakts starp raupjām virsmām ar viļņainību ($p_c \neq p_a$), kontakts starp virsmām pēc piestrādes. Savukārt zinātnieka piedāvātie raupjuma atbalsta līknes nestandartizēti parametri apgrūtina modeļa pielietošanu.

1980.gadā Fleischer izgudroja nodiluma noteikšanas modeli, kurš balstījās uz enerģētisko pieeju, ka slīdes berzes laikā ģenerēta enerģija uzkrājas materiālā [8]. 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 . Balstoties uz šo pieeju, dilšanas intensitāte I_h var būt noteikta sekojoši:

$$I_h = \frac{f}{e_R} \cdot P_a \quad (1.8.)$$

kur e_R – berzes enerģijas blīvums, MPa;

P_a – nominālais kontaktspiediens, MPa;

f – berzes koeficients.

2016.gadā Čun, balstoties uz Rowe un Arčarda diluma noteikšanas modeļiem, prognozēja gultņu nodilumu virzuļdzinēja palaišanas un apturēšanas operācijās, iekļaujot aprēķinos smērvielu ietekmi uz kontaktu [9]. Viņš ieviesa parametru Ψ , kas raksturoja reālā kontakta laukuma attiecību pret nominālo kontakta laukumu. Atšķirību starp šīm zonām izraisa uz virsmas adsorbētas smērvielu molekulas, kas novērš tiešu kontaktu. Rowe izstrādāja šo pieeju, pārbaudot nodiluma uzvedību, izmantojot n-heksadekānu kā smērvielu, lai iekļautu smērvielas ietekmi nodiluma aprēķinā.

$$V_v = \Psi \cdot \frac{k}{H} \cdot F_k \cdot s_R \quad (1.9.)$$

kur Ψ – koeficients, kurš izsaka attiecību starp reālo un nominālo kontakta laukumu;

k – diluma koeficients;

H – cietība, MPa;

Čun apskatīja virsmas nelīdzenumu deformāciju kā elastīgi-plastisko:

$$p_{elasto-plastic} = 2\pi \cdot hd \cdot n \cdot \beta \cdot \sigma \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right) \int_{h^* - y_s + w_2}^{\infty} w \cdot e^{-0.5\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}z\right)^2} dz \quad (1.10.)$$

kur $p_{elasto-plastic}$ – elastīgi-plastiskais kontaktspiediens, N/m²;

hd – cietība pēc Vikersa, GPa;

n – nelīdzenumu blīvums, m⁻²;

β – nelīdzenumu izliekuma rādiuss, μm;

σ – ekvivalentā augstuma vidējā kvadrātiskā novirze, μm;

σ_s – standartā augstuma vidējā kvadrātiskā novirze, μm;

w – slodze uz kontaktu garumu, N/m²;

y_s – deformācijas līmenis;

w_2 – kritiskā interference pilnībā plastiskas deformācijas punktā.

2018.gādā Lijesh bija izgudrojis termodinamisko pieeju nodiluma noteikšanai. Viņa darbos figurē degradācijas koeficients B nodiluma koeficienta k vietā, kurš veido sakarību starp dilšanas ātrumu un entropijas koeficientu [10,11]:

$$B(t) = \frac{v_v(t)}{S_g(t)} \quad (1.11.)$$

kur $B(t)$ – degradācijas koeficients;

$V_v(t)$ – slīdēšanas ātrums, m/s;

$S_g(t)$ – entropijas koeficients.

$$B(t) = \frac{V(t) \cdot T(t)}{F_k \cdot v_v(t)} \quad (1.12.)$$

kur $T(t)$ – kontakta temperatūra, °C;

F_k – berzes spēks, N;

$V(t)$ – nodilušā materiāla apjoms, mm³.

Izmantojot no laika atkarīgu degradācijas koeficientu ir iespējams atspoguļot tribosistēmas uzvedību pie laikā mainīgās slodzes. Izmaiņas temperatūrā tiek izraisītas berzes rezultātā izdalīta siltuma dēļ. Tas nozīmē, ka izdalītais siltums ir atkarīgs no berzes koeficienta. Autors neņem vērā virsmas tekstūras ietekmi uz dilumu.

Xiangam arī pieder moderna pieeja nodiluma noteikšanai, kura iekļauj sevī divus nodiluma mehānismus: raupjuma pīķu deformāciju un noguruma mehānismu [12,13,14]. Nodilušā materiāla apjoms pēc deformācijas tiek noteikts sekojoši:

$$V_{1,i} = \frac{\pi \cdot \delta_{a,i}^2 \cdot (3\beta - \delta_{a,i})}{3} \quad (1.13.)$$

kur β – nelīdzenuma rādiuss, μm (konstanta vērtība);

$\delta_{a,i}$ – nelīdzenumu pīķu deformācija, kura tiek noteikta pēc Herca kontaktteorijas, ņemot vērā vidējo spēku, kurš darbojas uz atsevišķo nelīdzenumu $F_{av,i}$

Lai aprēķinātu noguruma plaisu īpatsvaru, kuras veidojas kontaktējošo virsmu dziļākos slāņos un tiek izplatītas visa nogurumu lūzuma izplatīšanas leņķa garumā, kas pieved pie materiāla sabrukšanas pēc konkrētas akumulācijas, tiek izmantota sekojošā sakarība:

$$V_{2,i} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \tan(\alpha) \cdot \beta^{\frac{2}{3}} \cdot \delta_{a,i}^2 \quad (1.14.)$$

Vidējais nodiluma apjoms V_i slīdēšanas cikla laikā tika izteikts pēc sekojošās formulas:

$$V_i = \frac{N_i}{n_i} \cdot (\Delta V_{1,i} + \Delta V_{2,i}) \quad (1.15.)$$

kur N_i – kopējais nelīdzenumu kontakta skaits slīdēšanas cikla laikā;

n_i – ciklu skaits, kas noved pie virskārtas izciļņu sabrukšanas.

Kontakta ciklu skaits n_i starp nelīdzenumiem materiāla atdalīšanai tika noteikts sekojoši:

$$n_i = \left(\frac{\sigma_b \cdot A_{r,i}}{3 \cdot \mu \cdot F_{k,i}} \right)^k \quad (1.16.)$$

kur σ_b – materiālā izturības robeža, MPa;

A_r – reālais kontaktlaukums, mm²;

F_k – nelīdzenumu piespiešanas spēks, N;

μ – berzes koeficients.

Nelīdzenumu piespiešanas spēks F_k un reālais kontaktlaukums tiek rēķināti ar **Grinvuda un Williamsona** statistikas modeļa palīdzību, lai aprakstītu raupjas virsmas [14,15]. Šeit tiek uzskatīts, ka virsmas nelīdzenumu sadalījums atbilst Normālam sadalījuma likumam, lai aprakstītu nelīdzenumu kontaktu kā smērvielas plēves biezuma funkciju. Lai noteiktu N_i tika pielietots **Grinvuda un Tripp** modelis [16]:

$$N_i = 2 \cdot A_{n,i} \cdot D^2 \cdot \beta \cdot \Delta L \cdot \int_{h_{c,i}}^{\infty} \phi(k') dk' \quad (1.17.)$$

kur A_n – nominālais kontaktlaukums, mm²;

D – nelīdzenumu blīvums 1/mm²;

L – slīdes distance vienā ciklā, mm;

K – Gausa normālais sadalījums.

2023. gadā G.Springis bija aktualizējis uz materiālu noguruma teorijas balstīto **J.Rudziša** un **G.Konrāda** nodiluma aprēķinu modeli [17,18], integrējot tajā 3D virsmas raupjuma augstuma parametru Sa un virsmas tekstūras indeksu Str [19]. Pamatsakarība nodiluma noteikšanai ir līdzīga zinātnieka Xiang darbā izmantotajai:

$$U_n = V'_\Sigma \cdot \frac{N_{cf}}{N_c} \quad (1.18.)$$

kur V'_Σ – deformētais tilpums pa visu berzes virsmu, mm³;

N_{cf} – faktiskais ciklu skaits, kas realizējas berzes procesā;

N_c – ciklu skaits, kas noved pie virskārtas izciļņu sabrukšanas.

Autors pamatojās uz Hertza teoriju, ka virsmas izciļņus var aprakstīt ar eliptiskiem paraboloidiem, kuriem kontaktlaukums ir elipse, un paraboloida segmenta tilpums ir V_i . Veicot pieņēmumu, ka virsmas ordinātas ir sadalītas pēc Normālam sadalījuma likuma, i-tā izciļņa atdalītā tilpuma vidējo vērtību darba autors piedāvā noteikt pēc sekojošās formulas:

$$V_i = \frac{S_q}{4\pi \cdot E^2(n_i(0) \cdot Str \cdot \gamma)} \quad (1.19.)$$

kur S_q – vidējais kvadrātiskais augstums, μm;

Str – virsmas tekstūras indekss;

γ – deformācijas līmenis;

$n_i(0)$ – nulļu skaits, mm⁻¹.

Deformētais tilpums V'_Σ tiek izteikts kā i-tā izciļņa atdalītā tilpuma vidējās vērtības reizinājums ar deformēto izciļņu skaitu N_γ .

$$V'_\Sigma = V_i \cdot N_\gamma \quad (1.20.)$$

Deformēto izciļņu skaits tiek noteikts pēc sekojošām formulām:

$$N_\gamma = \frac{\pi \cdot \{n_1(0)\} \cdot E\{n_2(0)\}}{2\sqrt{2}\pi} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{1}{2}\gamma^2} \quad (1.21.)$$

Izmantojot vienādojumu (1.18.) Springis piedāvā sekojošo lineāra nodiluma aprēķinu modeli:

$$U_l = \frac{5 \cdot m!}{N_0} \cdot \frac{Sa \cdot \sqrt{\pi}}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \gamma^2} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_0}\right)^m \cdot \left(\frac{Sa}{RSm_1}\right)^m \cdot \left(\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot K(e)^{1/2}}\right)^m \cdot \frac{L_b}{RSm_2^a} \quad (1.22.)$$

kur m – materiāla noguruma līknes vienādojuma pakāpes rādītājs;

N_0 – profila krustojumu skaits ar viduslīniju;

Sa – vidējais aritmētiskais augstums, μm ;

σ_0 – materiāla ilgizturības spriegumu robežvērtība, MPa;

RSm_1 – raupjuma solis X-ass virzienā, mm;

E – elastības modulis, MPa;

L_b – berzes ceļš, mm;

RSm_2^a – nodilumu aktivizējošās virsmas raupjuma solis y-ass virzienā, mm.

Springis nodiluma aprēķina modelī bija iekļāvis vairākus nodilumu ietekmējošus faktorus - virsmas raupjuma raksturojumus, mehāniskās īpašības, materiāla noguruma raksturlielumus, savukārt, dots modelis ir ierobežots ar kontakta veidu, jo tas der elastīgā kontakta gadījumam, un virsmas ordinātu Gausa sadalījumu.

1.1. Tabulā ir atspoguļoti galvenie nodiluma noteikšanas modeļi, kuros ir integrēti virsmas raupjuma parametri.

1.1. Tabula

Raupjuma parametru pielietojums nodiluma aprēķinu modeļos

N.p.k.	Autors	Raupjuma parametri
1.	Rabinowicz [5,6]	θ – nelīdzenumu slīpuma leņķis; r – nelīdzenumu izliekuma rādiuss.
2.	Arčards [4]	R – nelīdzenumu izliekuma rādiuss.
3.	I.V.Krageļskis [6,7]	b, v – raupjuma atbalsta līknes parametri; $Rmax$ – nelīdzenumu maksimālais augstums; R – nelīdzenumu izliekuma rādiuss.
4.	Čun [9]	n – nelīdzenumu blīvums; β – nelīdzenumu izliekuma rādiuss; σ – ekvivalentā augstuma vidējā kvadrātiskā novirze.

1.1. Tabulas turpinājums

N.p.k.	Autors	Raupjuma parametri
5.	J.Rudzītis [17], Konrāds [18]	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.	Xiang [12,13]	β – nelīdzenumu izliekuma rādiuss; D – nelīdzenumu blīvums; σ – augstuma vidējā kvadrātiskā novirze; γ – virsmas raupjuma orientācija.
7.	G.Springis [19]	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 dilšanas koeficients. To nosaka, veicot berzes eksperimentus uz tribometra. Atkarībā no kontaktparaugu izvietojuma eksistē dažādas tribometru konfigurācijas, ļoti populāri ir *pin-on-disk* un *block-on-ring* testi [20]. Tā *Pin-on-disk* testi tiek plaši pielietoti, mērot dilšanas ātrumu slīdes berzes rezultātā. Mērīšanas iekārta sastāv no stacionārās tapas, piespiestas pie rotējošā diska. Dilšanas ātrums tiek rēķināts pēc tapas un/vai diska masas zuduma vai apjoma izmaiņas. Pastāv iespēja variēt ar slodzi, rotācijas ātrumu un vides apstākļiem. Standarts ASTM G77 un G99 satur rekomendācijas mērīšanas eksperimentu veikšanai un iegūto datu apstrādei. Testēšanas laikā tiek kontrolēti berzes spēks, slīdes ātrums un temperatūra. Berzes koeficienta COF izmaiņas atkarībā no laika tiek izteiktas berzes līknes veidā, kur ir redzams piestrādes periods, kad COF ir liels un pēc laika stabilizējas. Šajā periodā mainās virsmas reljefs, notiek ķīmiskās reakcijas kamēr tribosistēma nenasniegs stacionāro stāvokli. Šo stāvokli var pamanīt pēc COF vāji mainīgās vērtības.

Yahong XUE, pētot eksperimentāli kontaktu starp pašelļojošiem slīdgultņiem uz *Pin-on-plate* tribometra, bija izmantojis Arčarda modeļa diferenciālo formu, lai noteiktu nodiluma koeficientu, kontaktspiediena eksponenti un slīdēšanas ātruma eksponenti [21]:

$$\omega = K_d \cdot P^m \cdot v^n \quad (1.23.)$$

kur ω – dilšanas ātrums pēc laika,

K_d – diluma koeficients;

P – slodze, MPa;

v – ātrums, mm/s;

m – kontaktspiediena eksponenta;

n – slīdēšanas ātruma eksponenta.

Dilšanas ātrums piestrādes stadijai un vienmērīgas dilšanas periodam tika rēķināts, izmantojot berzes līknes slīpumus.

Pētnieks **Yang Duo** bija veicis cilindrisko veltnīšu tribotestu, lai noteiktu nodiluma koeficientu k arī pēc Arčarda modeļa. Pieņemot, ka nodilums berzes pārim ir vienāds, koeficients k bija rēķināts pēc sekojošās formulas [22]:

$$k = \frac{2s}{\Delta n \cdot P \cdot t} \quad (1.24.)$$

kur s – vienības nodiluma apjoms, mm^3 ;

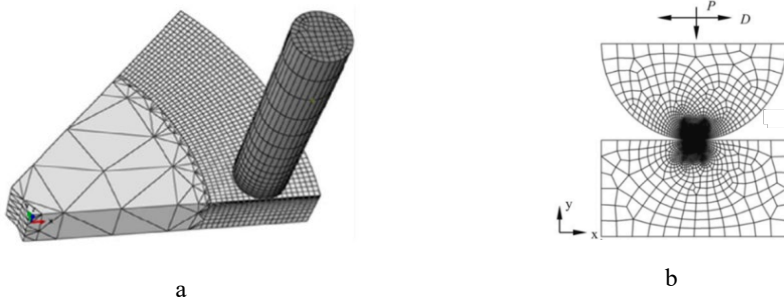
Δn – divu veltnīšu ātruma izmaiņas, rpm;

P – slodze, N;

t – laiks, min.

Tribotesti nodrošina nodiluma ātru novērtēšanu, bet tā pielietojamība ir ierobežota ar testēšanas diapazonu. Pie tām ir nepieciešama plaša eksperimentālo datu kopa precīzai parametru noteikšanai. Dilšanas ātruma mērījumu rezultātiem var būt ievērojama izkliede materiāla nevienādabīguma dēļ. Apkārtējās vides faktori, t.i. temperatūra, mitrums, ietekmē dilšanas intensitāti, bet tie var mainīties eksperimentu laikā. Tāpēc, lai precīzi noteiktu dilšanas ātrumu ir nepieciešams veikt virkni eksperimentu un statistisko analīzi, kas prasa ilgu laiku un iekārtas izlietošanu. Tāpēc šeit ir svarīgi atzīmēt galīgo elementu metodes (FEM) pielietojanas 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, kuras nodrošina kontaktu modelēšanu un nodiluma aprēķināšanu, t.i. Abaqus, ANSYS, REDSY, MATHLAB, Prepromax u.c. Vairākos nodiluma pētījumos figurē tieši programmas Abaqus modulis UMESHMOTION, kurš spēj apstrādāt kontaktējošo virsmu ģeometrijas izmaiņas. Atkarībā no uzdevuma pētnieki pielieto 2D vai 3D nodiluma simulācijas modeļus (skat. 1.1.att.).



1.1.att. Kontakta modeļa veids [23]

a – 3D, b – 2D

Vairākos pētījumos izmanto FE 3D modeļi, jo tas pilnīgāk attēlo detaļas īsto struktūru un darba apstākļus sakarā ar pētāmā elementa sarežģīto modeli, piemēram, ortopēdiskie implantanti, zobratu pārvadi, griezējinstrumenti utt. [23] Tādos gadījumos 2D modeļa pielietošana var izraisīt ievērojamas kļūdas aprēķinos.

Runājot par modeļa precizitāti saprot virsmas raupjumu. Pastāv dažādi varianti kā var uzmodelēt kontaktu starp divām detaļām. Datorprogrammu izstrādātāji piedāvā vairākus variantus: 1) kontakts starp divām glūdām virsmām; 2) kontakts starp raupju un glūdu virsmu; 3) kontakts starp divām raupjām virsmām. Nodiluma aprēķins kontakta modelim ar glūdām virsmām būs vienkāršāks un aizņems mazāk laika. Taču, atbilstību reālā kontakta ainai nodrošina raupjo virsmu modelis. Pastāv vairākas iespējas uzģenerēt raupju virsmu. Tā programmas ABAQUS izstrādātāji piedāvā [24-27]:

1. Importēt ar profilometru uzņemto virsmas 2D/3D ģeometriju UMESHMOTION vidē. Piemēram, eksportēt 3D virsmas informāciju no MCube Map10 un pārveidot to atbilstošā formātā. ABAQUS lasa formātus, kuros ir režģa dati.
2. Uzģenerēt raupju virsmu ABAQUSā ar funkciju “Rough surface generator plug-in”:
 - Pēc nelīdzenumu augstuma sadalījuma: Gausa vai Veibulas;
 - Pēc PSD, izmantojot raupjuma nelīdzenumu spektrālā blīvuma funkcijas datus.
3. Importēt no Matlabā uzģenerēto raupju virsmu (skat. 1.2.att.).

Matlab programmas izstrādātāji piedāvā uzmodelēt trīs dažādus virsmas tipus:

- fraktālo virsmu;
- Sinusoidālo virsmu;
- Gadījuma rakstura virsmas.

Piemēram, lai uzģenerētu virsmu ir jāievada kods – parametru kopa:

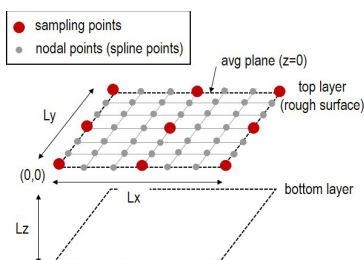
$$\text{Rand_surf}(Lx, Ly, LZ, N, sn_x, sn_y, Wb_a, Wb_b) \quad (1.25.)$$

kur Lx, Ly, LZ – perioda garums x, y elementiem un z -virziens ($LZ=0$ ģenerē 3D virsmu);

N – iedalījuma skaits distancei starp virsmas punktiem;

sn_x, sn_y – virsmas punktu skaits x un y -ass virzienos;

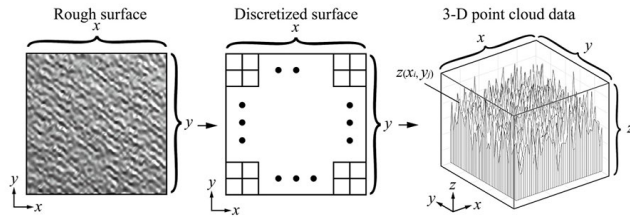
Wb_a, Wb_b – Veibula sadalījums – varbūtības sadalījuma funkcija.



1.2.att. Ievades parametri raupjas virsmas modelēšanai Matlabā [28]

Fraktālu metodi savos darbos bija izmantojuši vairāki zinātnieki. Viņi atbalsta teoriju, ka virsmas topogrāfijas struktūrai ir fraktālie raksturojumi, t.i. virsmas raupjuma atsevišķas daļas kontūri ir līdzīgi visas virsmas kontūram. Tā **Ling Li & co** slīdes berzes modelēšanai divām raupjām kontaktējošām virsmām bija izmantojis 2-D fraktālo virsmu, balstoties uz W-M (Weierstrass–Mandelbrot) funkciju, veicot raupjuma profila ģenerēšanu [29]. Pētnieks **Qiang Hao & Co** nodiluma analīzei bija izmantojis 3-D fraktālo virsmu, jo pēc viņu uzskata W-M funkcija ir ierobežota ar raupjuma profila raksturošanu 2D mērogā un nevar atspoguļot raupjas virsmas izmaiņas 3D mērogā, tāpēc viņu pētījumā bija izmantots Yan un Komvopoulos 3D fraktālās virsmas funkcionālais modelis [30].

Laī veiktu skaitlisku virsmas raupjuma analīzi darba autori diskretizēja nepārtraukto raupju virsmu. Diskrētā elementam tika izvēlēts noteiktais izmērs un topogrāfijas informācija tika izteikta 3D punktu veidā. 1.3.att. ir redzama raupja virsma ar fraktāliem raksturojumiem, kur x_i un y_j ir diskrētās virsmas vienības koordinātes, $Z(x_i, y_j)$ – diskrētās virsmas vienības augstuma vērtība. Katrs diskrētās vienības datu punkts tiek pierakstīts kā $H[x_i, y_j, z(x_i, y_j)]$, tādā veidā realizējas reālās virsmas pārveidošana virtuālajā virsmā.



1.3.att. Raupjas virsmas digitālā attēla konvertēšana [30]

Pētnieka **Liang Yan** komanda bija veikusi apjomīgo analīzi par modeļiem nodiluma prognozēšanai ar FEM metodi [23]. Tā lielākā daļa pētnieku, ap 70%, izmanto 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 sevī elektro-ķīmiskus vienādojumus korozijas nodilumam [31], rūdišanas likumu (power hardening law) termomehāniskam nodilumam [32], elastīgi-plastisko deformācijas modeļi [33], kuri ir adoptēti Arčarda modelim.

Tā zinātnieks **Qiang Hao** nodiluma aprēķiniem bija izmantots Arčarda vienādojumu [30]. Pieņemot, ka berzes procesā starp raupjām virsmām veidojas elastīgā un plastiskā deformācija, nodiluma aprēķina fraktālais modelis izskatījās šādi:

$$V = (1 + \lambda \mu^2)^{0.5} \cdot \left\{ k_{we} + (k_{wp} - k_{we}) \left[\frac{D_s \cdot G^2 \cdot \sigma_y}{(2 - D_s) \cdot W} \cdot \left(\frac{\pi \cdot E^2}{225 \sigma_s^2} \right)^{\frac{1}{D_s - 1}} \right]^{\frac{2 - D_s}{2}} \cdot \psi^{\frac{(D_s - 2)^2}{4}} \right\} \cdot v \cdot T \quad (1.26.)$$

kur λ – eksperimentālā konstanta;

μ – berzes koeficients;

k_{we} – elastības dilšanas koeficients;
 k_{wp} – plastiskais dilšanas koeficients;
 D_s – 2-D fraktāla dimensija;
 G – skalas koeficients;
 σ_y – stiprības robeža, MPa;
 σ_s – tecēšanas robeža, MPa;
 W – slodze, N;
 E – summārais elastības modulis, N/m²;
 ψ – izplešanās koeficients
 T – laiks, s
 v – relatīvais slīdēšanas ātrums, m/min;
 V – nodilušā materiāla apjoms, mm³.

Zinātnieks **Ling Li** un Co nodilumu bija rēķinājis pēc enerģijas izkliedes modeļa, jo Arčarda modelim ir ierobežojums – berzes koeficienta ietekme uz dilšanas ātrumu slīdes maiņstāvoklī nav ņemta vērā [29]. Nodiluma apjoma un akumulētās izkliedes enerģijas attiecība tika noteikta pēc enerģētiska nodiluma koeficienta. Katra mezglpunkta nodiluma dziļums tika rēķināts, balstoties uz bīdes spriegumu. Darba autori skaidro, ka slīdes berzes nodiluma simulācijā nodilušais apjoms vienā ciklā ir ļoti mazs. Tāpēc viens pieauguma solis ir izmantots cikliskās slodzes vietā ΔN reizes. Tas samazina simulācijas laiku. Pie tām Ling Li komanda apskatīja trīs gadījumus kontakta simulācijai: 1) divas gludas virsmas 2) raupja un gluda virsma 3) divas raupjas virsmas. Nodilums tika rēķināts pēc sekojošās izteiksmes:

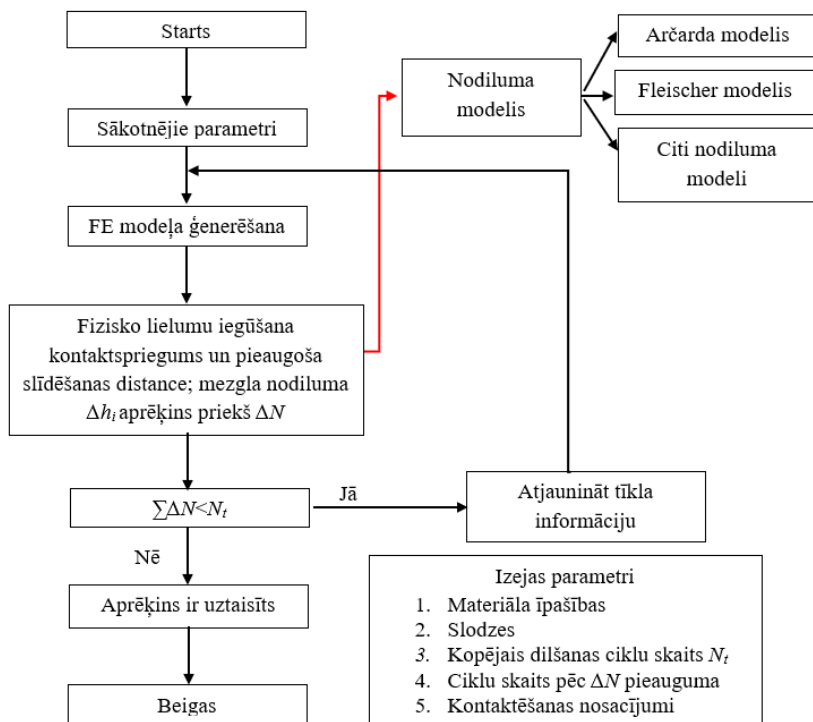
$$h(x) = \Delta N \sum_{i=1}^T \int a \cdot q(x)_i \cdot \Delta s(x)_i \quad (1.27.)$$

kur α – enerģijas diluma koeficients;
 $h(x)$ – diluma dziļums, μm ;
 $q(x)_i$ – bīdes spēks pozīcijā x ;
 i – pieauguma solis;
 $\Delta s(x)_i$ – relatīvā slīdēšanas distance pozīcijā x ;
 T – pieauguma soļu skaits.

Li Ling bija secinājis, ka, palielinoties raupjas virsmas skaitam, palielinās dilšanas dziļuma un kontaktspiediena vērtības; Savukārt kontaktēšanas laukums samazinās.

Zinātnieks **Chen Ting**, pētot polimēra bukses nodilumizturību, bija izmantojis divus nodiluma noteikšanas modeļus – Arčarda un enerģijas disipācijas modeli [34]. Autors atzīmē, ka aprēķinos netika ņemti vērā: temperatūras ietekme, virsmas raupjums, plastiskā deformācija, berzes koeficienta izmaiņas, viskoelastība. Viņa pētījuma rezultāti rāda, ka palielinoties slīdēšanas distancei, dilšanas apjoms pēc enerģijas disipācijas modeļa ir lielāks nekā Arčarda modeļa gadījumā.

Zinātnieki savos pētījumos nodiluma noteikšanai ar FEM metodi pielieto konkrētu nodiluma noteikšanas algoritmu (skat. 1.4.att.). Lai simulētu aktuālu dilšanas ainu un iegūtu precīzus rezultātus ir nepieciešams, lai simulācijas laikā virsmas tīkls un mezglu punkti visu laiku atjauninātos; Šim nolūkam raupjām virsmām tiek uzstādīts adaptīvais režģis (ALE). Izejas parametru, it īpaši parametra ΔN (attālums starp mezglu punktiem) noteikšana nodrošina FE modeļa precizitāti un efektivitāti. Parametrs ΔN un mezglpunktu pārvietošanas režīms tiek definēts atkarībā no modeļa.



1.4.att. Nodiluma noteikšanas algoritms galīgo elementu vidē

1.2.Tabulā ir atspoguļots, cik bieži pētnieki veic nodiluma simulāciju, izmantojot raupju virsmu kontakmodeli. Tā vairāki zinātnieki savos pētījumos bija vienkāršojuši virsmu kontakta modeli, pieņemot, ka abas virsmas ir glūdas, 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. Bet šeit ir svarīgi atzīmēt gan raupjuma ietekmi uz modeļa precizitāti, kā arī tādu faktoru ignorēšanu kā nogurums, korozija, oksidācija, šķērsvirziena bīdes spriegumi, temperatūra un EDZ vielas; dilšanas koeficienta konstantas vērtības.

1.2. tabula

Nodiluma noteikšana eksperimentāli un pēc galīgo elementu metodes

N.p.k.	Autors	Tribotests	FEM programma	Nodiluma analītiskais modelis	Tribotesta un FEM aprēķinu rezultātu salīdzinājums	Raupjuma ģenerēšana
1.	Y. Duo [22]	cylindrical roller test	Abaqus UMESHMOTION	Arčard	$V_{eksp.} < V_{FEM}$	Uzņemtās 3D virsmas ģeometrijas importēšana Abaqusā
2.	Q.Hao [30]	pin-on-disc	MATLAB, Fraclab Toolbox module	Arčard, fractals	-	Fraktālā virsma, Matlab
3.	L. Ling [29]	nebija veikti	Abaqus UMESHMOTION	Fleischer	-	Fraktālā virsma, Abaqus
4.	K.Y. Eayal AWWAD [35]	block-on ring	Abaqus UMESHMOTION	Arčard	$\Delta V \approx \pm 15\%$	Virsmas raupjums nav ņemts vērā
5.	M.Maier [36]	Pin-vee-block	Abaqus UMESHMOTION	Arčard	-	Uzņemtās 3D virsmas ģeometrijas importēšana Matlab
6.	R.Tandler [37]	rēālā motora ķēdes tapa	Abaqus UMESHMOTION	Fleischer	$\Delta h \approx 16\%$	Virsmas raupjums nav ņemts vērā
7.	C.Ting [34]	pin-on-plate	Abaqus UMESHMOTION	1) Arčard 2) Fleischer	$\Delta V \approx 20\%$	Virsmas raupjums nav ņemts vērā
8.	K.K.Bose [38]	pin-on-disc	Abaqus UMESHMOTION	Arčard	$\Delta h \approx 25.6\%$	Virsmas raupjums nav ņemts vērā
9.	Chao Li [39]	cylinder-on-plane	Abaqus UMESHMOTION	Fleischer	$\Delta V \approx 2\%$	Virsmas raupjums nav ņemts vērā
10.	J.T. Terwey [40]	pin-on-disc	Nav minēts	1) Arčard 2) Fleischer	$h_{eksp.} \approx h_{FEM}$	Uzņemtās 3D virsmas ģeometrijas importēšana
11.	A.Winkler [41]	two-disc	TRIBOFEM	Arčard	-	Uzņemtās 3D virsmas ģeometrijas importēšana
12.	Y.XUE [21]	pin-on-plat	Nav minēts	Arčard	$\Delta h \approx 4.50\%$	Nav minēts

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 pielietot analītiskās formulas raupjuma parametru kontrolei dilšanas laikā, kuras var pielāgot galīgo elementu videi.

Veicot nodiluma noteikšanu, kas balstās uz materiāla noguruma teoriju, ir svarīgi pareizi noteikt sekojošus raupjuma parametrus: Sa – vidējais aritmētiskais augstums, RSm_1 , Rsm_2 – raupjuma soli perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām; Str – virsmas tekstūras indekss; V'_Σ – deformētais tilpums.

Raupjuma parametrs Sa raksturo virsmas augstuma īpašības. Standartā **ISO 25178-2** vidējais aritmētiskais augstums Sa tiek izteikts sekojoši [42]:

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (1.28.)$$

kur $z(x, y)$ – virsmas ordinātas novirze no vidusplaknes;

A – definīcijas apgabals, mm.

P.Husu, J.Ruzītis bija izmantojuši gadījuma lauku teoriju parametra Sa analītiskai izteikšanai [43-44]. Autori apskata gadījumu, kad virsmas ordinātu sadalījums tiek aprakstīts ar Normālā sadalījuma likuma funkciju $f(z)$:

$$f(z) = \frac{1}{Sq\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{z^2}{2Sq^2} \right\} \quad (1.29.)$$

Sakarā ar lauka $z(x, y)$ stacionaritāti (lauka vidējā vērtība ir konstanta un korelācijas funkcija ir atkarīga no attāluma starp punktiem) sakarība starp vidējo aritmētisko augstumu un vidējo kvadrātisko novirzi izskatās sekojoši:

$$E\{Sa\} \sim Sq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (1.30.)$$

Autori atzīmē, ka sakarība (1.30.) ir stingri taisnīga tikai Normālā sadalījuma likuma gadījumā pie mazas attiecības “signāls/troksnis”.

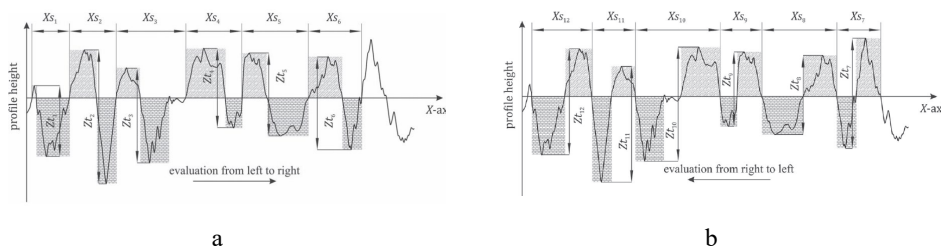
Runājot par profila elementu parametriem, ir svarīgi veikt Standartā **ISO 21920-2** izpēti [45]. Tajā ir definēts, ka profila elementu vidējais solis RSm ir profila elementu X_s vidējā vērtība:

$$RSm = \frac{1}{n_{pe}} \sum_{i=1}^{n_{pe}} X_{s,i} \quad (1.31.)$$

kur n_{pe} – profila elementu skaits;

X_s – profila elementa platums, mm.

Par profila elementu X_s tiek uzskatīts izcilnis kopā ar ieplaku (vai ieplaka kopā ar izcilni), kuru sākumpunkts un beigu punkts ir šķērsojumi ar viduslīniju pie noteiktā sliekšņa. Tātad profila elementi tiek noteikti pēc Crossing-The-Line Segmentation metodes. Svarīgs elements pie parametra RSm noteikšanas ir sliekšnis H , kurš norobežo izciļņa un ieplakas ģeometriju un izslēdz no raupjuma soļa nevajadzīgas komponentes – “troksni”. Standarts rekomendē *izmantot* $H_u=10\%$ no R_p (pīķu vidējā augstuma) un $H_v=10\%$ no R_v (ieplaku vidējā dziļuma) atskaitot no viduslīnijas. 1.5.att. a, b ir shematiski attēlots profila elementu noteikšanas princips. Profilam ir redzami 6 elementi no trases garuma sākumpunkta līdz pēdējam profila elementam un tik pat daudz raupjuma soļu no trases garuma beigām līdz pēdējam X_s pie sliekšņiem H_u un $-H_v$. Profila elementiem X_{S3} un X_{S10} ir redzams “nulles” elements, kurš ir daļa no ieplakas, jo profils šajā vietā nekrusto uzstādīto sliekšni. Atkarībā no virziena mainās profila elementu ģeometrija, tāpēc RSm aprēķinos tiek skaitīta vidējā X_s vērtība.

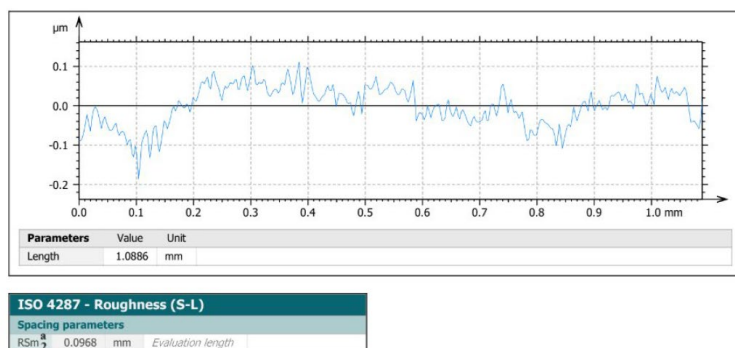


1.5.att. Raupjuma vidējā soļa RSm noteikšanas princips [46]

a – virzienā no novērtēšanas garuma sākuma līdz pēdējam profila elementam

b – virzienā no novērtēšanas garuma beigām līdz pēdējam profila elementam

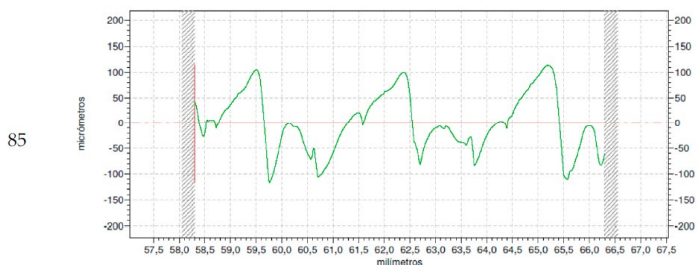
G.Spriņģis, pētot nodilumu berzes pārim tērauds-bronza, savos aprēķinos izmantoja parametru RSm_2 paralēli apstrādes pēdām, t.i. berzes virzienā [19]. 1.6.att. ir redzama nodilumu aktivizējošās lodītes virsmas profilogramma apstrādes pēdu virzienā pēc piestrādes stadijas.



1.6.att. Nodilumu aktivizējošās lodītes virsmas profils berzes pēdu virzienā [19]

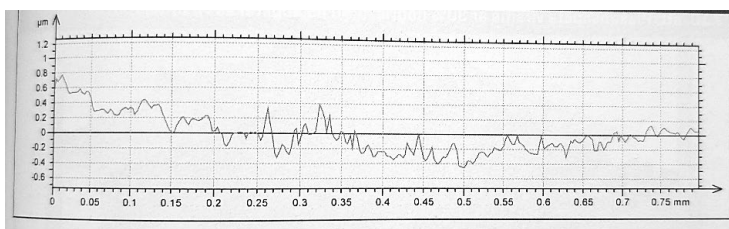
RSm_2 vērtība raupjuma profilam sastāda tikai 0.0968 mm pēc virsmas datorapstrādes programmas datiem. Tas pilnīgi neatbilst profila ģeometrijai, kuram vizuāli var izdalīt vienu platu soli ar garumu apmēram 0,6 mm, nosakot vidējo RSm_2 abos virzienos.

Neprecizitāte parametra RSm_2 noteikšanā bija pamanīta arī **Irene Buj-Corral** darbā par drukāšanas orientācijas ietekmi uz virsmas raupjumu ar kausētas nogulsnešanās modelēšanas metodi (FDM) [47]. Tā mainot drukāšanas orientācijas leņķi, mainās profilogrammas ģeometrija. Gadījumā, kad drukāšanas leņķis bija 55 grādi, parametra RSm vērtība pilnīgi atbilda profila datiem, jo nelīdzenumiem bija skaidri periodisks raksturs. Savukārt, palielinot leņķi līdz 85 grādiem, profilam bija pamanāms subraupjums (skat. 1.7.att.). Pēc datorprogrammas aprēķinu rezultātiem pie drukāšanas leņķa 85 grādi $RSm=1,22$ mm, savukārt, vizuāli profilam var izdalīt 2 soļus, ar vidējo platumu apmēram 3mm.



1.7.att. Raupjuma profils pie drukāšanas orientācijas leņķa 85 grādi [47]

M.Kumermanis plakanslīpētas virsmas datu bāzes izveidošanai bija izmantojis tās atsevišķus profilus divos perpendikularos virzienos [48]. 1.8.att. ir redzams plakanslīpētas virsmas šķēluma profils apstrādes pēdu virzienā, kuram raupjuma parametra RSm vērtība pēc datorapstrādes programmas aprēķina ir vienāda 0.0439 mm, kas atkal neatbilst izvilkta profila ģeometrijai, jo attēlā ir redzams, ka 0.8 mm trases garumā profilam ir tikai daži krustojumi ar viduslīniju, kuru nepietiek soļa definēšanai šajā gadījumā. Pie tām ir skaidri redzami “nulles” elementi posmā no 0.2 mm līdz 0.25 mm.



1.8.att. Plakanslīpētas virsmas šķēluma profils apstrādes pēdu virzienā [48]

Var minēt, ka raupjuma soļa samazinātās vērtības cēlonis ir nepiemērotā sliekšņa H izmantošana datoraprēķinos, pie kura tiek ņemti vērā raupjuma soļa subraupjums un defekti. Papildus tam, RSm vērtību ietekmē trases garums, kuram pēc standarta jābūt vienādam vismaz 5

bāzes garumiem, lai profils šķērsotu viduslīniju vairākās vietās. Taču, lai precīzi noteiktu nepieciešamo trases garumu vai mērījumu skaitu priekš RSm_2 mērījumu precizitātes nodrošināšanai, jāveic papildus aprēķini.

Rudzītis nodiluma aprēķinos bija izmantojis anizotropijas koeficientu C , kurš nosaka sakarību starp virsmas profila soļiem perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām [43-44]. Autors piedāvāja noteikt virsmas anizotropiju pēc sekojošās izteiksmes:

$$C = \frac{RSm_1}{RSm_2} \quad (1.32.)$$

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

G.Sprīngis, I.Boiko & Co piedāvāja izmantot standartizēto 3D raupjuma parametru Str , lai noteiktu virsmas anizotropiju [49]. Standartā EN ISO 25178-2 parametrs Str – virsmas tekstūras indekss tiek definēts, ka attiecība starp korelācijas funkcijas $f_{ACF}(t_x, t_y)$ horizontālām distancēm, kuras raksturojas ar funkcijas ātrāko un lēnāko dilšanu intervālā no 0 līdz 1. Šo definējumu var pierakstīt sekojošā veidā:

$$Str = \frac{t_x, t_y^{min} \in R\sqrt{t_x^2 + t_y^2}}{t_x, t_y^{max} \in R\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \quad (1.33.)$$

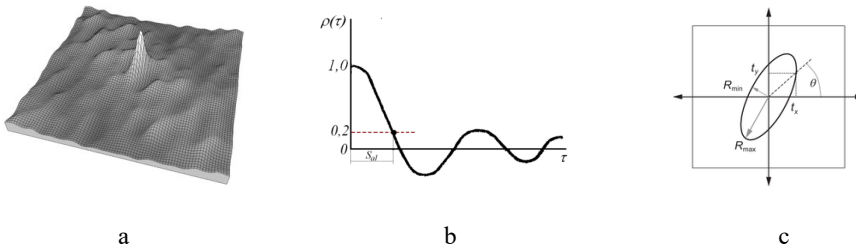
kur t_x, t_y^{min} – korelācijas funkcijas centrālā izciļņa šķēluma mazākais rādiuss, mm;

t_x, t_y^{max} – korelācijas funkcijas centrālā izciļņa šķēluma lielākais rādiuss, mm;

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

s – ACF šķēluma līmenis (pēc noklusējuma $s=0.2$).

1.9.att.ir redzama virsmas ar neregulāru raupjumu 3D korelācijas funkcija, kurai ir dilstošais raksturs.



1.9.Virsmas korelācijas funkcija [42]

a – korelācijas funkcijas 3D attēlojums, b – korelācijas funkcijas 2D attēlojums, c – korelācijas funkcijas šķēlums pie $s=0.2$

Atsevišķi ir izdalīts ACF šķēlums perpendikulāri apstrādes pēdām. t_x, t_y^{min} jeb Sal ir korelācijas funkcijas garums – ātrākās dilšanas intervāls. Sakarā ar to, ka korelācijas funkcija raksturo saiti starp virsmas punktiem, Sal norāda uz to, cik ātri zudis saite starp virsmas ordinātām. Jo lielāks ir ACF centrālā izciļņa šķēluma rādiuss, jo stiprāka ir korelācija starp virsmas punktiem konkrētajā virzienā.

Līdzīgu pieeju bija izmantojis 20.gadsimta pētnieks **P.Husu**, pētot virsmas raupjuma anizotropijas ietekmi uz nodilumizturību [50]. Autora darbā anizotropijas koeficients bija izteikts pēc sekojošās formulas:

$$k_{\tau_{0,1}}(\varphi) = \frac{\tau_{0,1(0)}}{\tau_{0,1}(\varphi)} \quad (1.34.)$$

kur $k_{\tau_{0,1}}(\varphi)$ – anizotropijas koeficients;

φ – leņķis starp profila uzņemšanas trasi un profila atskaites virzienu, °;

$\tau_{0,1(0)}$ – korelācijas intervāls atkarībā no leņķa φ , mm.

Autors neprecizēja otro virzienu anizotropijas noteikšanai, bet pētīja leņķa φ ietekmi uz nodiluma procesiem.

Parametra Str pielietošanas iespējamība nodiluma aprēķinos ir jāpārbauda, jo pētījumi par virsmas tekstūras indeksa un parametra C identiskumu nebija veikti. Ja doto parametru vērtībām būs augsta sakritība, tad virsmas tekstūras indeksu būs iespējams izmantot raupjuma soļa aprēķinos.

Runājot par nodilušā materiāla apjomu ir jāatzīmē, ka daži autori tā aprēķinam izmanto 3D un 2D raupjuma parametru kopu. Kā bija minēts 1.1.Sadalā G.Spriņģis piedāvāja noteikt izciļņa atdalītā tilpuma vidējo vērtību pēc Herca kontaktteorijas; Kopējais deformētais tilpums bija izteikts kā i -tā izciļņa atdalītā tilpuma reizinājums ar deformēto izciļņu skaitu. **Rudzītīm** bija cits formulējums nodilušā materiāla apjomam. Viņš ieviesa parametru Vu – izciļņu tilpumu pie virsmas šķērslīmeņa u . Dotā parametra aprēķins arī pamatojās uz normālā gadījuma lauka teoriju. Autors piedāvāja noteikt parametru Vu , integrējot virsmas šķērsgriezuma laukumu $A(u)$ pa līmeņiem, atskaitot no vidusplaknes:

$$Vu = \int_u^\infty A(u)du \quad (1.35.)$$

kur $A(u)$ – šķērsgriezuma laukums, mm²;

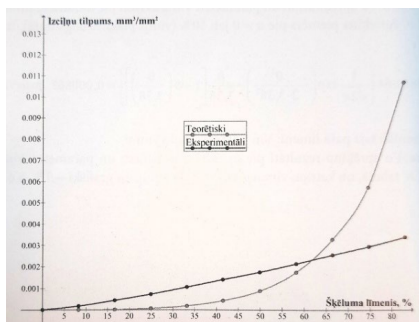
u – virsmas šķērsgriezuma līmenis, $u=c/Sq$.

Pēc attiecīgo pārveidojumu veikšanas analītiski doto parametru tika piedāvāts rēķināt, izmantojot sekojošo izteiksmi.

$$E\{Vu\} \sim Sq \cdot Aa \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{c^2}{2Sq^2}\right) - \frac{c}{Sq} \left[1 - \Phi\left(\frac{c}{Sq}\right)\right] \right\} \quad (1.36.)$$

Standartā ISO 25178-2 un datorapstrādes programmu rokasgrāmatās materiāla tilpums ir izteikts analogiskajā veidā – kā materiāla tilpums uz laukuma vienību pie noteiktā materiāla laukuma rādītāja, aprēķinātā pēc materiāla atbalsta līknes.

M.Kumermanis bija salīdzinājis pēc formulas (1.36.) noteiktās Vu vērtības ar eksperimentāliem datiem – parametru Vm (skat. 1.10.att.). 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.



1.10. att. Parametru Vu un Vm līknes plakanslīpētai virsmas [48]

M.Kumermanis, salīdzinot analītiski noteiktās materiāla tilpuma vērtības ar eksperimentāliem datiem, nebija ņēmis vērā atšķirību mērvienībās. Tā, nosakot materiāla tilpumu teorētiski pēc formulas (1.36.), parametra Vu mērvienība ir mm^3 , savukārt datorapstrādes programma nosaka parametra vērtības mm^3/mm^2 . Tāpēc, lai veiktu secinājumus par izteiksmes (1.36.) pielietojšanas iespējamību materiāla tilpuma noteikšanai ir jāveic papildus izpēte.

Sakarā ar to, ka nodiluma aprēķini un analītiskas formulas raupjuma parametru noteikšanai virsmām ar neregulāru raksturu balstās uz gadījuma lauka teoriju un normālo sadalījuma likumu, ir svarīgi noteikt vai asimetrijas Ssk un ekscesa Sku vērtību novirzes no Normālā sadalījuma likuma ietekmēs aprēķina rezultātu precizitāti.

1.3. Virsmas raupjuma ordinātu sadalījuma likuma novērtējums

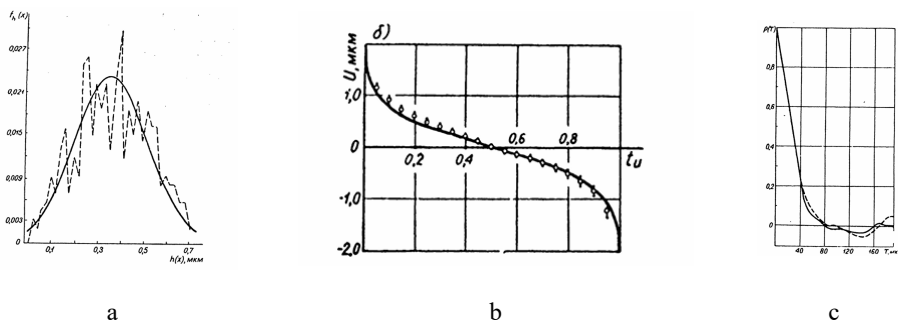
Kā bija minēts iepriekšējā sadaļā, vairāki nodiluma aprēķinu modeli balstījās uz konkrēto pieņēmumu, ka virsmām ar neregulāru raksturu raupjums tiek aprakstīts ar normālu gadījuma funkciju. Tāds pieņēmums bija veikts, balstoties uz 20.gadsimta vidū veiktiem pētījumiem par virsmas raupjuma ordinātu sadalījuma atbilstību Gausa sadalījumam.

Tā **Whitehouse** bija veicis slīpētas virsmas ģeometrijas analīzi, ģenerējot virsmas pie atšķirīgas abrazīva grauda formas un augstuma sadalījuma [51]. Tika konstatēts, ka neatkarīgi no graudu sadalījuma un formas slīpētas virsmas ordinātu sadalījums ir tuvs normālam sakarā ar slīpripas graudu nospiedumu gadījuma rakstura mijiedarbību. Uz varbūtības papīra izdrukātais ordinātu sadalījuma grafiks bija taisna līnija, kas atbilst normālās varbūtības grafikam. Pie tām tika secināts,

ka korelācijas funkcijai ir eksponenciālais veids. Šeit var minēt arī citus zinātniekus - Greenwood, Williamson, Pesante, kuri bija veikuši analogiskas pārbaudes uz atbilstību Normālam sadalījuma likumam [52].

Tā 1975.gadā **Husu, Vittenberg, Palmovs** bija pārbaudījuši virsmas profila ordinātu sadalījuma atbilstību Normālam sadalījuma likumam, izmantojot saskaņas kritēriju $n\omega^2$ [50]. Pētnieki bija pārbaudījuši dažādas virsmas – virpotas, frēzētas, elektropulētas un slīpētās pie atšķirīgiem apstrādes režīmiem – rupjas, glūdas un smalkas apstrādes. Pārbaudes rezultāti liecināja par to, ka abrazīvi apstrādātām virsmām nelīdzenumu empīriskais sadalījums ar varbūtību 95% atbilst normālām tikai pie smalkapstrādes (dažām virsmām arī pie glūdas apstrādes), bet virsmām ar determinēto komponenti – virpotām, frēzētam - neatbilst. Visām pētāmām virsmām bija redzama skaidra likumsakarība starp saskaņas kritērija vērtību un apstrādes režīmu – jo rupjāka apstrāde, jo lielāka $n\omega^2$ vērtība. Zinātnieki bija pārbaudījuši atbilstību Normālam sadalījuma likumam arī vizuāli – pēc gadījuma lieluma izvietojuma ap tā vidējo vērtību un virsmas ordinātu vērtību grupēšanas. Papildus bija veikta virsmu profilu korelācijas funkciju izpēte; tika secināts, ka virsmām, apstrādātām ar abrazīviem instrumentiem, korelācijas funkcijas ir rimstošas līknes bez periodiskās sastāvdaļas.

Rudzītis bija veicis hipotēzes pārbaudi par sadalījuma likuma uz atbilstību Normālam sadalījuma likumam slīpētām un lepētām virsmām, izmantojot Pirsona un Kolmogorova kritērijus, kā arī asimetrijas, ekscesa vērtības pēc eksperimentālā ordinātu sadalījuma (skat. 1.11.att., a), atbalsta līkni un korelācijas funkciju [17].



1.11.att. Profila raupjuma ordinātu sadalījuma pārbaude [17]

- a – eksperimentāli iegūts ordinātu sadalījuma blīvums un Gausa sadalījums
- b – eksperimentāli iegūtas atbalsta līknes salīdzinājums ar Laplasa funkciju
- c – plakanslīpētas virsmas korelācijas funkcijas ģenerēšana

Profila raupjuma mērījumu eksperimentu rezultātā tika secināts, ka tikai dažos gadījumos ar nelielu varbūtību var pieņemt hipotēzi par raupjuma ordinātu sadalījuma normalitāti. Taču autors atzīmē, ka iegūtie eksperimentālie dati bija aptuveni, jo aprēķinu specifikas dēļ bija izmantotas visas ordinātas, t.sk. arī atkarīgas. Asimetrijas koeficienta vērtības bija vairākās reizēs lielākas par teorētisko, kļūda bija lielāka par 100%; atšķirība starp Rku vērtībām dažos gadījumos bija

sasniedusi 30%. Salīdzinot profila atbalsta garuma vērtības ar Laplasa funkcijas vērtībām pie konkrēta šķēluma līmeņa u , tika secināts, teorētiska sakarība ļoti labi iekļāvās ticamības intervālā (1.11.att., b). Korelācijas funkcijas analīzes rezultāti pie profila atšķirīgiem bāzes garumiem liecināja par to, ka slīpētām un lepētām virsmām saite starp punktiem zūd ļoti ātri, ko var aprakstīt ar 1. vai 2.tipa eksponenciālām korelācijas funkcijām (1.11.att., c).

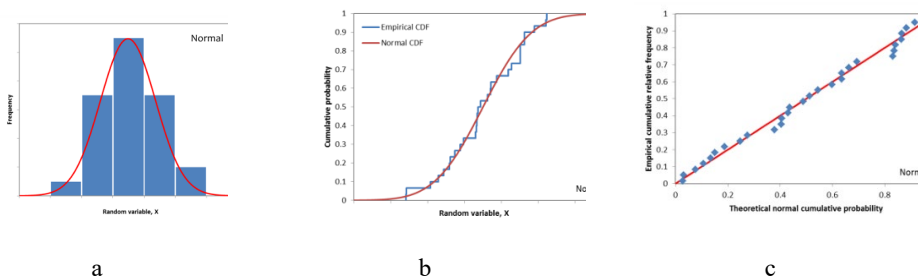
Mūsdienīgo pētījumu par virsmas raupjuma modeļa atbilstību Normālam sadalījuma likumam ir ļoti maz. **Nikolaos E. Karkalos** bija mēģinājis veikt virsmas pēc hidroabrazīvas griešanas raupjuma modeļa analīzi, salīdzinot asimetrijas Rsk un ekscesa Rku vērtības ar normāla sadalījuma funkcijas parametriem [53]. Atšķirība starp nomērīto un standartizēto Rsk vērtību sastādīja vairāk par 100%, Rku vērtības atšķīrās pa 40%, tikai dažiem paraugiem bija redzama sakritība.

Peerapon Wechsuwanmanee bija veicis raupjuma ordinātu statistiskā sadalījuma salīdzināšanu ar pielāgoto normālā sadalījuma līkni, analizējot virsmas raupjuma ietekmi uz aukstuma formējamību lieces procesos [54]. Rezultāti norādīja uz tuvu atbilstību Gausa sadalījumam.

Margarida Martins Quezada, pētot zobu protezēšanas akrila sveķu virsmas pie manuālas un mehāniskas pulēšanas, izmantoja ordinātu sadalījuma funkciju un tās raksturotājus Rsk un Rku virsmas modeļa pārbaudei [55]. Autore atzīmē, ka pie mehanizētas pulēšanas Rku vērtības ir tuvas $Rku=3$, kļūda sastāda ap 10%, taču ir redzama asimetrija ordinātu sadalījumā – Rsk vērtības tiecas 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 uz atbilstību Normālam sadalījuma likumam. Tā 2021.gadā **Hugo Hernandez** bija veicis apjomīgu analīzi par eksistējošiem normalitātes testiem, iekļaujot tajā 55 dažādas metodes [56]. Autors sadalīja šīs metodes piecās atšķirīgās grupās. Pirmā grupa ietvēra sevī **grafiskās metodes**, kuras balstās uz analītisko pieeju normalitātes noteikšanai. Šajā grupā ietilpst – histogramma; Q-Q Kvantīļu grafiks; P-P varbūtības grafiks; CFD Sadalījuma funkcijas grafiks.



1.12.att. grafiskas metodes pārbaudei uz normalitāti [56]

a – histogramma, b - CFD Sadalījuma funkcijas grafiks, c - P-P varbūtības grafiks

Otrā grupa – **uz empīriskās kumulatīvās sadales funkcijas balstīti testi**. Šeit tiek meklētas atšķirības starp empīrisko kumulatīvo sadalījuma funkciju un teorētisko normālo kumulatīvo varbūtību, izmantojot Crámer-von Mises, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling testus u.c. Doto testu būtību var noformulēt sekojoši:

$$TS = f(F_c(x_i) - \phi_N(x_i)) \quad (1.37.)$$

kur TS – testa statistika;

F_c – empīriskais kumulatīvais sadalījums, novērtēts pie novērojumu skaita i ;

ϕ_N – teorētiskais normālais kumulatīvais sadalījums, novērtēts pie novērojumu skaita i ;

f – atbilstošā funkcija.

Trešā grupa – **uz regresiju un korelāciju balstītie testi**. Šajā grupā ietilpst tādi populāri testi kā Shapiro-Wilk test un D'Agostino tests. Iegūtā testa statistika W tiek izmantota, lai noteiktu normālās hipotēzes kļūdainas noraidīšanas varbūtību (P-vērtība) pie izlases apjoma 3-50. Citi zinātnieki bija modificējuši SW lineāras regresijas testu, piedāvājot normalitātes pārbaudi lielam izlases apjomam. SW statistika tiek noteikta pēc sekojošās formulas:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.38.)$$

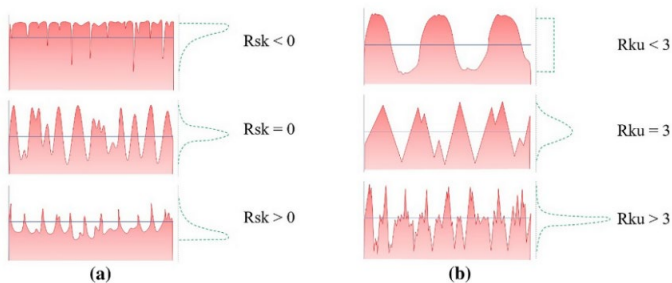
kur W – SW kritērija statistika;

$\bar{x}$ – vidējais aritmētiskais.

Ceturrtā grupa – **uz momentiem balstīti testi**. Šeit lielumu sadalījuma uzvedība tiek noteikta pēc sadalījuma funkcijas momentiem. Pēc normālā sadalījuma definīcijas gadījuma lieluma x 3.kārtas un 4.kārtas momentiem jābūt vienādiem:

$$M_3(x) = \frac{[(x - \mu)^3]}{Sq^3} = 0 \quad (1.39.)$$

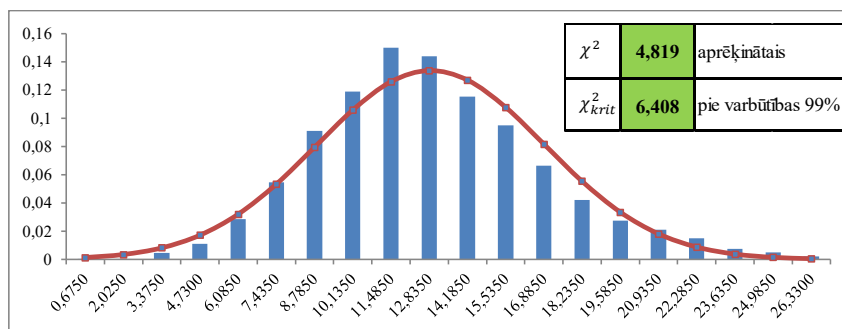
$$M_4(x) = \frac{[(x - \mu)^4]}{Sq^4} = 3 \quad (1.40.)$$



1.13.att. Virsmas ordinātu sadalījuma attēlojumi atkarībā no sadalījuma funkcijas asimetrijas (Rsk) un ekscesa (Rku) vērtībām [57]

Trešais moments raksturo gadījuma lieluma sadalījuma funkcijas asimetriju attiecībā pret vidējo asi. Ceturtais moments atspoguļo gadījuma lieluma ordinātu sadalījuma funkcijas asumu. Attiecība uz virsmas raupjumu $M3(x)$ ir virsmas raupjuma asimetrijas parametrs Rsk un $M4(x)$ virsmas raupjuma ekscess Rku . 1.13.att. ir redzamas dažādu virsmu raupjuma profilogrammas un profila punktu sadalījuma blīvuma funkcijas ar normētiem momentiem un novirzēm no normāla sadalījuma. Uz momentiem balstītus testus piedāvā tādi zinātnieki kā D'Agostino and Pearson, Jarque-Bera, Hoskinga, Desgagné-Lafaye u.c.

Piektajā grupā ietilpst **citi analītiskie testi**. Ļoti populārs ir Karla Pirsona χ^2 tests, lai pārbaudītu hipotēzi par empīriskā sadalījuma atbilstību teorētiskam sadalījumam pie liela izlases lieluma ($n \geq 100$). Pirsona kritēriju nosaka pie konkrētas varbūtības, izejot no brīvības pakāpju skaita. Geary piedāvāja testu, balstītu uz attiecību starp vidējo novirzi un standartnovirzi. Citi zinātnieki, piemēram, Spiegelhalter, Martinez and Iglewicz, bija izmantojuši līdzīgo pieeju.



1.14.att. Normalitātes pārbaude pēc Pirsona χ^2 tests

Pēc normalitātes testu analīzes Hugo Hernandez bija veicis to salīdzināšanu pēc Monte Karlo power kritērija ($1-\beta$), lai noteiktu testa spēju pareizi identificēt izlasi. Jo lielāka ir testa jauda, jo mazāka ir iespēja pieļaut otrā veida kļūdu, t.i. neatrast atšķirības, kad reāli tās eksistē. Jaudas kritēriju ietekmē nozīmīguma līmenis α , izlases apjoms n un efekta lielums ζ (starpība starp salīdzinātām vidējām vērtībām), tāpēc lielākai daļai testu, kad $n > 50$, jaudas kritērijs sasniedz 100%. Hugo Hernandez apkopoja 20 pētījumus no 1990. līdz 2021. gadam, kuros tika salīdzināta normalitātes testu jauda. Viņš bija ņēmis vērā tikai tos rezultātus, kas iegūti mazai izlasei ($n < 35$), jo jaudas atšķirības starp testiem bija acīmredzamākas. Vislabākos rezultātus parādīja Shapiro-Wilk regresijas tests, uz empīriskās kumulatīvās sadales funkcijas balstīts Andersona-Darlinga tests un Hoskinga L-momenta tests.

Daži no augstāk minētiem kritērijiem figurē standartā LVS ISO 5479:2000 - Statistisko datu apstrāde - Normālsadalījuma novirzes testi [58]. Tā, piemēram, uz momentiem balstītie testi – virziena kritērija pārbaude uz asimetriju $\sqrt{b_1}$, izliekumu b_2 , kopīgais kritērijs $\sqrt{b_1}$ un b_2 , Šapiro-

Vilka un Eps-Pally testi vienai neatkarīgai izlasei, modificēts Šapiro-Vilka tests vairākām neatkarīgām izlasēm.

Sakarā ar to, ka pie virsmas raupjuma ģeometrijas uzņemšanas tiek ģenerēta virsma, kura sastāv no miljoniem punktu, tad 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 dīls ar argumenta palielināšanos pēc absolūtas vērtības, sadalījuma blīvums atšķirsies no normālā pārsvarā 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, raksturīgām Normālam sadalījumam, ir lietderīgi izmantot uz momentiem balstītus testus. Tas nozīmē, ka var ierobežoties ar asimetrijas Ssk un ekscesa Sku vērtību noteikšanu.

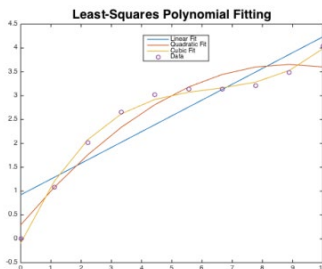
1.4. Virsmas datorapstrādes operāciju ietekme uz raupjuma parametru noteikšanas precizitāti

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, kuri atklāj virsmas īpatnības un raksturo tās ekspluatācijas īpašības. Kā ir zināms pēc detaļas izgatavošanas tā virsma nevar būt ideāli plakana un glūda, jo apstrādes laikā detaļas kvalitāti ietekmē vairāki faktori, piemēram, termoprocesi, vibrācijas, apstrādes centru vadotņu novirzes u.c., no kuriem izvairīties nav iespējams. Pie tām mēriekārtas konfigurācijai arī ir ievērojama ietekme uz uzņemtas topogrāfijas ģeometriju. Tāpēc virsmas līmeņošanas un formas atdalīšanas operācijas, kā arī S- un L-filtru pielietošana viļņainības un mikroraupjuma atdalīšanai, tiek aktīvi izmantotas virsmas ģeometrijas un raupjuma parametru analīzē [59-65].

Mūsdienās ļoti daudz autoru pēta konkrēti L-filtra ietekmi uz raupjuma parametru precizitāti, jo kā ir zināms, neatbilstoša cut-off izvēle var stipri izmainīt virsmas ģeometriju un attiecīgi samazināt raupjuma parametru vērtības. Savukārt, pirms viļņainības atdalīšanas ir svarīgi nolīmeņot virsmu un/vai atdalīt formu, lai uzģenerētu vidusplakni/viduslīniju raupjuma parametru noteikšanai [66]. Šīm operācijām ir primārā ietekme uz virsmas raupjuma ģeometriju. Virsmas raupjuma standartos ISO 25178 un 21920 ir dotas rekomendācijas un paskaidrojumi virsmas filtrēšanai un tās secībai, savukārt, kādi operatori un filtri ir jāizmanto konkrētam virsmas tipam nav definēti.

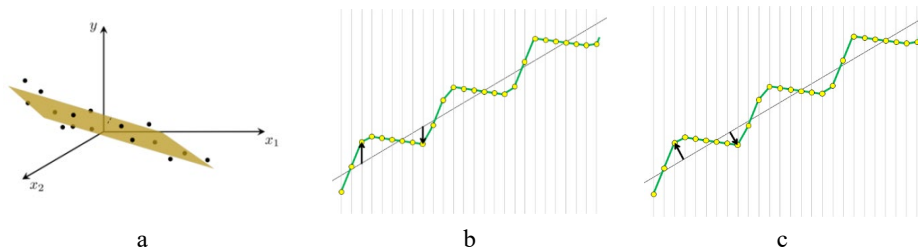
Tādas datorapstrādes programmas kā MCube Map Ultimate, TalyMap, MountainsSPIP piedāvā diezgan daudz variantu, kā var īstenot līmeņošanas operācijas pēc virsmas topogrāfijas uzņemšanas, pamatojoties uz pētāmas virsmas īpatnībām. Pamatā līmeņošana īstenojas pēc mazāku kvadrātu metodes [67]. Šī metode nodrošina virsmas punktu vislabāko aproksimāciju. Datorprogramma ģenerē mazāko kvadrātu plakni/līniju, kura kļūst par horizontālo referenci un kalpo par atskaites plakni vai līniju virsmas vai profila punktiem. Mazāko kvadrātu plakne/līnija tiek izteikta ar polinomu jeb funkciju. Atkarībā no polinoma pakāpes mainās funkcijas izteiksme;

jo lielāka polinoma pakāpe, jo labāk tiek aproksimēti virsmas punkti. Tā pie polinoma pakāpes $p=1$ notiek virsmas līmeņošana (tiek noņemts virsmas slīpums), pie $p=2$ tiek atdalīta pamatforma. Pie lielākām polinoma pakāpēm kopā ar formu tiek atdalīta arī viļņainība (skat. 1.15.att.).



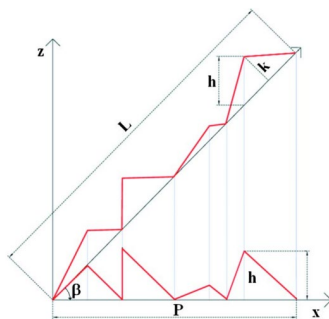
1.15.att. References līnijas izskats atkarībā no polinoma pakāpes [68]

Datorapstrādes programma MCube Map Ultimate 10 piedāvā vairākas līmeņošanas operācijas. **Least square plane leveling (LSPL)** gadījumā datorprogramma modelē mazāko kvadrātu plakni, ar nosacījumu, lai distances kvadrātu summa no punktiem līdz šai plaknei būtu mazāka. Pie tām distance starp virsmas punktu un LS plakni tiek noteikta Z-ass virzienā (vertikāli), skat. 1.16.att., b. Pēc LS plaknes atskaitīšanas, attālums starp virsmas punktiem nemainās, bet virsmas ģeometrija var deformēties/ izmainīties (1.17.att.). Programmas izstrādātāji rekomendē pielietot TLSP līmeņošanu, ja virsmas slīpuma leņķis ir liels.



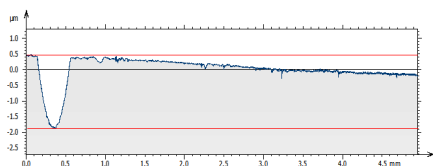
1.16. Virsmas references plaknes/ līnijas ģenerēšana
a – references plaknes ģenerēšana [67], b - pēc LSPL, c – pēc TLSP [69]

Total Least square plane leveling (TLSP) gadījumā datorprogramma modelē totālo mazāko kvadrātu plakni, ar nosacījumu, lai distances kvadrātu summa no punktiem līdz šai plaknei būtu vismazākā. Pie tām distance starp virsmas punktu un TLS plakni tiek noteikta pa normāli (perpendikulāri TLS plaknei), skat. 1.16.att., c. Pēc TLS plaknes atskaitīšanas virsmas ģeometrija saglabājas, bet mainās attālums starp virsmas punktiem. Standartā ISO 25178-3 tiek rekomendēts izmantot TLSP metodi neatkarībā no virsmas apstrādes veida, bet Mitutoyo rokasgrāmatā tomēr LSPL tiek piedāvāts kā labākais variants virsmām ar nejaušu nelīdzenumu izvietojumu, taču ir jāņem vērā, ka virsmas defekti, ekstrēmi pīķi, ieplakas, kā arī virsmas periodiskās komponentes ļoti ietekmē LS plakni (1.17.att.).

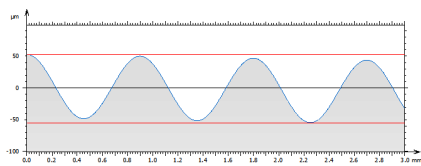


1.17.att. Profila ģeometrijas izmaiņas pēc LSPL [70]

Ar funkciju **Minimum zone plane leveling (MZPL)** datorprogramma modelē divas paralēlas plaknes, kuras norobežo virsmu, un meklē labāku orientāciju, lai minimizētu attālumu starp šīm divām plaknēm. Digital surf kompānijas pētnieki bija konstatējuši, ka MZPL metode diezgan labi novērš LSPL metodes problēmu [69]. 1.18.att. ir redzami divi atšķirīgi profili ar specifisku struktūru. Tā 1.18.att.,a profilam ir redzama dziļa izteikta ieplaka, bet 1.18.att.,b profilam – periodisko elementu atšķirīgs izvietojums. Šajos gadījumos Minimālās zonas metode nodrošina pareizu profila galveno virzienu.



a



b

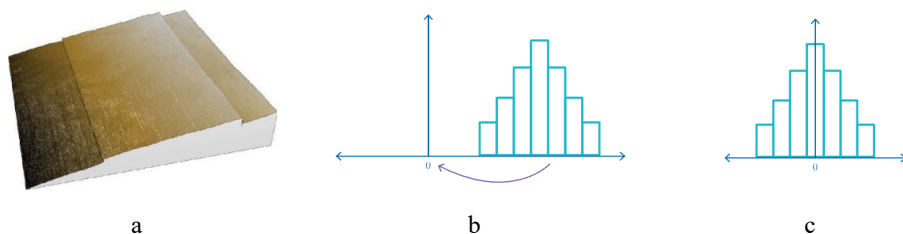
1.18.att. MZPL metodes attēlojums [69]

a – profils ar dziļu ieplaku, b – profils ar periodisko elementu atšķirīgu izvietojumu

Han Shu bija salīdzinājis trīs līmeņošanas veidus pie SHS (step height standard) parauga virsmas analīzes, izmantojot mazāko kvadrātu metodi, Minimum zone plane leveling un uzlaboto Minimum zone plane leveling. Nenoteiktības aprēķinu rezultāti norādīja uz to, ka uzlabotai MZPL metodei formas kļūdas vērtība ir tuvāka reālai salīdzinājuma ar citām metodēm. Taču autors atzīmē metodes ierobežojumus, saistītus ar parauga izmēriem, jo darbā tika apskatīti paraugi ar mērīšanas laukumiem $5 \times 5 \mu\text{m}$, $10 \times 10 \mu\text{m}$ [71].

Dažreiz ar profilometru ņemtai virsmai ir redzamas vertikālās nobīdes starp profiliem (1.19.att.,a); tas ir saistīts ar Y ass novirzi no taisnuma. Šajā gadījumā ir jāveic speciālā līmeņošanas operācija – **line by line leveling**. Eksistē divi varianti kā var veikt tāda veida līmeņošanu. Pirmais variants ir **Leveling line by line** - subtract the mean + LS-polynomial, kad katras līnijas ordinātu vidējā vērtība tiek nobīdīta pie 0 (skat. 1.19.att., b,c). Papildus tiek veikta

formas atdalīšana pēc LSP metodes, izvēloties vajadzīgo polinoma pakāpi (no 1 līdz 4). Doto metodi izmanto, ja virsmas topogrāfija ir uzņemta perpendikulāri apstrādes pēdām. Otro variantu **Leveling column by column** - subtract the mean + LS-polynomial – pielieto, ja virsmas topogrāfija ir uzņemta paralēli apstrādes pēdām.



1.19.att. Line by line līmeņošanas metode [69,72]

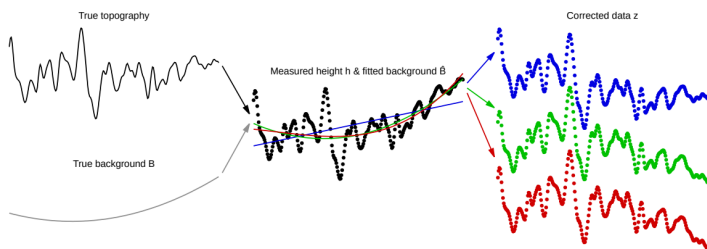
a - vertikālās nobīdes starp virsmas profiliem, b – profila ordinātu sadalījums, c – vidējā atņemšana

Vairākiem līmeņošanas veidiem eksistē speciālās funkcijas, ar kuru palīdzību var izslēgt nevēlamas struktūras, bet tādas operācijas prasa ilgāku laiku.

David Nečas bija veicis apjomīgu pētījumu par to, kā līmeņošana izmaina raupjuma mērīšanas rezultātu, un kā no tā izvairīties [73-74]. Autors atzīmē, ka galīgais profila garums kopā ar līmeņošanu ir diezgan svarīga problēma, kas pieved pie raupjuma datu izkropļošanas. Ja būtu iespēja uzņemt bezgalīgi garu profilu, līmeņošanas operācijas nebūtu vajadzīgas, bet tas nav iespējams. Nomērītas virsmas ordinātas augstums $h(x)$ nav vienāds ar raupjuma signālu $z(x)$, jo $h(x)$ vērtību kompensē tā saucamais fons ar konstanto bāzes garumu B .

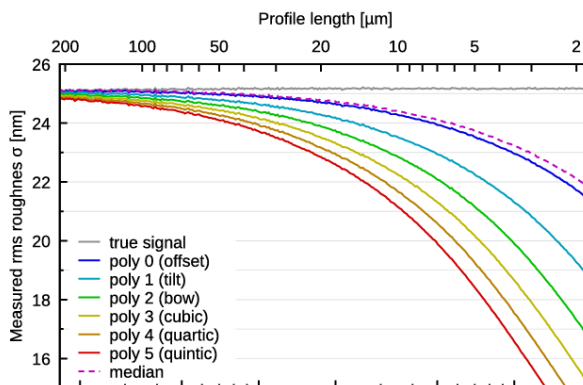
$$h(x) = z(x) + B \quad (1.41.)$$

1.20.att. Nečas ilustrēja profila līmeņošanu ar 1., 2. un 3.kārtas polinomiem, kur fona pielāgošana noņem nost ne tikai īsto fonu B , bet arī raupjuma komponentes. Tāpēc nolīmeņotas virsmas raupjuma parametriem ir samazinātas vērtības.



1.20.att. Vispārīgā shēma kā pielāgotais fons izkropļo virsmas ģeometrijas datus [74]

Autors piedāvā izvērtēt līmeņošanas ietekmi uz virsmas raupjumu, nosakot attiecību starp virsmas *ACF* korelācijas garumu *T* un profila garumu *L*, un sareizinot to ar atdalītu brīvības pakāpju skaitu. Piemēram, ja nomērītam profilam garums $L=10\text{ }\mu\text{m}$, korelācijas garums $T=0.4\text{ }\mu\text{m}$, tad pie līmeņošanas ar 2.kārtas polinomu, virsmas raupjums būs nepietiekami novērtēts par 12%. Līdzīgu algoritmu autors piedāvā 3D raupjuma novērtēšanas gadījumā. 1.21.att. grafikos ir redzama sakarība starp profila garumu un raupjuma parametra *Rq* vērtībām, veicot līmeņošanu pie atšķirīgām polinoma pakāpēm. Izmaiņas vērtībās bija fiksētās arī citiem raupjuma parametriem: *Rp*, *Rpq*, *Ssk*, *Sku*. Var secināt, ka pie palielinātā trases garuma līmeņošanas operācijas mazāk ietekmē raupjuma ģeometriju. Attiecīgi autors piedāvā izvēlēties optimālo trases garumu/mērīšanas laukumu, lai samazinātu līmeņošanas ietekmi uz raupjuma parametru vērtībām.



1.21.att. Parametra *Rq* vērtības pie dažādiem profila trases garumiem atkarībā no līmeņošanas veida [73]

Sakarā ar 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 [75]. Pie tām, standarts ISO 25178-3 brīdina [76], ka profila un tekstūras filtrēšana pie vienāda filtra veida un cut-off/nesting indeksa var dot pilnīgi atšķirīgus rezultātus, jo pie profila apstrādes filtrācija notiek traversa virzienā, t.i. perpendikulāri virsmas apstrādes pēdām, ja virsma ir anizotropa; Savukārt, pie tekstūras apstrādes filtrācija notiek abos X un Y virzienos, un sasaistes ar apstrādes pēdu virzienu var arī nebūt. Pētījumi par 3D virsmas līmeņošanas ietekmi uz atsevišķo profilu ģeometriju nebija atrasti, analizējot atbilstošo literatūru. Tāpēc svarīgi noteikt piemērotu līmeņošanas operāciju, kura saglabātu profila ģeometriju. Pie tām ir aktuāls jautājums par profila viduslīnijas un vidusplaknes savstarpējo izvietošanu, 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 izdalīt sekojošās problēmas, saistītas ar virsmas raupjuma parametru pielietojumu **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 pielieto Arčarda un Fleišera nodiluma aprēķina modeļus un berzes pāra kontakta tipu (gluda virsma-gluda virsma), kur virsmas raupjums nav ņemts 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 RSm_2 samazinātas vērtības.

2.3. Nav pārbaudīta virsmas tekstūras indeksa Str atbilstība anizotropijas koeficientam C ;

2.4. Nav veikta materiāla tilpuma 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 pie 2D raupjuma parametru noteikšanas.

4. Raupjuma ordinātu sadalījuma likuma novērtējums:

4.1. Normalitātes pārbaudes rezultāti norāda uz virsmu ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījuma daļējo atbilstību Normālam sadalījuma likumam, kas var ierobežot uz gadījuma lauka teoriju balstīto formulu pielietošanu raupjuma parametru izteikšanai.

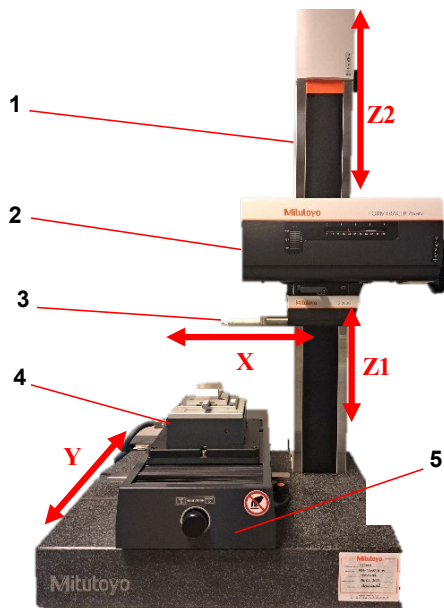
Hipotēze: Virsmas 3D un 2D raupjuma parametru precizēta noteikšana un integrēšana, kā arī atsevišķo materiāla noguruma raksturlielumu izmantošana dilšanas intensitātes aprēķinos un prognozēšanā paaugstinās nodiluma aprēķinu rezultāta ticamību.

- Jauns nodiluma un dilšanas intensitātes aprēķinu modelis ietvers papildus 3D raupjuma parametrus, ņemot vērā virsmas ordinātu sadalījuma novirzes no Normālā sadalījuma likuma.
- Nodiluma aprēķinu modelis būs derīgs gan elastīgā, gan plastiskā kontakta gadījumiem.
- Lai saglabātu virsmu ar neregulāru raksturu ģeometriju un nodrošinātu raupjuma parametru precīzu noteikšanu pēc datorapstrādes, tiks piedāvāta visoptimālākā līmeņošanas metode.
- Virsmas raupjuma soļa RSm_2 noteikšanai būs pielietots papildus parametrs, ar kura palīdzību, no soļa ģeometrijas būs izslēgtas nevēlamas komponentes.
- Virsmas anizotropijas izvērtēšana un deformētā materiāla noteikšana būs vienkāršotas ar standartizēto raupjuma parametru pielietošanu.

2. VIRSMAS RAUPJUMA EKSPERIMENTĀLĀ NOTEIKŠANA

2.1. 3D un 2D raupjuma mērīšanas eksperiments

Dotajā darbā virsmas 3D un 2D raupjuma parametru mērīšanas process realizējās pēc kontakta metodes. Datu iegūšana tika nodrošināta pateicoties profilogrāfa/profilometra zondei, kura saskarās ar virsmu skenēšanas procesā. Veidojoties mehāniskām svārstībām, mērīšanas iekārtas devējs pārveidoja mehānisko enerģiju elektriskajā signālā. Eksperimentu veikšanai tika izvēlēts profilometrs Mitutoyo Formtracer avant S-3000 (2.1.att). Šāda tipa iekārtu galvenā priekšrocība ir papildus Y koordinātu ass, ar kuras palīdzību ir iespējams uzņemt vairākas paralēlas profilogrammas un no tām izveidot virsmas 3D attēlu, kurš daudz uzskatāmāk un pilnvērtīgāk raksturo pētāmās virsmas mikrotopogrāfiju. Dotā iekārta ir aprīkota ar smalku dimanta adatu 12AAC731, kuras virsotnes noapaļojuma rādiuss ir $2\mu\text{m}$, konusa leņķis 60 grādi, un mērīšanas spēks 0.75 mN.



2.1.att. Profilometrs Mitutoyo Formtracer avant S-3000:

1 – Z2-ass bloks; 2 – X-ass bloks; 3 – Z1-ass detektors; 4 – pozicionēšanas galds; 5 – Y-ass pārvietojamais galds

2.1.att. ir parādīts, ka dotās mērīšanas sistēmas pamatelementi ir mehāniskā adata, kura īsteno kustību X-ass virzienā, pārvietojamais galds Y-ass virzienam, elektroniskā sistēma pārvietojumu kontrolei un datu saņemšanai. Profilometra mērīšanas diapazons un maksimālais

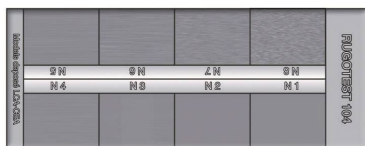
attālums starp virsmas punktiem ir redzami 2.1.Tabulā. Vadības dators saņem un apstrādā datus, iegūtus no elektroniskās sistēmas.

2.1.Tabula.

Profilometrs Mitutoyo Formtracer avant S-3000

ass	Mērīšanas diapazons	Maksimālais attālums starp punktiem
X	0 - 100 mm	0.1 μm
Y	0 - 100 mm	0.5 μm
Z	0 - 800 μm	0.01 μm (800 μm), 0.001 μm (80 μm), 0.0001 μm (8 μm)

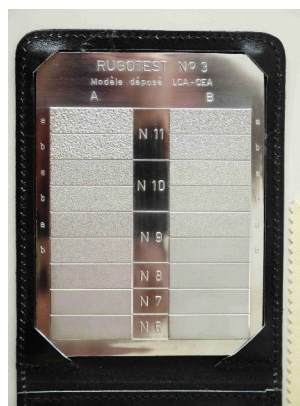
Eksperimentu veikšanai tika izvēlēti TESA RUGOTEST raupjuma etalonparaugi no nerūsējošā niķeļa un citi eksperimentālie paraugi no tērauda. Katrs etalonparaugs reprezentē konkrētu apstrādes veidu; vienam paraugam ir vairākas etalonvirsmas ar standartizētām *Ra* vērtībām (2.2.att.). Sakarā ar to, ka dotajā darbā tika pētītas virsmas ar neregulāru raupjumu, eksperimentam bija izvēlēti vairāki etalonparaugi, iegūti abrazīvās apstrādes un elektroerozijas rezultātā. Katram etalonparaugam tika pētītas virsmas ar atšķirīgo virsmas vidējo nelīdzenumu augstumu un attiecīgi cut-off vērtību.



a



b



c

2.2.att. Virsmu ar neregulāru raupjumu etalonparaugi

a – Rugotest 104 - plakanslīpēšana; b – apašlīpētas virsmas apstrādes pēdu attēlojums, c – Rugotest 3 A,B – Apšaušana ar skrotīm un apstrāde ar smilšstrūklu

Virsmas 3D un 2D raupjuma mērīšanas eksperimenti tika veikti pēc standartu LVS EN ISO 25178-2, -3, LVS EN ISO 21920-3:2022 prasībām un rekomendācijām, kā arī pēc M.Kumermaņa un Rudzīša metodikām [19,44], un Mitutoyo rokasgrāmatas [77-78].

3D topogrāfijas uzņemšanai bija nodefinēti mērīšanas laukuma (kvadrāta malu) izmēri; 2D mērījumiem raupjuma profila novērtēšanas garums bija ierobežots ar parauga izmēriem, t.i. bija izvēlēts maksimāli iespējamais novērtēšanas garums X un Y-ass virzienos.

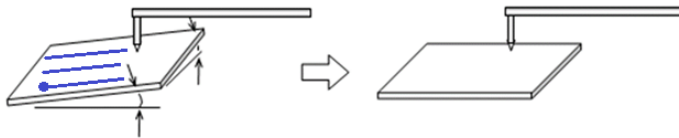
Izejot no novērtēšanas garuma/laukuma izmēriem katrai virsmai tika noteikts mērīšanas punktu skaits un attālums starp punktiem. Darbā izmantotās mēriekārtas konfigurācija limitē mērīšanas punktu skaitu līdz 18 000 000. 2.1.Tabulā ir atspoguļoti uzstādījumi 3D raupjuma mērīšanas eksperimenta veikšanai.

2.1.Tabula

3D raupjuma mērīšanas eksperimenta iestatījumi

N.p.k.	Parauga nr.	Apstrādes veids	Virsmas Nr.	Sa	Cut-off, mm	Mērīšanas laukums, $l_{ex} \cdot l_{ey}$, Mm	Attālums starp punktiem d pa x un y asīm, μm	Mērīšanas punktu skaits n pa x un y asīm
				μm	λ_c	$l_{ex} = l_{ey}$	$D_x = d_y$	$N_x = n_y$
1.	Rugotest 104	Plakanslīpēšana	Nr.2	0.05	0.25	1.25	0.5	2500
2.			Nr.6	0.8	0.8	4	1	4000
3.			Nr.8	3.2	2.5	12.5	3	4167
4.	Rugotest 105	Apaļslīpēšana	Nr.2	0.05	0.25	1.25	0.5	2500
5.			Nr.5	0.4	0.8	4	1	4000
6.			Nr.7	1.6	2.5	12.5	3	4167
7.	Rugotest 107	Elektroerozija	Nr.6	0.8	0.8	4	1	4000
8.			Nr.7	1.6	2.5	12.5	3	4167
9.			Nr.8	3.2	2.5	12.5	3	4167
10.	Rugotest 3A	Apšaušana ar skrotīm	Nr.6	0.8	0.8	4	1	4000
11.			Nr.7	1.6	2.5	12.5	3	4167
12.			Nr.8	3.2	2.5	12.5	3	4167
13.	Rugotest 3B	Apstrāde ar smilšstrūklu	Nr.6	0.8	0.8	4	1	4000
14.			Nr.7	1.6	2.5	12.5	3	4167
15.			Nr.8	3.2	2.5	12.5	3	4167
16.	Pul.1	Pulēšana	Nr.9	0.2	0.8	4	1	4000
17.	Lep.1	Lepēšana	Nr.12	0.025	0.25	1.25	0.5	2500

Pirms topogrāfijas uzņemšanas uz mērīšanas iekārtas tika veikta parauga virsmas iepriekšējā līmeņošana ("pre-levelling"), izmantojot sagataves slīpumu, kas aprēķināts ar iepriekšēju mērījumu. tas nozīmē, ka parauga virsma tiek automātiski noskenēta pēc trim līnijām un nolīmeņota (skat. 2.3.att.). funkcija "pre-levelling" ir svarīga, lai pēc eksperimenta veikšanas precīzāk uzģenerētu vidusplakni/viduslīniju pētāmai virsmai datorapstrādes programmā.



2.3.att. iepriekšēja līmeņošana uz mērīšanas iekārtas [78]

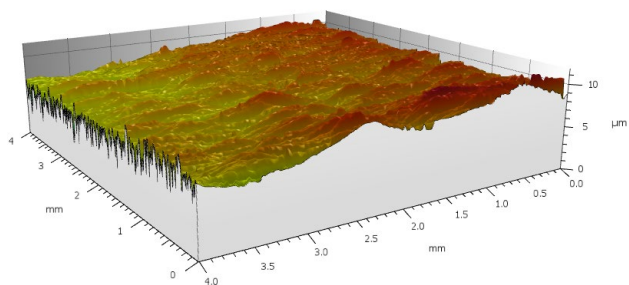
2.2. Tekstūras līmeņošanas operācijas korekta izvēle

Pēc 3D raupjuma mērīšanas eksperimenta iegūtie dati par virsmas topogrāfiju (piemērs - 1.Pielikuma 1.att.) bija apstrādāti datorprogrammā McubeMapUltimate 10. Pētāmām virsmām tika pielietotas dažādas līmeņošanas operācijas ar mērķi atrast optimālo variantu virsmas ģeometrijas saglabāšanai un attiecīgi raupjuma parametru precizitātes nodrošināšanai. Šajā sadaļā nebija apskatīta S-filtra (subraupjuma atdalīšanai) un L-filtra (viļņainības atdalīšanai) ietekme uz raupjuma parametru precizitāti.

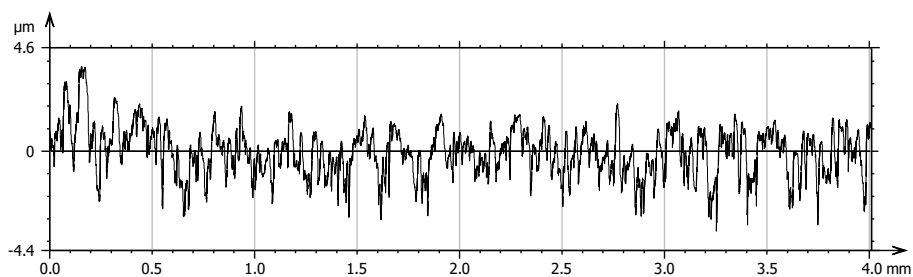
Lai novērtētu kā 3D virsmas līmeņošana ietekmē atsevišķo profilu ģeometriju, tika veiktas sekojošās darbības:

1. Profila izvilkšana no uzņemtas neapstrādātas topogrāfijas.
 - 1.1. Izvilkta profila P līmeņošana;
 - 1.1.1. P_{LSL} – profils pēc līmeņošanas ar LSL funkciju;
 - 1.1.2. P_{TLL} – profils pēc līmeņošanas ar TLSL funkciju;
 - 1.1.3. P_{MZL} – profils pēc līmeņošanas ar MZL funkciju;
 - 1.2. Dažādi nolīmeņoto profilu salīdzinājums un labākā varianta izvēle;
2. Uzņemtas topogrāfijas līmeņošana, izmantojot atšķirīgās līmeņošanas operācijas;
 - 2.1. Profila P_v izvilkšana no nolīmeņotās virsmas.
 - 2.1.1. P_{v_LSP} – izvilktais profils pēc virsmas līmeņošanas ar LSP funkciju;
 - 2.1.2. P_{v_TLSP} – izvilktais profils pēc virsmas līmeņošanas ar TLSP funkciju;
 - 2.1.3. P_{v_MZP} – izvilktais profils pēc virsmas līmeņošanas ar MZP funkciju;
 - 2.1.4. $P_{v_line_by_line}$ – izvilktais profils pēc virsmas līmeņošanas ar leveling line by line funkciju;
 - 2.1.5. $P_{v_columns_by_column}$ – izvilktais profils pēc virsmas līmeņošanas ar leveling column by column funkciju;
 3. Profilu 1.2. un 2.1.1.-2.1.5. ģeometrijas sakritības novērtēšana, izmantojot datorprogrammas funkciju “Subtract”.

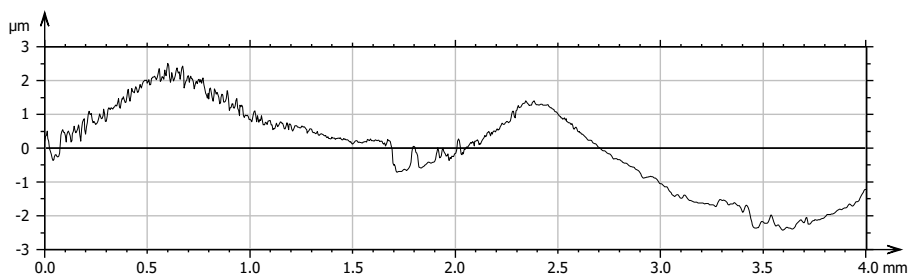
2.4.att. ir redzama plakanslīpetās virsmas 3D ģeometrija pirms datorapstrādes un izvilktie profili perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām. Profilam X-ass virzienā nav redzams izteikts sašķiebums, savukārt, Y-ass virziena profilam ir skaidri izteikts slīpums, kas neļauj adekvāti novērtēt raupjuma soli šajā virzienā.



a



b



c

2.4.att. Plakanslīpētas virsmas tekstūra pirms datorapstrādes

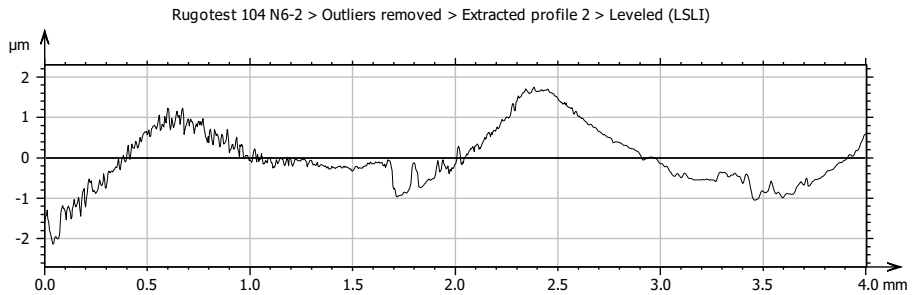
a – virsmas ģeometrijas 3D attēlojums

b – izvilktais profils virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām

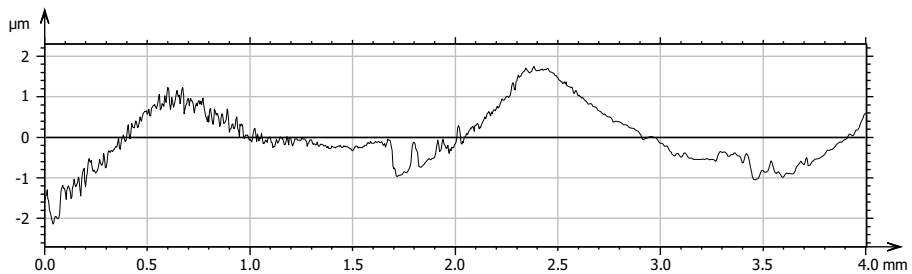
c – izvilktais profils virzienā paralēli apstrādes pēdām

2.4.att.,c redzamam profilam paralēli apstrādes pēdām vizuāli var izdalīt divus raupjuma soļus, savukārt pēc esošiem profila krustojumiem ar viduslīniju raupjuma solim būs kļūdaina vērtība. Lai atrisinātu doto problēmu profilam tika veikta līmeņošana ar funkcijām LSL, TLSL un

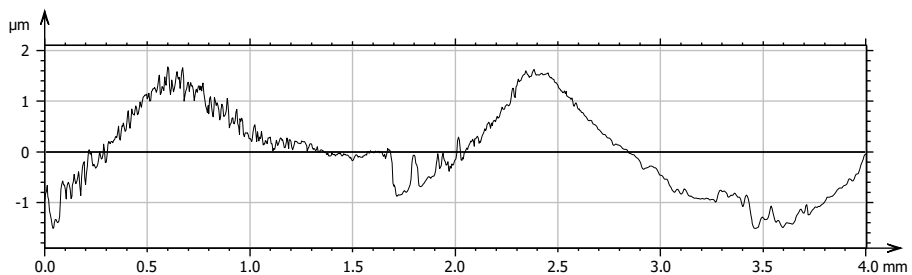
MZL leveling (2.5.att., a-c) un attiecīgi - nolīmeņoto profilu ģeometrijas salīdzinājums un optimāla varianta izvēle.



a



b



c

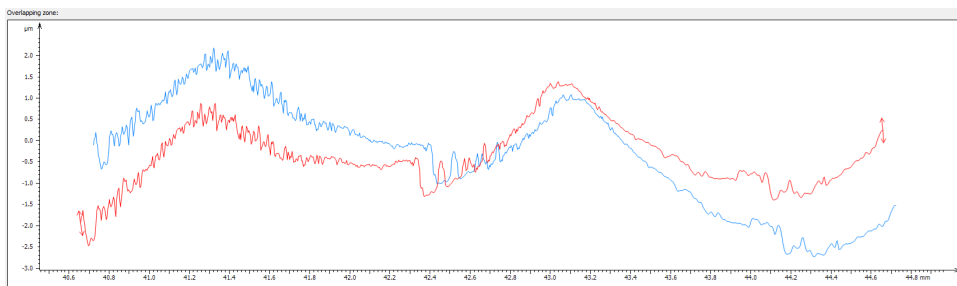
2.5.att. Profilu līmeņošana
a – LSL, b – TLSL, c - MZL

Pēc profilu vizuālās analīzes var secināt, ka ordinātu izvietojums attiecība pret viduslīniju dažos profila apgabalos ļoti izmainās. Ar funkcijām LSL un TLSL nolīmeņoti profili savā starpā ir ļoti līdzīgi. Ja salīdzināt profila raupjuma parametrus pēc līmeņošanas procedūrām (2.2.Tabula), var redzēt, ka vidējā aritmētiskā augstuma Ra vērtības pēc līmeņošanas procedūras samazinās, savukārt, raupjuma soļa RSm vērtības palielinās un dotajā gadījumā atbilst profila ģeometrijai pēc līmeņošanas pēc mazāko kvadrātu metodes.

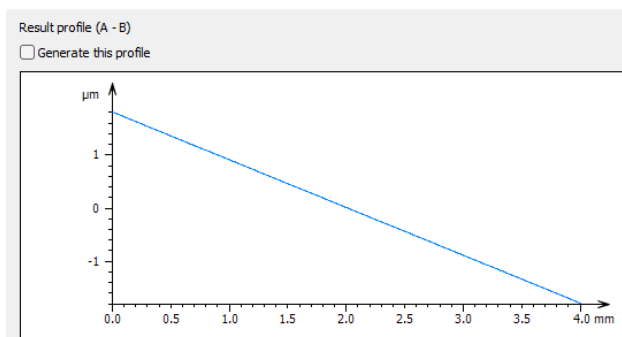
Sākotnējā profila P un nolīmeņoto profilu raupjuma parametri

Parametrs	P	P _{LSLI}	P _{TLSLI}	P _{MZLI}
<i>Ra</i>	1,06	0,57	0,57	0,66
<i>RSm</i>	1,45	1,71	1,71	0,81

Datorprogramma McubeMap 10 dod iespēju salīdzināt divu profilu ģeometrijas. Šim nolūkam tika izmantota datorprogrammas funkcija “Subtract”. 2.6.att. ir redzami divi profili; zilā krāsā – no neapstrādātās virsmas izvilktais profils, sarkanā krāsā – profils pēc LSL līmeņošanas. Profilu viduslīnijas bija izmantotas iepriekšējai pozicionēšanai. 2.6.att. b ir atspoguļots sākotnējā profila references līnijas (mazāko kvadrātu līnijas) slīpums. Abu profilu ģeometrija saglabājas, savukārt krustojumu skaits ar viduslīniju un to izvietojums ir dažādi.



a



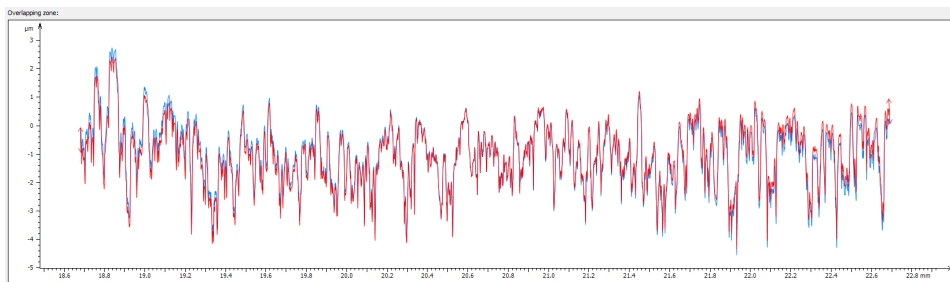
b

2.6.att. Y-ass profila līmeņošana

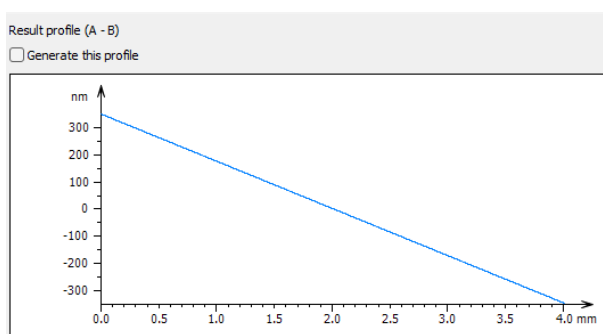
a – zilā krāsā – profils pirms līmeņošanas, sarkanā krāsā – profils pēc LSL.

b – sākotnējā profila references līnijas slīpums

Ja salīdzināt profilus pirms un pēc līmeņošanas var redzēt, ka sākotnēja X-ass profila references līnijas slīpums (2.7.att., b) ir vairākās reizēs mazāks salīdzinot ar Y-ass profilu un profila ordinātu izvietojums attiecībā pret viduslīniju pēc līmeņošanas praktiski nemainās.



a



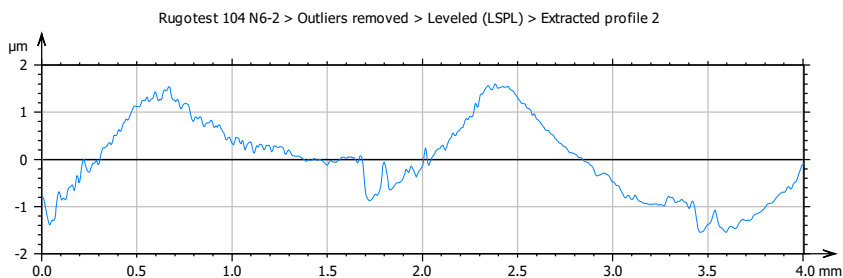
b

2.7.att. X-ass profila līmeņošana

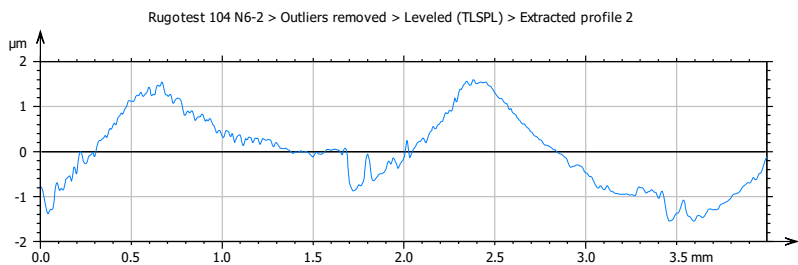
a – zilā krāsā – profils pirms līmeņošanas, sarkanā krāsā – profils pēc LSLI.

b – sākotnējā profila references līnijas slīpums

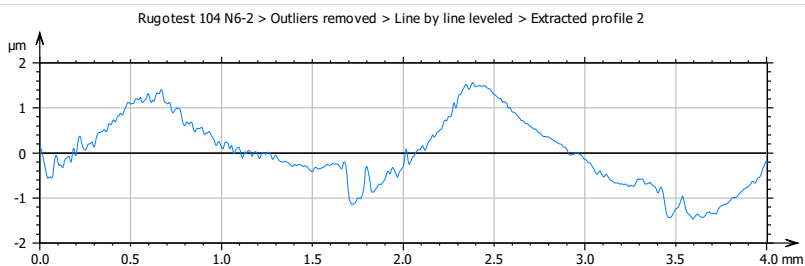
Nākamais solis bija virsmas līmeņošana, pielietojot atšķirīgas līmeņošanas operācijas, ar tālāko profilu izvilkšanu. 2.8.att. a-e ir redzami dažādi nolīmeņotas virsmas izvilktie profili.



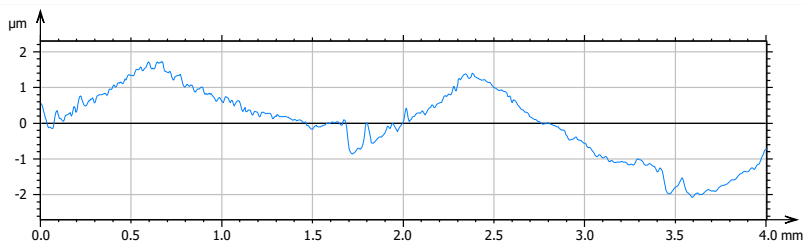
a



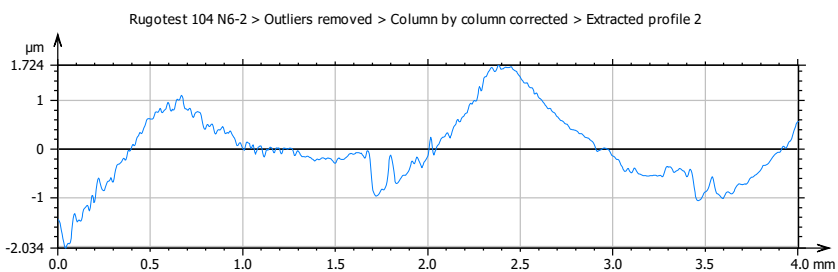
b



c



d



e

2.8.att. Profilu izvilksana no nolīmeņotām virsmām

a – LSPL, b – TLSPL, c – MZPL, d – leveling line-by-line + LS P=1, e – leveling column-by column +LS P=1

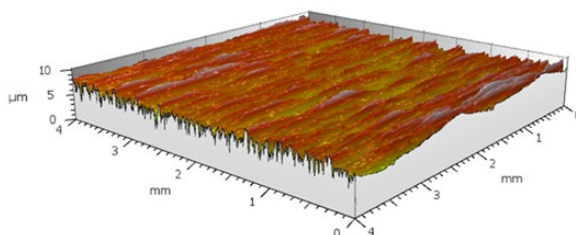
Lai noteiktu sākotnēji nolīmeņota profila P_{LSLI} ģeometrijas sakritības pakāpi ar P_{v_LSPI} , P_{v_TLSPI} , P_{v_MZPI} , $P_{v_line_by_line}$, $P_{v_columns_by_column}$ profiliem tika izmantots datorprogrammas funkcijas “Subtract” parametrs RMS – vidējā kvadrātiskā novirze, kura tiek rēķināta pārklāšanās zonas garumā. 2.3.Tabulā ir redzamas RMS vērtības virsmas profiliem atkarībā no līmeņošanas un F-operatora kombinācijas. Jo mazāka ir RMS vērtība, jo augstākā ir profilu sakritības pakāpe. Pētījuma ietvaros salīdzinājumam tika izvēlēti plakanslīpētās virsmas 100 profili X-ass virzienā un tik pat daudz profilu Y-ass virzienā, lai pārbaudītu kurš no virzieniem ir vairāk ietekmēts ar līmeņošanas operācijām.

2.3.Tabula.

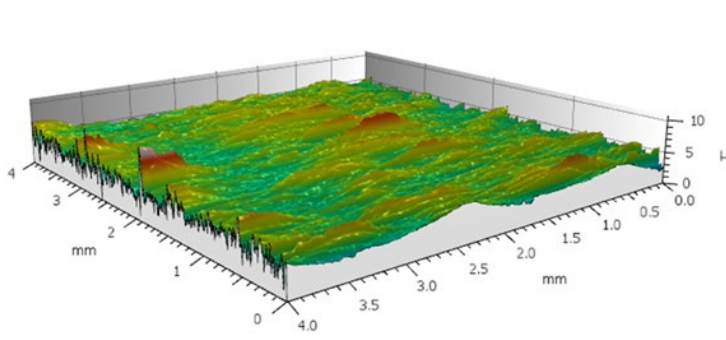
RMS vērtības virsmas profiliem atkarībā no līmeņošanas veida

N.p.k.	Līmeņošana	RMS_{vid} , nm (X-ass)	RMS_{vid} , nm (Y-ass)
1	LSPL	1.45e-7	2.59e-7
2	TLSP	1.28e-7	2.66e-7
3	MZPL	1.87e-7	2.78e-7
4	Leveling line by line - subtrack the mean + LS-polinomial, P=1	2.35e-10	3.54e-7
5	Leveling column by column - subtrack the mean + LS-polinomial, P=1	1.09e-6	2.89e-10

Pēc 2.3.Tabulas datiem var secināt, ka Leveling line by line + LS-polinomial P=1, dod visprecīzāko sakritību ar X-ass P_{LSLI} profilu, savukārt, Leveling column by column + LS-polinomial P=1, dod gandrīz pilnīgu sakritību ar Y-ass P_{LSLI} profilu. Sakarā ar to, ka virsmas 3D ģeometrija ir jāuzņem perpendikulāri apstrādes pēdām, izvēlēties leveling column by column nav korekti, jo virsmai paradīsies mākslīgi uzģenerēti ekstrēmi pīķi, kas ir atspoguļots 2.9.att., b. Attiecīgi, balstoties uz RSM vērtību, leveling line by line kopā ar LS-polinomial ir labākais variants.



a



b

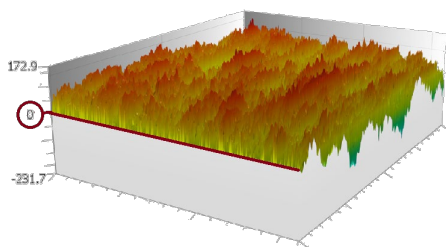
2.9.att. 3D virsmas attēlojums pēc līmeņošanas

- a - Leveling Line by Line - subtract the mean + LS-polynomial, $P=1$,
- b - Leveling column by column - subtract the mean + LS-polynomial, $P=1$

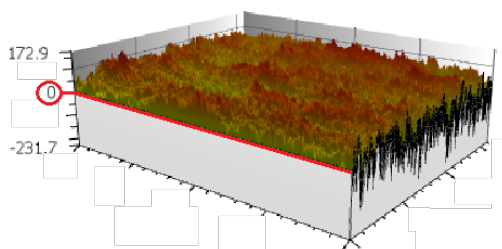
2.3. Virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējā izvietojuma noteikšana

Dotajā sadaļā grafiski tika pamatots, kādā veidā profilu viduslīnijas ir saistītas ar virsmas vidusplakni un kā to izvietojumu ietekmē līmeņošanas operācijas. Šīm nolūkam MCubeMAP Ultimate 10 datorprogrammā 3D virsmai pēc dažāda veida līmeņošanas mākslīgi bija uztaisītas divas renītes līdz virsmas vidusplaknei, lai salīdzinātu X-ass un Y-ass virzienos profilu viduslīniju izvietojumu attiecībā pret virsmas vidusplakni.

2.10.att. ir redzama plakanslīpētā virsma ar izteikto anizotropiju. Dotai virsmai, tika veikta līmeņošana pēc mazāko kvadrātu metodes LSPL.



a



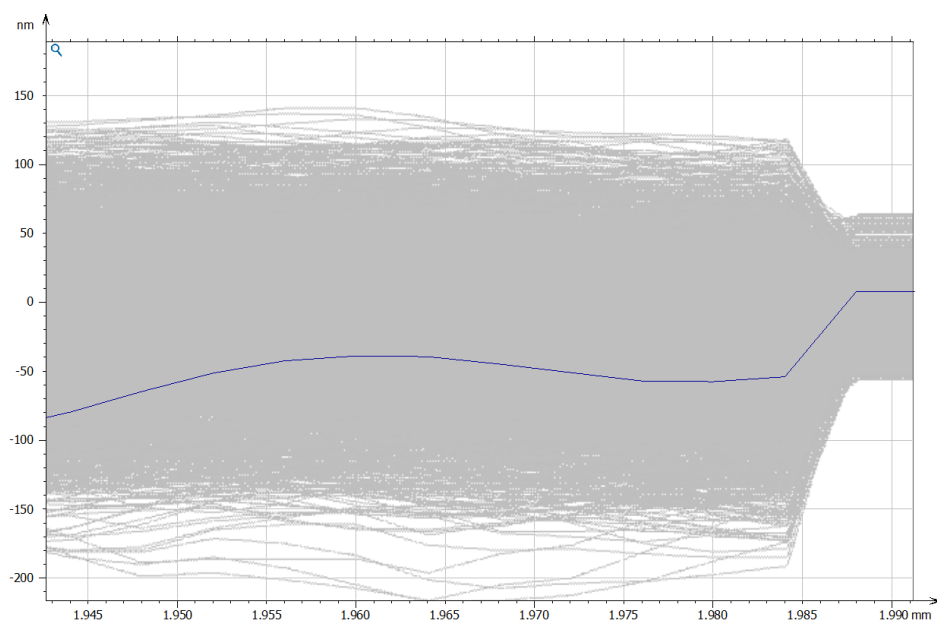
b

2.10.att. Virsmas ar mākslīgi izveidotām renītēm

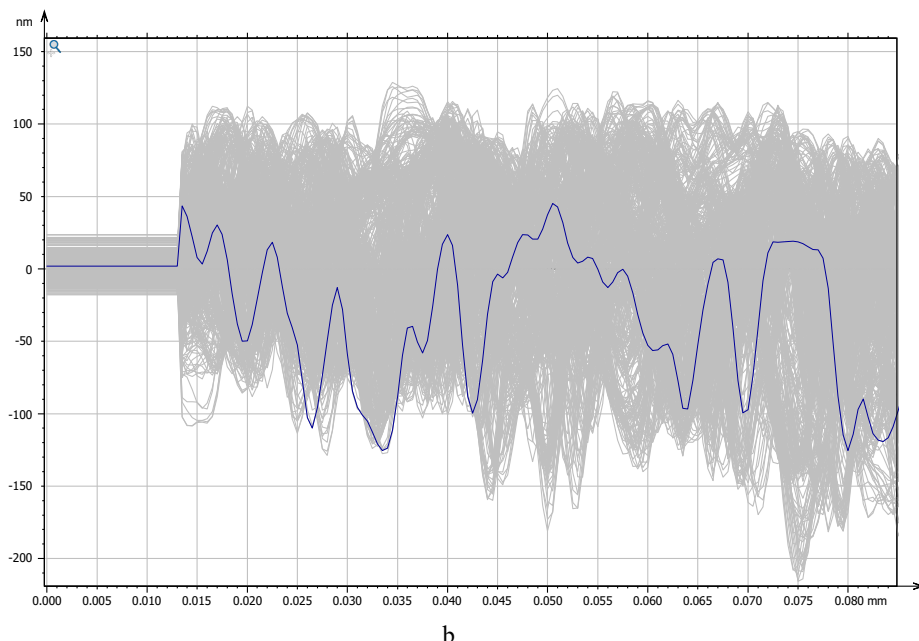
- a – renīte perpendikulāri apstrādes pēdām, b – renīte paralēli apstrādes pēdām

Nākamais solis bija šauras renītes ģenerēšana līdz virsmas vidusplaknei. Šim nolūkam tika pielietota datorprogrammas funkcija “Retouch” → “the mean” (izgriezt līdz vidusplakei). No sākuma virsmai izgrieza renīti virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām, lai noteiktu vidusplaknes un X-ass profilu viduslīniju savstarpējo izvietojumu. Pēc tām tāda pati procedūra tika veikta virzienā paralēli apstrādes pēdām vidusplaknes un Y-ass profilu viduslīniju savstarpējā izvietojuma noteikšanai. Renītes dotajā gadījumā kalpoja par virsmas vidusplakni, un to izvietojums X-ass un Y-ass profilos atspoguļoja viduslīnijas novirzi no vidusplaknes.

Dotajām virsmām ar datorprogrammas funkcijas “Extract series of profiles” palīdzību tika iegūti visi profili savstarpēji perpendikulāros virzienos ar soli – 1 punkts, t.i. X-ass virzienā – 3200 profili un Y-ass virzienā – 500 profili. Šāds profilu skaits ļauj precīzi noteikt viduslīnijas maksimālo novirzi no vidusplaknes. 2.11.att. b ir labi redzams, ka renītes izvietojums visiem profiliem Y-ass virzienā ir ļoti atšķirīgs, tas svārstās no $-0,06\mu\text{m}$ līdz $0,06\mu\text{m}$ attiecībā pret to viduslīnijām. Savukārt renītes izvietojums X-ass profiļiem (2.11.att., a) arī svārstās, bet svārstību amplitūda ir ievērojami mazāka – no $-0,015\mu\text{m}$ līdz $0,025\mu\text{m}$ attiecībā pret to viduslīnijām.



a



b
2.11.att. Virsmu ar mākslīgi izveidotām renītēm profili
a – apstrādes pēdu virzienā, b – perpendikulāri apstrādes pēdām

Lai iegūtu ticamus rezultātus par virsmas profilu viduslīnijām un vidusplakni savstarpējo izvietojumu, pētāmām virsmām tika veikta grafiskā analīze, kura iekļāva sevī:

- 1) Mākslīgas renītes izveidošanu atsevišķi perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām;
- 2) Virsmas profilogrammu “izvilkšanu” abos apstrādes pēdu virzienos;
- 3) Virsmas profilu viduslīniju maksimālo noviržu no vidusplaknes h_{x_max} un h_{y_max} noteikšanu; h_{x_max} un h_{y_max} ir vistālāk no vidusplaknes izvietotas renītes koordinātes.
- 4) Virsmas maksimālā nelīdzenuma augstuma Sz noteikšanu;
- 5) Virsmu profilu viduslīniju maksimālās izvietošanas novirzes attiecībā pret maksimālo virsmas augstumu Sz noteikšanu - h_{x_max}/Sz , h_{y_max}/Sz , %.

Lai izvēlētos optimālo līmeņošanas veidu tika salīdzināts virsmas vidusplaknes un profilu viduslīniju savstarpējais izvietoējums pie atšķirīgiem līmeņošanas veidiem, izmantojot iepriekš minēto grafisko analīzi.

2.4.Tabulā ir redzamas profilu viduslīniju maksimālās novirzes no vidusplaknes virzienos paralēli un perpendikulāri apstrādes pēdām. Tabulas dati norāda uz to, ka neviens no līmeņošanas veidiem nenodrošina visu profilu viduslīniju pilnīgu sakrišanu ar virsmas vidusplakni. Tā, veicot līmeņošanu *pēc mazāko kvadrātu metodes* abos virzienos ir redzamas viduslīniju novirzes no vidusplaknes izvietoējuma. 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.

2.4.Tabula.

Plakanslīpētās virsmas profilu viduslīņu maksimālā novirze no vidusplaknes atkarībā no līmeņošanas veida

Plakanslīpēšana Rugotest 104_N2	Līmeņošanas veids				
	LSP	Line by Line	Line by Line +LSP	Column by Column	Column by Column +LSP
$Sa, \mu m$	0,042	0,042	0,042	0,031	0,032
$Sz, \mu m$	0,404	0,392	0,376	0,349	0,350
Max novirze pa X-asi (h_{x_max}/Sz), %	4,94	0	0	10,51	6,28
Max novirze pa Y-asi (h_{y_max}/Sz), %	16,06	17,85	17,03	0	0

2.5.Tabulā ir atspoguļoti grafiskās analīzes rezultāti citiem pētāmiem paraugiem, kuri atšķiras pēc apstrādes veida. Analīzes rezultāti norāda uz to, ka līmeņošanas ietekmes tendence saglabājas visiem paraugiem. Veicot *LSP* līmeņošanu novirze pa X-asi sasniedz 6 %, bet pa Y asi – 17%. Izotropām virsmām pēc *line-by line* līmeņošanas h_{i_max}/Sz garenzivriezienā ir ievērojami mazāks nekā anizotropām. Ņemot vērā virsmas ģeometrijas uzņemšanas virzienu un pilnīgo sakritību starp vidusplakni un X-ass profilu viduslīnijām leveling line by line kopā ar mazāko kvadrātu polinomu ir optimālais variants virsmas ģeometrijas saglabāšanai.

2.5.Tabula.

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

Apstrādes veids	Ass	Max novirze h_{i_max}/Sz atkarībā no līmeņošanas veida, %				
		LSPL	Line by Line	Line by Line +PL	Column by Column	Column by Column +PL
Plakanslīpēšana	x	4,9	0	0	10,5	6,2
	y	16,1	17,8	17,0	0	0
Apaļslīpēšana	x	5,6	0	0	11,2	7,1
	y	15,2	18,2	17,7	0	0

2.5. Tabulas turpinājums

Apstrādes veids	Ass	Max novirze h_{i_max}/Sz atkarībā no līmeņošanas veida, %				
		LSPL	Line by Line	Line by Line +PL	Column by Column	Column by Column +PL
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

Attiecīgi, lai veiktu tālāko virsmas tekstūras datorapstrādi – noteiktu raupjuma parametrus, uzģenerētu virsmas ordinātu sadalījuma histogrammu, autokorelācijas funkciju utt., visiem paraugiem tekstūras līmeņošana tika veikta pēc line-by-line+PL metodes (piemērs - 1.Pielikuma 2.att.).

2.4. Secinājumi

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

1.1. Pilnīgā sakritība starp X-ass profilu viduslīnijām un virsmas vidusplakni ir novērojama, izvēloties līmeņošanu line by line;

1.2. Pilnīgā 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.

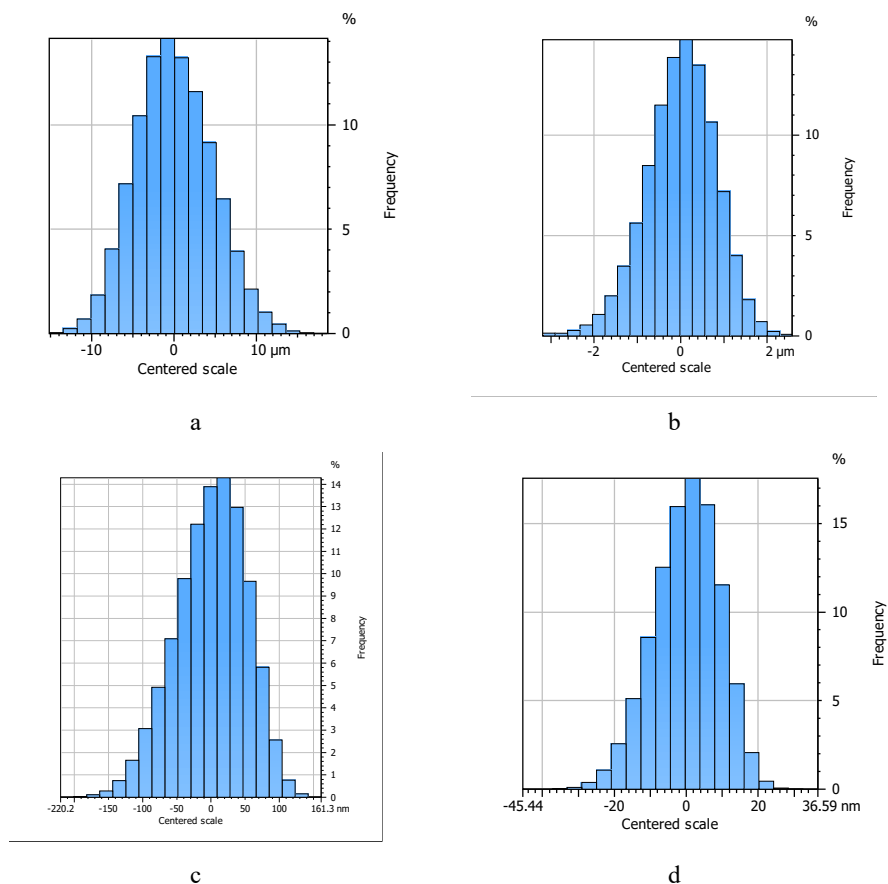
2. Ņemot vērā parametra *RMS* vērtības un vidusplaknes/viduslīnijas savstarpējā izvietojuma analīzi, tika secināts, ka līmeņošanas funkcija leveling line by line kopā ar LS-polinomial ir visoptimālākais variants virsmas ģeometrijas saglabāšanai.

3. VIRSMAS 3D un 2D RAUPJUMA PARAMETRU APRĒĶINI

3.1. Virsmas neregulārā raupjuma modeļa atbilstības pārbaude

Dotajā apakšsadaļā tika veikta paraugu virsmas raupjuma modeļa pārbaude, salīdzinot modeļa parametru teorētiskās vērtības ar eksperimentāliem datiem. Šīm nolūkam nolīmeņotām virsmām tika uzģenerēta virsmas ordinātu sadalījuma histogramma un noteikti 3D raupjuma parametri (piemērs - 1. Pielikuma 3. un 4. att.).

3.1.att. ir atspoguļotas virsmas ordinātu sadalījuma histogrammas virsmām ar neregulāru raksturu pēc abrazīvas apstrādes. Pēc histogrammu vizuālās analīzes pirmajā tuvinājumā var pieņemt, ka ordinātu sadalījums atbilst Normālam, uz ko norāda histogrammas zvanveida forma ar neizteiktu asimetriju.

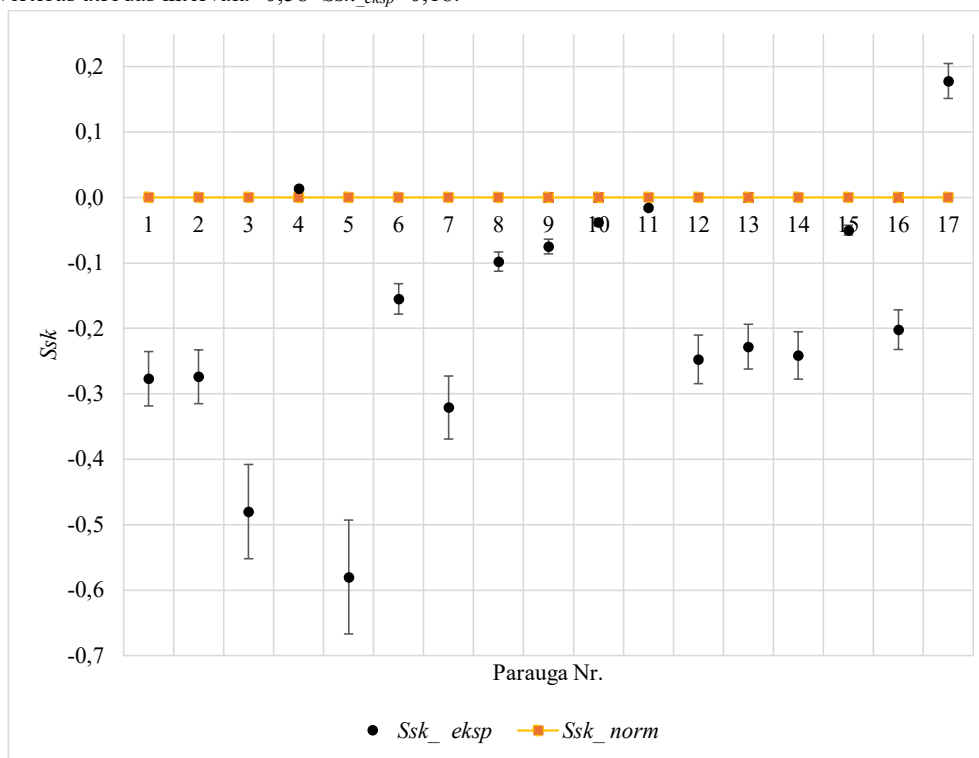


3.1.att. Virsmu ar neregulāru raksturu ordinātu sadalījuma histogrammas
a – apstrāde ar smilšstrūklu; b – apšaušana ar skrotiņ, c – plakanslīpēšana, d - pulēšana

Virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas atbilstība Normālam sadalījuma likumam bija pārbaudīta pēc sekojošiem kritērijiem:

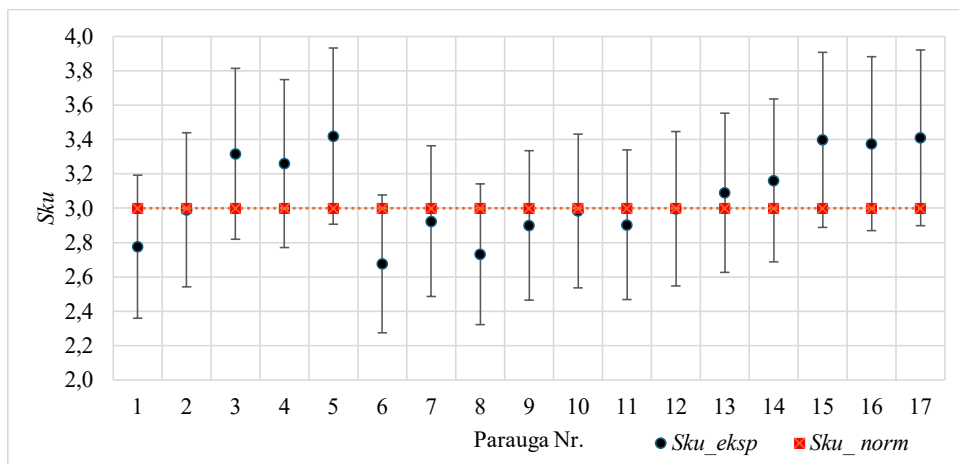
1. Ssk - virsmas asimetrija. Dotais parametrs raksturo virsmas ordinātu sadalījuma funkcijas asimetrijas attiecībā pret vidējo asi; Normālā sadalījuma likuma gadījumā $Ssk=0$.
2. Sku - virsmas ekscess. Dotais parametrs izsaka gadījuma lieluma sadalījuma funkcijas pīķa asumu; Normālā sadalījuma likuma gadījumā $Sku=3$.

3.2.att. ir atspoguļotas 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 nomērītas vērtības atrodas intervālā $-0,58 < Ssk_{eksp} < 0,18$.



3.2.att. Parametra Ssk eksperimentālās un teorētiskās vērtības

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



3.3.att. Parametra Sku eksperimentālās un teorētiskās vērtības

Lielu interesi izrāda raupjas virsmas 3D un 2D profila parametru salīdzinājums, jo ir svarīgi zināt, kāds ir virsmas nelīdzenumu sadalījuma funkcijas raksturs perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām. Attiecīgi nolīmeņotām virsmām tika izvilkti visi profili perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām un noteikti 2D raupjuma parametri (piemērs - 1.Pielikuma 5.-8.att.). 3.1.Tabulā ir attēlots paraugu virsmu raupjuma parametrs Ssk un attiecīgi virsmas profila raupjuma parametrs Rsk , kura vērtība ir izteikta kā vidējā starp visiem profiliem, tāpēc 3.1. Tabulā parādās apzīmējumi Rsk_{1-vid} un Rsk_{2-vid} . Veicot tabulas datu analīzi, 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, smilšstrūklas apstrādes, apšaudes ar skrotīm.

3.1.Tabula.

Parametru Ssk , Rsk_{1-vid} un Rsk_{2-vid} salīdzinājums

Apstrādes veids	N.p.k.	Ssk	Rsk_{1-vid}	$ \Delta Rsk_{1-vid} , \%$	Rsk_{2-vid}	$ \Delta Rsk_{2-vid} , \%$
Plakanslīpēšana	1	-0,277	-0,285	2,8	-0,195	29,6
	2	-0,274	-0,260	5,1	-0,009	96,7
	3	-0,480	-0,470	2,1	0,110	122,9
Apašlīpēšana	4	0,014	0,012	13,0	-0,530	173,2
	5	-0,580	-0,640	10,3	-0,080	86,2
	6	-0,155	-0,161	3,9	-0,018	88,4
Elektroerozija	7	-0,321	-0,309	3,7	-0,313	2,5
	8	-0,098	-0,084	14,3	-0,089	9,2
	9	-0,075	-0,069	8,0	-0,074	1,3

3.1.Tabulas turpinājums

Apstrādes veids	N.p.k.	Ssk	Rsk_{1-vid}	$ \Delta Rsk_{1-vid} $, %	Rsk_{2-vid}	$ \Delta Rsk_{2-vid} $, %
Apšaušana ar skrotīm	10	-0,038	-0,043	13,5	-0,031	8,4
	11	-0,016	-0,015	6,3	-0,015	6,3
	12	-0,247	-0,229	7,4	-0,219	11,5
Apstrāde ar smilšstrūklu	13	-0,228	-0,226	0,9	-0,210	7,9
	14	-0,241	-0,219	9,2	-0,237	1,7
	15	-0,050	-0,056	13,0	-0,055	12,2
Pulēšana	16	-0,202	-0,201	0,5	-0,386	91,1
Lepēšana	17	0,178	0,197	10,7	-0,140	178,7

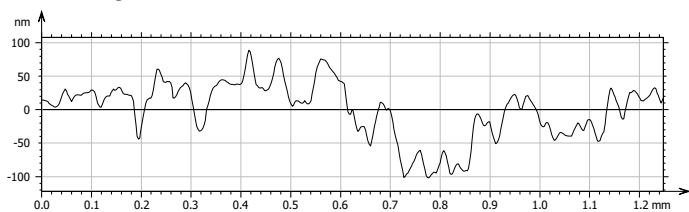
3.2.Tabulā ir atspoguļotas paraugu virsmu raupjuma parametra Sku un profilu raupjuma parametru Rku_{1-vid} un Rku_{2-vid} , vērtības. Analīze rāda, ka virsmas ekstesa vērtības ir ļoti tuvas Rku vērtībām perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām, bet izņēmums arī ir virsmas ar lielu anizotropiju, kurām parametra Rku vērtības Y-ass virzienā atšķiras par Sku vērtībām vairāk par 15%.

3.2.Tabula.

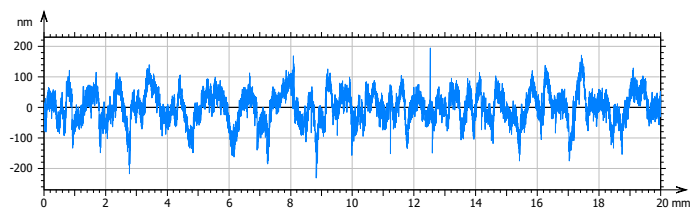
Parametru Sku , Rku_{1-vid} un Rku_{2-vid} salīdzinājums

Apstrādes veids	N.p.k.	Sku	Rku_{1-vid}	$ \Delta Rku_{1-vid} $, %	Rku_{2-vid}	$ \Delta Rku_{2-vid} $, %
Plakanslīpēšana	1	2,776	2,746	1,1	2,446	11,9
	2	2,991	2,959	1,1	2,396	19,9
	3	3,317	3,306	0,3	2,219	33,1
Apaļslīpēšana	4	3,260	2,978	7,8	4,006	22,9
	5	3,420	3,319	2,9	2,630	22,6
	6	2,676	2,630	1,7	2,117	20,9
Elektroerozija	7	2,925	2,861	2,2	2,818	3,7
	8	2,732	2,694	1,4	2,713	0,7
	9	2,900	2,868	1,1	2,859	1,4
Apšaušana ar skrotīm	10	2,984	2,894	3,0	2,910	2,5
	11	2,904	2,855	1,7	2,837	2,3
	12	2,997	2,794	6,8	2,869	4,3
Apstrāde ar smilšstrūklu	13	3,090	3,019	2,3	2,994	3,1
	14	3,162	3,071	2,9	3,093	2,2
	15	3,398	3,305	2,7	3,356	1,2
Pulēšana	16	3,576	3,547	0,8	2,341	34,5
Lepēšana	17	3,460	3,377	2,4	2,680	22,5

Tātad, kā bija secināts iepriekš pie standartizētā trases garuma Y-ass profilu ordinātu sadalījums neatbilst Gausa sadalījuma likumam virsmām ar izteiktu anizotropiju, t.i. slīpētās, pulētās, lepētās virsmas. Bet veicot atsevišķus 2D raupjuma mērījumus pie palielinātā trases garuma var novērot pavisam citu raupjuma ordinātu sadalījumu. Tā 3.4.att. ir redzami plakanslīpētās virsmas profili pie standartizētā trases garuma $L=5l$ (a) un palielinātā trases garuma (b), kurš sastāda 80 bāzes garumus.



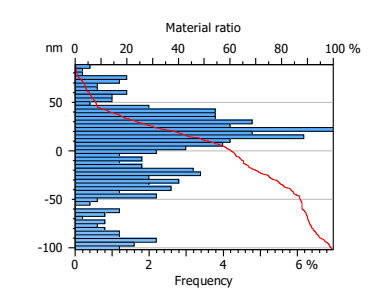
a



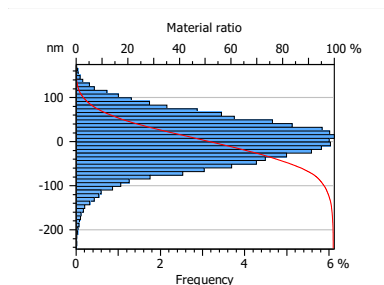
b

3.4.att. Plakanslīpētās virsmas raupjuma profils paralēli apstrādes pēdām
a – $L=5l$, b – $L=80l$

Pirmajā gadījumā ordinātu sadalījums neatbilst Gausa sadalījumam, savukārt, pie palielinātā trases garuma ir skaidri redzama raupjuma ordinātu sadalījuma zvanveida forma (3.5.att.,a,b). Šajā gadījumā $Rsk_2=-0.25$, $Rku_2=3.25$. Tādas atšķirības parametru vērtībās ir izskaidrojamas ar ierobežotu trases garumu Y-ass profiliem.



a



b

3.5.att. Plakanslīpētās virsmas profila punktu sadalījums
a – $L=5l$, b – $L=80l$

3.2. Virsmas vidējais aritmētiskais augstums Sa

Virsmas vidējais aritmētiskais augstums Sa raksturo mikroreljefa augstuma īpašības. Kā bija minēts 1.2.sadaļā ordinātu Normālā sadalījuma likuma gadījumā doto parametru nosaka pēc formulas (1.30). Sakarā ar to, ka praksē virsmām ar neregulāru raksturu raupjuma ordinātas nav ideāli sadalītas pa virsmu 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 būt apskatīts kā normētais gadījuma lauks $z'(x,y)$:

$$z'(x,y) = \frac{z(x,y)}{Sq} \quad (3.1.)$$

Ordinātu sadalījuma blīvums ar $E=0$ un $D=1$ var būt aproksimēts ar Edžvorta rindu [17]:

$$f_2(z') = f(z') - \frac{Ssk}{3!} \Phi^{(4)}(z') + \frac{(Sku - 3)}{4!} \Phi^{(5)}(z') - \dots, \quad (3.2.)$$

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

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

Svarīgi atzīmēt sakarību starp Laplasa funkcijas atvasinājumiem un Hermita polinomiem $H_n(p)$:

$$\Phi^{(n+1)}(p) = (-1)^n \cdot \Phi'(p) \cdot H_n(p) \quad (3.3.)$$

kur n – Hermita polinoma kārtas numurs;

Laplasa funkcijas ceturtajam un piektajam atvasinājumiem ir sekojošais veids:

$$\Phi^{(4)}(p) = -f(p) \cdot (p^3 - 3p) \quad (3.4.)$$

$$\Phi^{(5)}(p) = f(p) \cdot (p^4 - 6p^2 + 3) \quad (3.5.)$$

Parametra Sa vidējo vērtību attiecībā pret blīvumu $f_2(z')$ var izteikt sekojošā veida:

$$E_2\{Sa\} = \frac{1}{A} \iint_0^A E|z(x,y)| dx dy = Sq \int_0^\infty w \cdot f_2(w) dw \quad (3.6.)$$

kur $w=|z'(x,y)|$ – normētais gadījuma lauks pēc moduļa;

Sakarā ar to, ka

$$f_2(w) = f_{2z'}(w) + f_{2z'}(-w) \quad (3.7.)$$

parametra Sa vidējās vērtības izteiksmi var pārrakstīt sekojošā veidā:

$$E_2\{Sa\} = Sq \int_0^\infty w \cdot [f_{2z'}(w) + f_{2z'}(-w)] dw \quad (3.8.)$$

$$E_2\{Sa\} = 2Sq \int_0^{\infty} w \cdot \left[f(w) + \frac{(Sku - 3)}{4!} \Phi^{(5)}(w) + \dots \right] dw \quad (3.9.)$$

kur $f_{2z'}(w)$ – gadījuma lieluma w varbūtību sadalījuma blīvums ar mainīgā aizvietošanu.

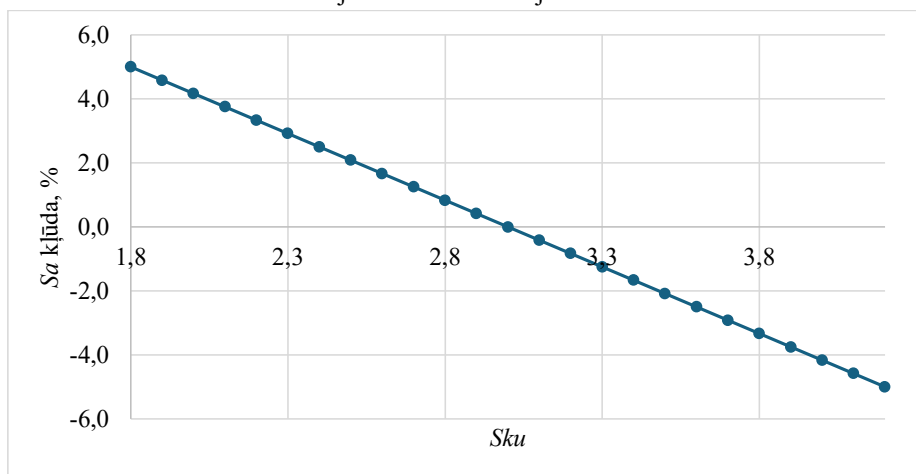
Ievietojot $\Phi^{(5)}(w)$ vērtību no vienādojuma (3.5.) vienādojumā (3.9.), pēc pārveidojumiem, tika iegūta sekojošā vidējā aritmētiskā augstuma aprēķinu formula:

$$E_2\{Sa\} = E\{Sa\} \cdot \left(1 - \frac{(Sku - 3)}{4!} \right) \quad (3.10.)$$

Ja virsmas ordinātu sadalījuma likums ir normāls, tad sakarība (3.10.) pāriet sakarībā (1.30.). Iegūtās sakarības analīze norāda uz to, ka $E_2\{Sa\}$ vērtībā ir atkarīga no ekscesa koeficienta. Asimetrijas Ssk vērtības figurē procesa dispersijā un pie konstantas dispersijas Ssk neietekmē $E_2\{Sa\}$.

$$E_2\{Sa\} = Sq \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left(1 - \frac{(Sku - 3)}{4!} \right) \quad (3.11.)$$

3.6.att. ir 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 norāda uz to, ka Sku vērtības ir robežās no 2.7.....3.4, tāpēc teorētiski bez precizitātes zuduma par pamatu var izmantot Normālā sadalījuma likuma funkciju.



3.6.att. Ordinātu sadalījuma funkcijas ekscesa ietekme uz raupjuma parametra Sa vērtībām

Nākamais etaps - salīdzināt vidējā aritmētiskā augstuma eksperimentāli noteiktas vērtības ar aprēķinātām pēc vienādojumiem (1.30.) un (3.11.).

3.3. Tabula.

Parametra Sa eksperimentālo un analītiski noteikto vērtību salīdzinājums

Apstrādes veids	N.p.k.	Sa_{exp} , μm	Sa_{teor} , μm	Sa_{Rudz} , μm	$ \Delta Sa_{teor} $, %	$ \Delta Sa_{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
Apašlīpēšana	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 3.3.Tabulas datiem var secināt, ka vidējā aritmētiskā augstuma aprēķinātās vērtības pēc vienādojuma (3.11.) precīzi sakrīt ar eksperimentāli noteiktām, novirze no teorētiskām vērtībām ir mazāka par 1%. Rēķinot raupjuma parametru Sa pēc formulas (1.30.) pie $Sku=3$, novirze sasniedz 3%.

Vienādojums (3.11.) 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. Tikai šajā gadījumā noteiktus 2D raupjuma parametrus var uzskatīt par ticamiem. 2.nodaļā bija pamatots, ka starp virsmas vidusplakni un profilu viduslīnijām ir noteiktā nobīde. Lai pārbaudītu, kā šī nobīde ietekmē parametra Ra vērtības, visām paraugu sērijām pēc līmeņošanas line by line + LS polinomial 1 tika noteikts Sa un 2D vidējais aritmētiskais augstums perpendikulāri (Ra_1) un paralēli (Ra_2) apstrādes pēdām, pie tām Ra_1 un Ra_2 lielumi ir visu X-ass profilu un Y-ass profilu vidējās vērtības.

3.4.Tabula.

Parametru $Ra_{1-vid.}$ un Sa vērtību salīdzinājums

Apstrādes veids	N.p.k.	Sa , μm	$Ra_{1-vid.}$, μm	$ \Delta Ra_{1-vid} $, %
Plakanslīpēšana	1	0,0414	0,0414	0,01
	2	1,419	1,418	0,07
	3	3,307	3,316	0,27
Apaļslīpēšana	4	0,049	0,047	4,08
	5	0,111	0,106	4,50
	6	1,202	1,202	0,00
Elektroerozija	7	0,733	0,728	0,79
	8	1,199	1,190	0,75
	9	2,905	2,891	0,48
Apšaušana ar skrotīm	10	0,485	0,483	0,49
	11	1,263	1,253	0,79
	12	3,429	3,384	1,31
Apstrāde ar smilšstrūklu	13	0,501	0,498	0,60
	14	1,067	1,060	0,66
	15	2,417	2,395	0,91
Pulēšana	16	0,205	0,203	0,98
Lepēšana	17	0,021	0,021	0,00

3.4.Tabulas dati norāda uz 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 sakrišanu ar virsmas vidusplaknes līmeni.

3.5.Tabula.

Parametru $Ra_{2-vid.}$ un Sa vērtību salīdzinājums

Apstrādes veids	N.p.k.	Sa , μm	$Ra_{2-vid.}$, μm	$ \Delta Ra_{2-vid} $, %
Plakanslīpēšana	1	0,0414	0,0352	16,66
	2	1,419	1,173	17,34
	3	3,307	2,371	28,30
Apaļslīpēšana	4	0,049	0,037	24,49
	5	0,111	0,097	12,61
	6	1,202	0,934	22,30

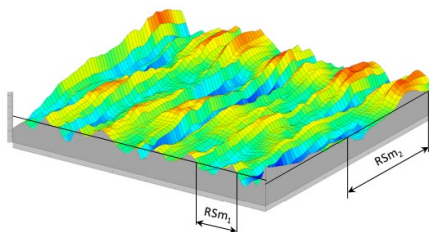
3.5.Tabulas turpinājums

Apstrādes veids	N.p. k.	Sa , μm	$Ra_{2-vid.}$, μm	$ \Delta Ra_{2-vid} $, %
Elektroerozija	7	0,733	0,726	1,02
	8	1,199	1,188	0,92
	9	2,905	2,886	0,65
Apšaušana ar skrotīm	10	0,485	0,478	1,42
	11	1,263	1,250	1,03
	12	3,429	3,358	2,07
Apstrāde ar smilšstrūklu	13	0,501	0,494	1,40
	14	1,067	1,061	0,56
	15	2,417	2,394	0,95
Pulēšana	16	0,205	0,15	26,83
Lepēšana	17	0,021	0,014	33,33

3.5.Tabulā ir ļoti labi redzams, ka 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

Kā bija minēts iepriekšējās sadaļās virsmas raupjums ir anizotrops, kad atšķirīgos virsmas virzienos profili ir dažādi, savukārt izotropas virsmas raupjumam visos virzienos profili ir vienādi. Īpašu interesi izraisa virsmas ar izteiktu anizotropiju savstarpēji perpendikulāros virzienos. Šajā gadījuma “raupjuma soļi” ir: RSm_1 – šķērsām apstrādes (berzes) pēdām un RSm_2 – pa apstrādes (berzes) pēdām (3.7.att.).



3.7.att. 3D virsma ar anizotropu raupjumu

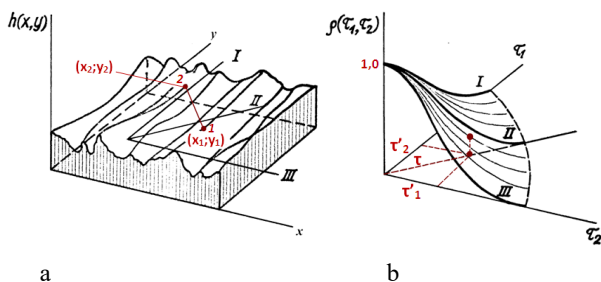
Soļa parametrs RSm ir definēts standartā LVS EN ISO 21920-2, savukārt soļa parametru RSm_1 un RSm_2 attiecība, kas raksturo virsmas raupjuma anizotropiju, standartos nav noteikta. Taču tieši šī attiecība ir svarīgs lielums, kas nepieciešams virsmas anizotropijas aprakstam un kuru izmanto virsmu pētnieki.

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

$$Str = \frac{R_{min}}{R_{max}} \quad (3.12.)$$

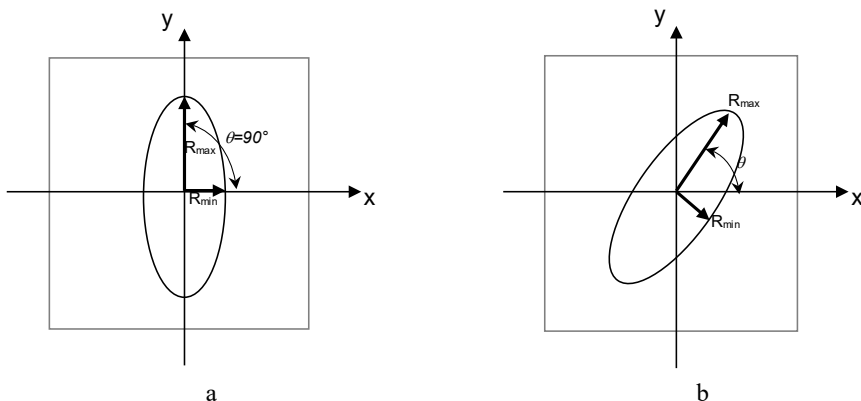
kur R_{min} , R_{max} - korelācijas funkcijas centrālā izciļņa šķēluma galvenie rādiusi.

Korelācijas funkcijas starp diviem punktiem ar koordinātēm $(x_1; y_1)$ un $(x_2; y_2)$ matemātisko vienādojumu var izteikt ar $\rho(\tau_1; \tau_2)$, kur $\tau_1 = x_2 - x_1$ – attālums starp punktiem pa X asi un $\tau_2 = y_2 - y_1$ – attālums starp punktiem pa Y asi. Pieaugot attālumam starp punktiem (pieaugot τ_1 un τ_2 vērtībām), samazinās $\rho(\tau_1; \tau_2)$ vērtības (3.8.att.).



3.8.att. Shematisks virsmas raupjuma attēls (a) un atbilstošā normētā korelācijas funkcija (b)

Virsmas korelācijas funkcija vispārīgā anizotropa virsmas raupjuma gadījumā var būt dažādi orientēta pret koordinātu asīm X , Y (3.9.att.).



3.9.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 vienādojumu (3.14.):

$$Str = \frac{\tau_{kx}}{\tau_{ky}} \quad (3.13.)$$

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, formulu (3.15.) var izmantot parametra Str raksturošanai pie jebkuras s vērtības. Tad izmantojot neregulāras raupjas virsmas profila korelācijas funkciju pētījumus [43-44], monotoni dilstošai korelācijas funkcijai:

$$\tau_k = \frac{\tau_{kn}}{E\{n(0)\}} \quad (3.14.)$$

kur τ_{kn} – korelācijas intervāla normētā vērtība. Tā ir konstanta konkrētai korelācijas funkcijai [43]
 $E\{n(0)\}$ – krustojumu skaita ar profila viduslīniju matemātiskā sagaidāmā vērtība.

Saskaņā ar formulu (3.15.) konkrētai korelācijas funkcijai:

$$Str = \frac{E\{n_2(0)\}}{E\{n_1(0)\}} \quad (3.15.)$$

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

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

$$E\{n(0)\} = \frac{2}{RSm} \quad (3.16.)$$

Attiecīgi vienādojumu (3.17.) var pārrakstīt sekojošajā veidā:

$$Str = \frac{RSm_1}{RSm_2} \quad (3.17.)$$

Salīdzinot iegūto vienādojumu ar (3.12.), iegūstam teorētisko pamatojumu virsmas tekstūras indeksa pielietošanai virsmas anizotropijas novērtēšanā:

$$Str = C \quad (3.18.)$$

Sakarā ar to, ka vienādojums (3.20.) der gadījumiem, kad virsmas vidusplakne sakrīt ar profilu viduslīnijām, ir svarīgi precīzi noteikt RSm_2 vērtību virsmām ar neregulāru rakturu, jo veicot līmeņošanas procedūru profilu viduslīnijām virzienā paralēli apstrādes pēdām būs novirzes no vidusplaknes.

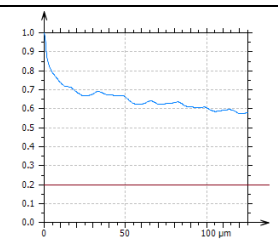
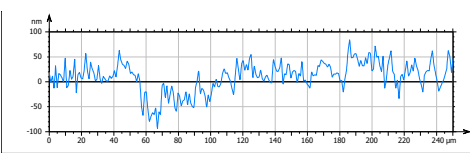
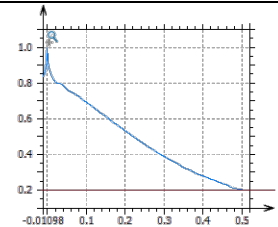
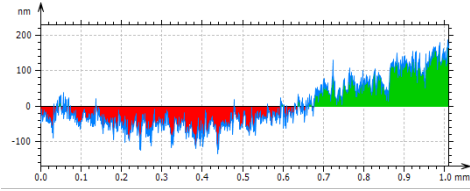
3.4. Profila elementu vidējais platums Rsm

Standartā ISO 21920-2 ir definēts, ka profila elementu vidējais platums Rsm ir jānosaka novērtēšanas garumā, kas parasti atbilst 5 bāzes garumiem. Savukārt standartizētais novērtēšanas garums ne visos gadījumos var nodrošināt parametra Rsm precīzu noteikšanu garenvirzienā. Virsmām ar izteikto anizotropiju virzienā paralēli apstrādes pēdām profila elementu vidējais platums ir vairākās reizēs lielāks nekā X-ass virzienā sakarā ar apstrādes veida īpatnībām, tāpēc Y-ass profils var šķērsot viduslīniju tikai dažās vietās un nav garantijas, ka 5 bāžu garumā būs iespēja dabūt pat vienu profila elementu (raupjuma soli) X_s . Pati datu datorapstrādes programma brīdina, ka parametru Rsm vērtības var būt noteiktas nekorekti virsmām ar neregulāru raksturu [78]. Tāpēc ir svarīgi izstrādāt pieeju dotā parametra precīzai noteikšanai.

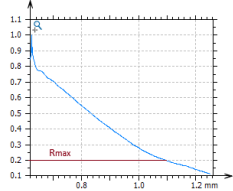
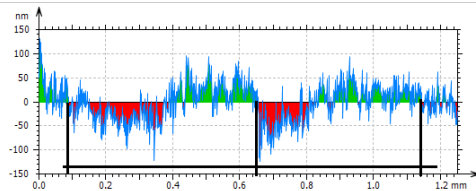
Novērtēšanas garuma L ietekme uz raupjuma soļa Rsm vērtību virzienā paralēli apstrādes pēdām ir redzama 3.6.Tabulā. Tajā ir atspoguļots slīpētās virsmas korelācijas funkcijas šķērsgriezums garenvirzienā un šim virzienam atbilstošais raupjuma profils. Pēc 3.6.Tabulas datiem var secināt, ka pie novērtēšanas garuma $L=1l$ (1 bāzes garums) slīpētās virsmas profils šķērso viduslīniju daudzos punktos, bet nelīdzenumu amplitūda ir tik maza, ka redzamo mikroizcilņu kopu nevar uzskatīt par profila elementiem, tie varētu būt kāda lielāka nelīdzenuma nanoizcilņi. Attiecīgi datorprogramma nespēj uzģenerēt adekvātu korelācijas funkciju, kurai pie līmeņa 0.2 ir jāsasniedz konkrēta vērtība.

3.6.Tabula

Novērtēšanas garuma L ietekme uz raupjuma soli Rsm_2

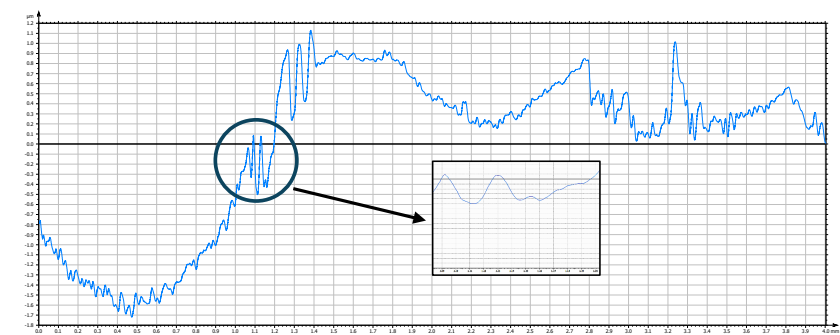
Parauga izmērs	ACF šķērsgriezums pa Y-asi	Y-ass raupjuma profils	X_s skaits
$L=1l$			0
$L=4l$			0

3.6.Tabulas turpinājums

Parauga izmērs	ACF šķērs griezumums pa Y-asi	Y-ass raupjuma profils	X_s skaits
$L=5l$			2

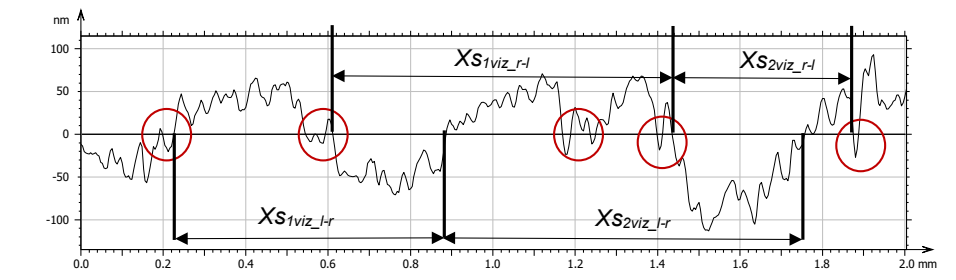
Pie novērtēšanas garuma $L=4l$ (4 bāzes garumi) korelācijas funkcija vēl nešķērso līmeni $s=0.2$, bet tuvojas tam. Pēc Y-ass profilogrammas var redzēt, ka profils šķērso viduslīniju tikai divos punktos, tas nozīmē, ka arī šajā gadījumā nav pamanāms neviens profila elements. Savukārt, pie novērtēšanas garuma $L=5l$ (5 bāzes garumi) ir redzams izteikts profils virzienā paralēli apstrādes pēdām un šim virzienam atbilstošā korelācijas funkcija un tās korelācijas garums.

Standartā ISO 21920-2 bija 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. 3.10.att. ir redzama plakanslīpētās virsmas profilogramma garenvirzienā. Lai noteiktu RSm vērtību ir jānosaka sliekšnis - 10% no Rp un Rv . Dotajā gadījumā programma nedod ticamas vidējo pīķu augstuma un vidējo ieplaku dziļuma vērtības, jo $Rp=0.017\mu m$ un $Rv=0.1\mu m$ neatbilst profilogrammas datiem; Programma rēķina šos parametrus pa vietējām ieplakām un virsotnēm. Tas ir izskaidrojams ar Rp un Rv jutību pret anormāliem punktiem, jo pēc profilogrammas analīzes ir redzams, ka profils krusto viduslīniju tikai dažos punktos. Pie tam datorprogramma nevar aprēķināt parametru RSm , jo neidentificē nevienu izcilni un ieplaku dotajam profilam (No motifs were found). Izmantojot standarta ISO 21920-2 formulu arī nav iespējams noteikt profila elementu vidējo platumu, jo krustojumu skaits ar viduslīniju (5 punkti) ir tā saucamie “nulles punkti”. Attiecīgi šāds profils nav derīgs, un lai dabūtu adekvātas RSm_2 vērtības, ir jāizvēlas citi profili vai arī jāpalielina novērtēšanas garums Y-ass virzienā.



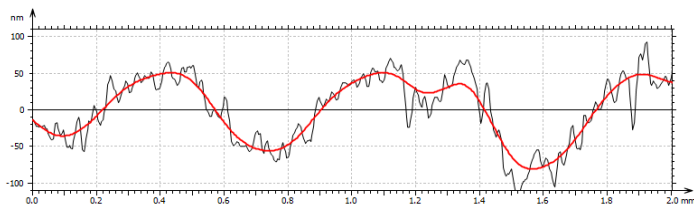
3.10.att. Plakanslīpētās virsmas profils Nr.1 garenvirzienā

3.11.att. ir redzams cits plakanslīpētās virsmas profils Y-ass virzienā. Tam vizuāli var izdalīt divus raupjuma soļus Xs_{1viz} un Xs_{2viz} abos profilogrammas virzienos (from left to right – $l-r$ and vice versa – $r-l$); pie tām šo raupjuma soļu vietējie nelīdzenumi krusto viduslīniju vairākās vietās, kas stipri ietekmē parametra RSm_2 vērtības. Pēc datorprogrammas aprēķiniem pie standartizētā sliekšņa – 10% no Rp un Rv , RSm_2 vērtība sastāda tikai 0,29 mm, kas neatbilst reālai profila ģeometrijai. Šādu RSm_2 vērtību nav korekti izmantot nodiluma aprēķinos, jo tā ir stipri samazināta lokālo mikroizciļņu dēļ. Palielinot sliekšni līdz 30%, RSm_2 vērtība sastāda jau 0,73 mm, kas atbilst reālai ainai. RSm_2 vērtības relatīvā kļūda pie sliekšņa $H=10\%$ sastāda 151%. Tātad dotajam profilam ir jāizvēlas $H=30\%$, lai iegūtu ticamu RSm_2 vērtību. Taču katram profilam būs atšķirīgs sliekšņa lielums. Rodas jautājums, kā var noteikt vidējo RSm_2 vērtību starp visiem Y-ass profiliem pie vienotā sliekšņa H .



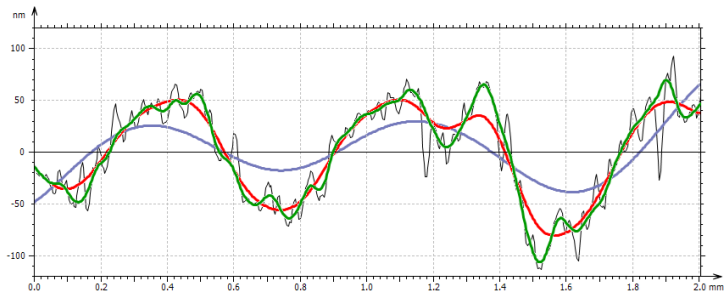
3.11.att. Plakanslīpētās virsmas profils Nr.2 garenvirzienā

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, kā dotajā gadījumā viļņainības profils atspoguļo nevis formas novirzi, kura 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, kuru neietekmē lokālie virsmas defekti, mērījumu trokšnis, ekstrēmas iepakas un pīķi [79-80]. Rezultātā tiek iegūts viļņainības profils, kurš precīzi apraksta raupjuma profila pamatģeometriju (bez subraupjuma) (piemērs 1.Pielikuma 9.att.). Viļņainības elementu vidējo vērtību WSm_2 nosaka pie standartizētā sliekšņa 10% pie konkrētās cut-off vērtības atkarībā no parametra Sa . 3.12.att. ir parādīta iepriekš aplūkotā profila viļņainība; šeit ir skaidri redzami viļņainības profila 5 krustojumi ar viduslīniju, WSm_2 pie sliekšņa 10% sastāda 0.74 mm, kas precīzi sakrīt ar RSm_2 vērtību pie $H=30\%$, atšķirība rezultātos sastāda 1%.



3.12.att. Plakanslīpētās virsmas viļņainība profila solis

Lai pārbaudītu parametra WSm_2 vērtības atbilstību raupjuma solim RSm_2 tika izvēlēti 100 profili, kuriem bija noteiktas RSm_2 vērtības pie sliekšņiem $H=30-80\%$ un WSm_2 vērtības pie $H=10\%$, izmantojot datorprogrammas aprēķinus. Izpētes rezultāti rāda, ka parametra WSm_2 vērtības pilnīgi sakrīt ar RSm_2 pie $H=30-40\%$. Savukārt rodas jautājums, kāda cut-off vērtība ir jāizvēlas, lai viļņainības profils nepazaudētu svarīgus elementus un otrādi – neatkārtotu subraupjumu. 3.13.att. ir redzami viļņainības profili ar atšķirīgiem cut-off. Jo lielākā būs L-filtra vērtība, jo platāks būs viļņainības solis.



3.13.att. cut-off lieluma ietekme uz viļņainības soli

$\lambda_c = 0.08$ mm (zaļā krāsā), $\lambda_c = 0.25$ mm (sarkanā krāsā), $\lambda_c = 0.8$ mm (zilā krāsā)

3.7.Tabulā ir redzams parametru RSm_2 un WSm_2 vērtību salīdzinājums pie dažādiem cut-off. Pēc tabulas datiem var secināt, ka L-filtra vērtība ir atkarīga no vidējā aritmētiskā augstuma Sa . Tā, piemēram, virsmas N6 profiliem vispiemērotākais cut-off ir 0.25, jo starpība starp RSm_2 un WSm_2 vērtībām sastāda tikai 4%. Savukārt, var pamanīt, kā dažiem profiliem viļņainības solis sakrīt ar raupjuma soli pie atšķirīgiem cut-off, kas ir izskaidrojams ar gadījumiem, kad raupjuma profila elementiem nav izteiktā subraupjuma. Pēc analīzes var secināt, ka profiliem ir jāizvēlas cut-off, kurš ir mazāks par standartizēto par vienu vienību.

3.7.Tabula.

Raupjuma un viļņainības soļu RSm_2 un WSm_2 vērtību salīdzinājums pie dažādiem cut-off.

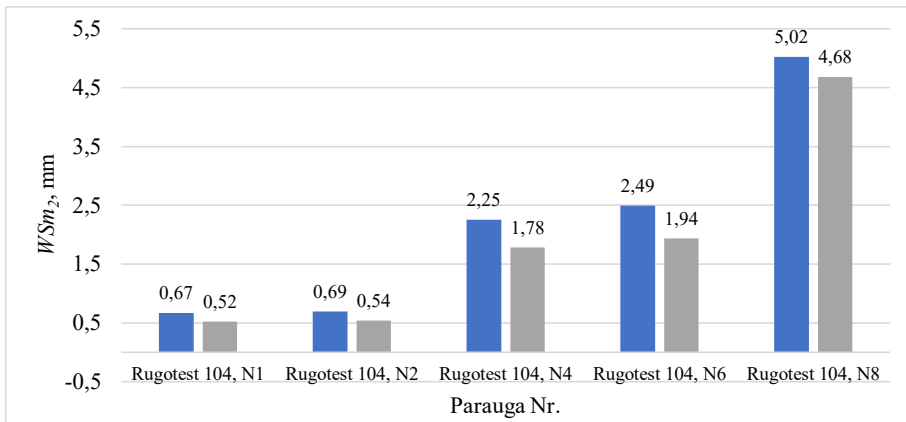
Virsmas Nr., λ_c pēc standarta	RSm_2 , mm	WSm_2 , mm	Δ , %	WSm_2 , mm	Δ , %	WSm_2 , mm	Δ , %	WSm_2 , mm	Δ , %
		$\lambda_c = 0.08$ mm		$\lambda_c = 0.25$ mm		$\lambda_c = 0.8$ mm		$\lambda_c = 2.5$ mm	
	$H = 30$ %	$H = 10\%$		$H = 10\%$		$H = 10\%$		$H = 10\%$	
N2, $\lambda_c = 0.25$ mm	0.83	0.84	1	0.891	7	0.928	12	-	-
	0.363	0.407	12	0.38	5	0.924	155	-	-
	0.405	0.393	-3	0.426	5	0.964	138		
	0.5102	0.4958	-3	0.645	26	0.836	64	-	-

3.7.Tabulas turpinājums

Raupjuma un viļņainības soļu RSm_2 un WSm_2 vērtību salīdzinājums pie dažādiem cut-off.

Virsmas Nr., λc pēc standarta	RSm_2 , mm	WSm_2 , mm	Δ , %	WSm_2 , mm	Δ , %	WSm_2 , mm	Δ , %	WSm_2 , mm	Δ , %
		$\lambda c=0.08$ mm		$\lambda c=0.25$ mm		$\lambda c=0.8$ mm		$\lambda c=2.5$ mm	
	$H=30$ %	$H=10\%$		$H=10\%$		$H=10\%$		$H=10\%$	
N6, $\lambda c=0.8$ mm	1.289	0.992	-23	1.294	0	1.322	3	-	-
	1.747	1.746	0	1.745	0	1.793	3	-	-
	1.588	1.305	-18	1.655	4	1.705	7	-	-
	2.001	1.839	-8	1.985	-1	2.217	11	-	-
N8, $\lambda c=2.5$ mm	6.51	-	-	6.555	1	6.554	1	6.587	1
	4.998	-	-	3.009	-40	5.007	0	5.071	1
	4.693	-	-	4.219	-10	4.629	-1	4.969	6
	4.557	-	-	4.137	-9	4.528	-1	5.431	19

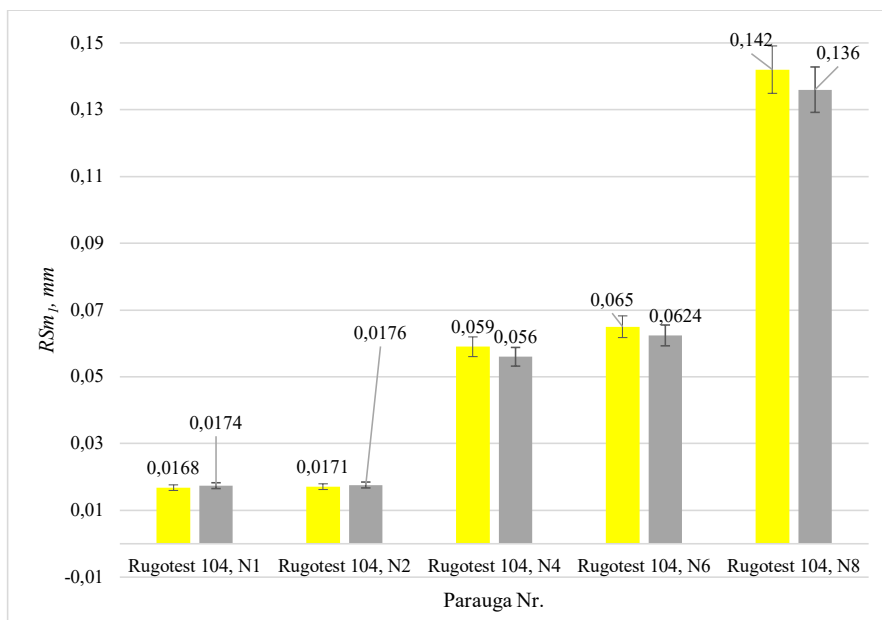
Nākamais punkts bija WSm_2 vērtību salīdzinājums profiliem pēc 2D un 3D mērījumiem. 3.14.att. ir atspoguļotas viļņainības soļa $WSm_{2,p}$ vērtības atsevišķi uzņemtiem profiliem pie palielināta trases garuma un $WSm_{2,y}$ vidējās vērtības no nofiltrētās virsmas izvilktiem profiliem. 2D mērījumiem tika izvēlēts maksimālais trases garums $L=20$ mm, kurš ir ierobežots ar parauga izmēriem. Parauga Rugotest 104 virsmām N1 un N2 trases garums L sastāda 80l, virsmām N4 un N6 $L=25l$, virsmai N8 $L=8l$. Vēlreiz ir jāatzīmē, ka 3D mērījumu gadījumā trases garums sastādīja 5l.



3.14.att. Profila raupjuma parametra WSm_2 vērtības
zilā krāsā – pēc 2D mērījumiem, pelēkā krāsā – pēc 3D mērījumiem

Pēc grafika datiem var secināt, ka profiliem palielinātā trases garumā parametra WSm_2 vērtības ir lielākas nekā 3D mērījumu rezultātā, starpība sastāda 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) lomu. 3.3.Sadaļā tika noteikta sakarība starp virsmas raupjuma soļiem un parametru Str . Iepriekšējā apakšsadaļā teorētiski tika pierādīts, ka tekstūras indekss izsaka soļu RSm_1 un RSm_2 attiecību. Tāpēc ir lietderīgi salīdzināt nofiltrētās virsmas visu izvilktu X un Y-ass profilu attiecību Str_v ar virsmas tekstūras indeksu Str , un atsevišķi uzņemto profilu soļu RSm_{1_p} un WSm_{2_p} attiecību Str_p ar to pašu parametru Str . Šim nolūkam papildus tika veikti X-ass profilu raupjuma mērīšanas eksperimenti palielinātajā trases garumā. Parametra RSm_{1_p} vērtību salīdzinājums atsevišķi uzņemtiem profiliem un izvilktiem no nofiltrētās virsmas RSm_{1_v} ir redzams 3.15.att.

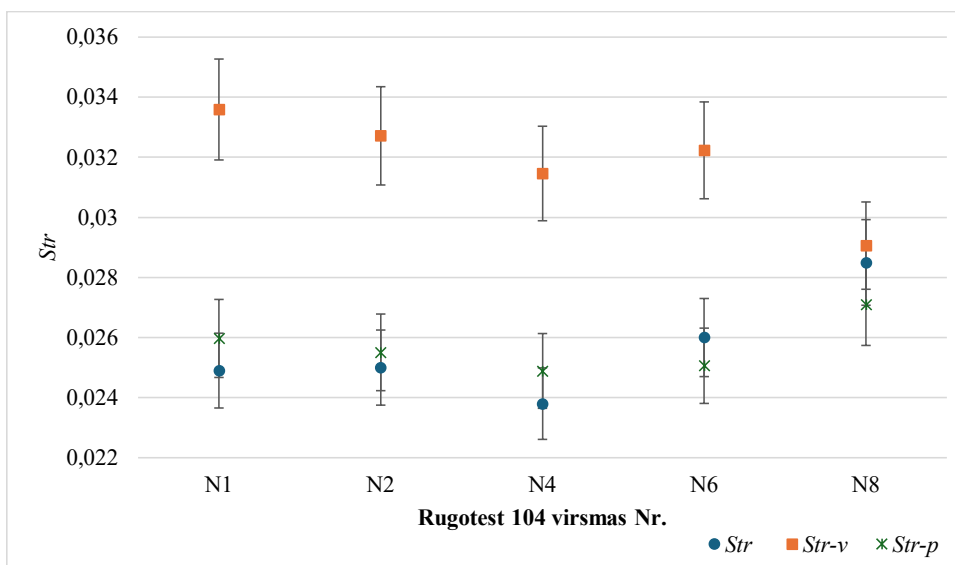


3.15.att. Profila raupjuma parametra RSm_1 vērtības

Dzeltenā krāsā – pēc 2D mērījumiem, pelēkā krāsā – pēc 3D mērījumiem

Raupjuma soļu vērtību salīdzinājums perpendikulāri apstrādes pēdām liecina par to, ka RSm_1 vērtības pēc 3D un 2D mērījumiem ļoti precīzi sakrīt, atšķirība vērtībās sastāda maksimāli 5%. Attiecīgi var secināt, ka no virsmas izvilktu profilu RSm_{1_v} vērtības var izmantot virsmas anizotropijas novērtēšanā ($RSm_{1_v} \approx RSm_{1_p}$).

3.16.att. figurē 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 .



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

Balstoties uz pētījuma ietvaros iegūtiem rezultātiem, tika piedāvāts virsmas raupjuma soļa noteikšanai paralēli apstrādes pēdām pie trases garuma $L=5l$ izmantot korekcijas koeficientu k_{pr} , kas ņem vērā profilu viduslīniju novirzes no vidusplaknes. Attiecīgi raupjuma soli RSm'_2 var noteikt pēc sekojošās sakarības:

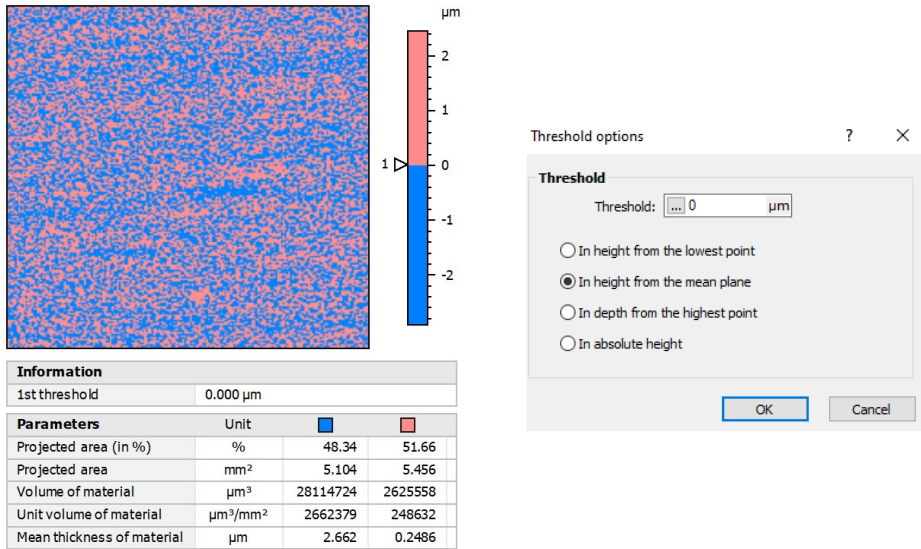
$$RSm'_2 = k_{pr} \cdot WSm_2 \quad (3.19.)$$

kur k_{pr} – raupjuma soļa korekcijas koeficients. $k_{pr}=1.16$ (pēc 3.14.att. datiem).

3.5. Materiāla tilpums V_m

Raupjas virsmas izciļņu 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 V_m ir izteikts mm^3 uz laukuma vienību mm^2 , savukārt dilšanas intensitātes aprēķinos ir svarīgi zināt deformētā materiāla absolūto apjomu pie noteiktā līmeņa c , izteikto mm^3 . Šim nolūkam ir lietderīgi izmantot programmatūras MCubeMap Ultimate 10 funkciju “Slices”, ar kuras palīdzību tiek ģenerēta virsma, sadalītā divās daļās – materiāls un tukšumi. 3.17.att. ir redzams raupjas virsmas šķēlums pie līmeņa $c=0$ (līmenis c ir atskaitīts no vidusplaknes); Ar sarkano krāsu ir atzīmēts materiāla tilpums un ar zilo - tukšumu tilpums. Izvēloties nepieciešamo līmeni c (programmā apzīmēts ar “threshold”), pastāv iespēja iegūt vajadzīgas V_m vērtības un attiecīgo Materiāla absolūto tilpumu V'_m (Volume of material, 3.17.att.), izteikto μm^3 .



3.17.att. Virsmas materiāla (rozā krāsā) un tukšumu (zilā krāsā) tilpuma attēlojums pie konkrētā līmeņa c

Datorprogramma parametru V'_m rēķina pēc sekojošās formulas:

$$V'_m = Vm \cdot Aa \quad (3.20.)$$

kur Aa – nominālais laukums, mm^2

Papildus tām funkcija “Slices” atspoguļo materiāla laukumu % un mm^2 pie konkrētā līmeņa c , kas atbilst parametra $Smr(c)$ vērtībām (projected area), kā arī materiāla vidējo biezumu.

Balstoties uz J.Rudzīša pētījumiem vidējo materiāla tilpumu var iegūt analītiski, integrējot virsmas šķērsriezuma laukumu $A(c)$ pa līmeņiem, atskaitot no vidusplaknes [44]:

$$Vm = \int_c^\infty A(c)dc \quad (3.21.)$$

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

Tātad šķērsriezuma laukumu nosaka pēc formulas:

$$A(c) = Smr(c) \cdot Aa \quad (3.22.)$$

un, ņemot vērā to, ka:

$$E\{Vm\} = Aa \int_c^\infty E\{Smr(c)\}dc \quad (3.23.)$$

$$E\{Vm\} = Aa \int_c^\infty \left[1 - \Phi\left(\frac{c}{Sq}\right) \right] dc \quad (3.24.)$$

Nelīdzenumu tilpuma matemātiski sagaidāmā vērtība būs vienāda ar:

$$E\{Vm\} = Sq \cdot Aa \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0,5\gamma^2) - \gamma[1 - \Phi(\gamma)] \right\} \quad (3.25.)$$

Izteiksme (3.28.) norāda uz to, ka materiāla tilpums Vm mainās atkarībā no relatīvā deformācijas līmeņa γ . Mainoties γ no $-\infty$ līdz $+\infty$ materiāla apjoms samazinās. Pie γ vērtībām $1 < \gamma < 3$ var uzskatīt, ka deformēta materiāla tilpums nemainās pēc lineāra likuma.

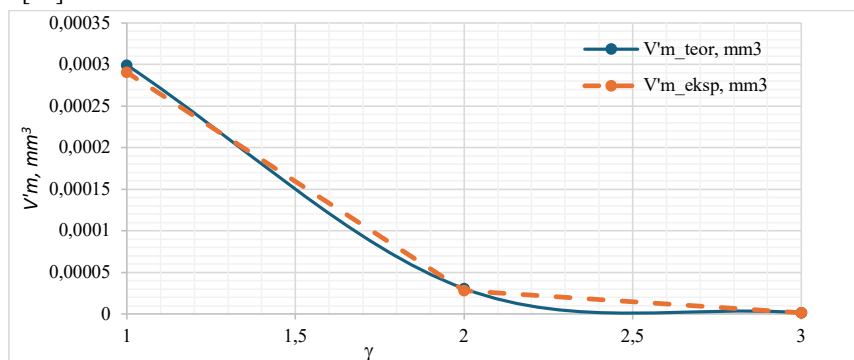
3.8.Tabulā ir redzamas virsmas pēc apšaudes ar skrotīm parametra Vm aprēķinātas un eksperimentālas vērtības un to salīdzinājums relatīvās novirzes veidā. Pie visiem līmeņiem γ aprēķinātas vērtības ļoti precīzi sakrīt ar eksperimentāliem datiem un relatīvā novirze ir $< 10\%$.

3.8.Tabula

Virsmas, apšaudītās ar skrotīm, raupjuma parametra Vm teorētisko un eksperimentālo vērtību salīdzinājums

γ	Sq , mm	c	Aa , mm ²	$V_{m_{teor}}$ mm ³	V'_m , mm ³	$ \Delta V'_m $, %
3	0,6077	1,82	5,909	1,3763E-06	1,37E-06	0,46
2		1,21		3,05382E-05	2,799E-05	8,35
1		0,60		0,000299397	0,0002906	2,94
0		0		0,001432923	0,001434	0,07
-1		-0,60		0,003890296	0,0038972	0,18
-2		-1,21		0,007212337	0,0072116	0,01
-3		-1,82		0,010774074	0,0107733	0,01

Grafiski parametra Vm eksperimentālās un teorētiskās vērtības ir atspoguļotas 3.18.att. Grafikā ir redzami tikai tie līmeņi, pie kuriem notiek deformācija berzes laikā atkarībā no pieliktās slodzes [23].



3.18.att. Parametra Vm aprēķināto un eksperimentālo vērtību grafiskais attēlojums

Materiāla tilpuma aprēķini un salīdzinājums ar eksperimentāliem datiem bija veikts visiem pētāmiem paraugiem (skat. 3.9.Tabulu). Rezultāti rāda, ka pie deformācijas līmeņiem $\gamma=-3\dots0$ materiāla tilpuma eksperimentālās un teorētiskās vērtības ļoti precīzi sakrīt, relatīvā novirze $|\Delta V'_m| < 4\%$. Pie $\gamma=1$ vairākiem paraugiem atšķirība ir mazāka par $<10\%$, savukārt pie deformācijas līmeņa $\gamma>1$ starpība starp aprēķināto un eksperimentāli noteikto dažos gadījumos sasniedz 100% . Tas varētu būt izskaidrojams ar parauga virsmas nepietiekamo mērīšanas laukumu; eksperimentāli noteiktais materiāla tilpums V'_m pie $\gamma>1$ ir mazāks par teorētisko.

3.9.Tabula

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

Paraugs	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
Apaļslīpēšana	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 izmantot izteiksmi (3.11.), kurā tiek iekļauta ordinātu sadalījuma funkcijas ekscesa vērtība. Atšķirība starp aprēķinātām un eksperimentāli noteiktām vērtībām sastāda 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-polinomial-1
- 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 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 cut-off, kurš ir mazāks par standartizēto par vienu vienību (atkarībā no parametra Sa vērtības).
- Nosakot vidējā raupjuma soļa RSm_2' vērtību profiliem, uzņemtiem pie $L=5l$, jāizmanto korekcijas koeficients $k_{pr}=1,16$.

Rezultāti attiecībā uz materiāla tilpumu Vm

- Materiāla tilpuma Vm matemātiskai noteikšanai un prognozēšanai izmantot izteiksmi (3.25.).
- Eksperimentāli noteiktās materiāla tilpuma Vm vērtības pie $\gamma > 1$ ir mazāks par teorētiskām, kas varētu būt izskaidrojams ar parauga virsmas nepietiekamo mērīšanas laukumu, kas būs pārbaudīts 5.Nodaļā.

4. RAUPJUMA PARAMETRU NOTEIKŠANAS PRECIZITĀTE

Raupjuma parametru praktiskais pielietojums 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, kurš nodrošinātu pietiekamu precizitāti inženieraprēķinu veikšanai.

Mērījumu skaitu pie uzdotās precizitātes un ticamības nosaka pēc sekojošās formulas [43]:

$$n = \frac{t_{\beta}^2 D\{z\}}{\varepsilon^2 E^2\{z\}} \quad (4.1.)$$

kur t_{β} - tabulēta vērtība, atkarīgā no ticamības varbūtības β ;
 $D\{z\}$ – parametra dispersija;
 $E\{Vm\}$ – parametra matemātiski sagaidāmā vērtība;
 ε - parametra relatīvā kļūda.

Inženieraprēķinos pieļaujamai relatīvai kļūdai ε nedrīkst būt lielākai par 0.1, un ticamības varbūtība parasti ir robežās 0.8-0.95. Ticamības intervāls un tam attiecīgais koeficients t_{β} īpaši neietekmē mērījumu skaitu n [17], savukārt relatīvās kļūdas ε mazas vērtības palielina eksperimentu apjomu. Dotajā darbā 3D raupjuma parametru Sa un Vm un 2D raupjuma parametra RSm mērīšanas precizitāte bija noteikta pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ (attiecīgi $t_{\beta}=1.643$). Papildus tika aprēķināts vienam mērījumam vajadzīgais novērtēšanas garums L .

4.1. Vidējais aritmētiskais augstums Sa

Pamatojoties uz vidēja aritmētiskā augstuma matemātiski sagaidāmās vērtībās $E\{Sa\}$ un dispersijas $D\{Sa\}$ noteikšanas formulām, nepieciešamais mērījumu skaits parametra Sa precīzai noteikšanai tiek rēķināts sekojošajā veidā:

$$n_{Sa} = \frac{t_{\beta}^2 \cdot \pi}{4 \cdot \varepsilon^2 \cdot Str \cdot \alpha_1 \cdot Aa} \quad (4.2.)$$

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

Korelācijas funkcijas aproksimācijas parametra α_1 noteikšanai tika izmantotas atsevišķi uzņemtās profilogrammas, pēc kurām bija noteikts profila krustojumu skaitu ar viduslīniju trases garumā.

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 \{N_1(0)\}^2}{2L} \quad (4.3.)$$

kur $N(0)$ – profila krustojumu skaits ar viduslīniju.

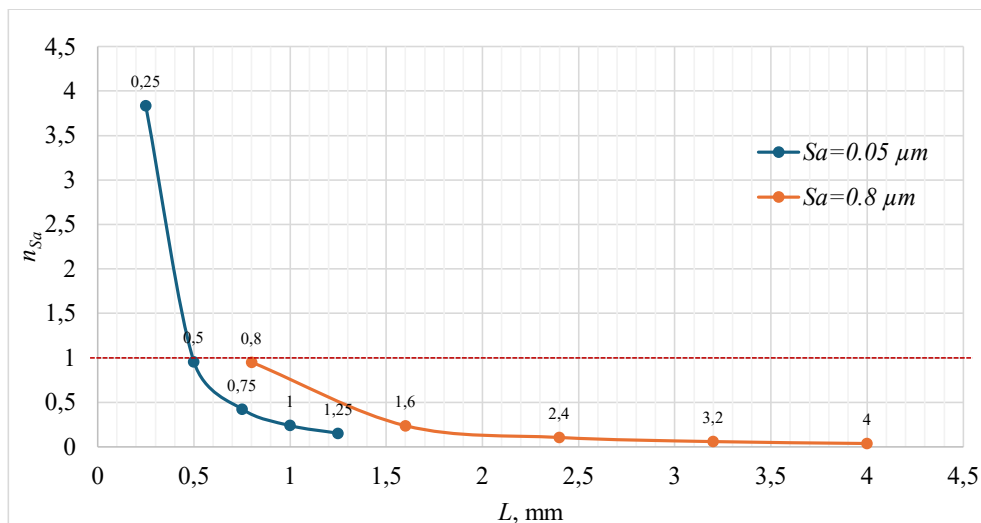
4.1. Tabulā ir atspoguļoti nepieciešamie dati plakanslīpētās virsmas n_{Sa} noteikšanai pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ atkarībā no trases garuma. Pēc aprēķina rezultātiem var secināt, ka parametra Sa precīzai noteikšanai nav jāizvēlas mērīšanas laukums ar standartizētā trases garuma izmēriem.

4.1. Tabula

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra Sa noteikšanai pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ atkarībā no trases garuma

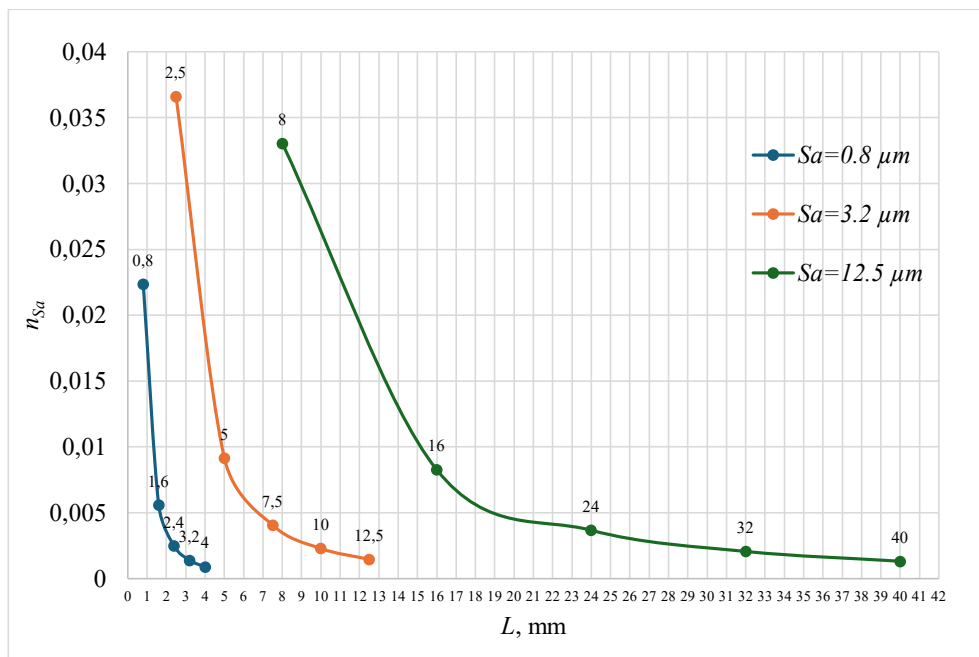
Paraugs	$Sa, \mu m$	l, mm	L, mm	Str	$N_I(0)$	$\alpha_{I, mm^{-2}}$	n_{Sa}	L mērījumam, mm
Rugotest 104, N2	0,05	0,25	0,25	0,025	34	91181	4	0,49
			0,5		68		1	
			0,75		102		1	
			1		136		1	
			1,25		170		1	

4.1.att. ir redzami grafiki, kuros ir atspoguļotas parametra Sa mērījumu skaita vērtības atkarībā no trases garuma L anizotropām virsmām. Katram grafikam ir izdalīti 5 posmi, kuri atbilst trases garuma izmēram L (jeb mērīšanas laukuma malas garuma), kurš ietver sevī 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 datiem var secināt, ka ļoti glūdām virsmām, ar $Sa < 0,05 \mu m$, minimālam trases garumam L jābūt vienādam 2 bāzes garumiem, lai sasniegtu nepieciešamo parametra Sa precizitāti viena mērījuma ietvaros. Savukārt virsmām ar $Sa > 0,05 \mu m$ precīzi mērījumi pie $n_{Sa}=1$ tiks sasniegti, izvēloties mērīšanas laukumu ar malu, vienādu 1 bāzes garumam.



4.1.att. Parametra Sa mērījumu skaits atkarībā no trases garuma anizotropām virsmām;
 $\varepsilon=0.1$; $\beta=0.9$

Situācija ar izotropām virsmām ir mazliet citādāka. Dotajā gadījumā raupjuma parametra Sa precizitāte viena mērījuma ietvaros būs nodrošināta jau pie $L=1l$ neatkarīgi no Sa vērtības. 4.2.att. ir redzams, ka virsmām ar atšķirīgām Sa vērtībām mērīšanas laukuma izmēriem jābūt minimāliem – $1l \times 1l$, lai nodrošinātu uzdoto mērīšanas precizitāti.



4.2.att. Parametra Sa mērījumu skaits atkarībā no trases garuma izotropām virsmām;
 $\varepsilon=0.1$; $\beta=0.9$

4.2. Profila elementu vidējais platums RS_m

Dotā raupjuma parametra matemātiski sagaidāmā vērtība $E\{RS_m\}$ un dispersija $D\{RS_m\}$ jebkurā izvēlētajā virzienā ir nosākamās pēc formulām [43]:

$$E\{RS_m\} = \frac{2\pi}{\sqrt{2\alpha}}, \quad (4.4.)$$

$$D\{RS_m\} = \frac{\pi^3}{2\alpha L} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad (4.5.)$$

Attiecīgi nepieciešamais mērījumu skaits parametra RS_m noteikšanai tiek rēķināts pēc formulas:

$$n_{RS_m} = \frac{t_{\beta^2\pi\sqrt{\pi}}}{4 \cdot \varepsilon^2 \cdot L\sqrt{\alpha}} \quad (4.6.)$$

4.2.Tabulā ir atspoguļots raupjuma parametra RSm nepieciešamais mērījumu skaits plakanslīpētai virsmai virzienā paralēli apstrādes pēdām. Aprēķina rezultāti norāda uz to, ka dotai virsmai jāveic vairāk par 40 2D profila raupjuma mērīšanas eksperimentiem pie standartizētā trases garuma – $L=5l$.

4.2.Tabula

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra RSm noteikšanai pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ atkarībā no trases garuma

Paraugs	Sa , μm	l , mm	L , mm	$N_2(0)$	α_2 mm^{-2}	RSm_2 , mm	n_{RSm}	L mērījumam, mm
Rugotest 104, N6	0,8	0,8	0,8	1	-	2,6	-	169,12
			1,6	2	-		-	
			2,4	2	-		-	
			3,2	3	4,3		56	
			4	4	4,9		43	

Raupjuma parametra RSm mērījumu precizitātes aprēķinu rezultāti visām pētāmām plakanslīpētām virsmām X-ass un Y-ass virzienos pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ ir atspoguļoti 4.3.Tabulā. Pēc profilogrammām noteiktās $N(0)$ vērtības vēlreiz pierāda faktu, ka, jo mazāka ir Sa vērtība, jo smalkāks ir nelīdzenumu solis un attiecīgi lielāks profila krustojumu skaits ar viduslīniju trases garumā. Pie tām virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām $N(0)$ skaits ir apmēram 30 reizēs lielāks nekā paralēli apstrādes pēdām, kas vēlreiz liecina par plakanslīpēto virsmu anizotropiju.

4.3.Tabula

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra RSm noteikšanai plakanslīpētām virsmām pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$

Paraugs	Sa , μm	Virziens	l , mm	L , mm	$N(0)$	α , mm^{-2}	n_{RSm}	L_1 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, bet Y-ass virzienā - vairāk par 30 mērījumiem, lai iegūtu ticamas RSm vērtības pie trases garuma $L=5l$. Veicot vienu mērīšanas eksperimentu virzienā paralēli apstrādes pēdām pie uzdotiem $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ ir

vajadzīgs 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 papildus eksperimenti RSm_2 precizitātes nodrošināšanai; Profilu skaits X-ass virzienā sastāda vairākus tūkstošus, bet 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 matemātiski sagaidāmās vērtības noteikšanai pielieto izteiksmi (3.25), savukārt parametra V_m dispersiju nosaka pēc sekojošā vienādojuma [44]:

$$D\{V_m\} = \left\{ \frac{\pi}{Aa\sqrt{\alpha_1\alpha_2}} \left([1 - \Phi(\gamma)]^2 + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i^2 i!} [\Phi^{(i-1)}(\gamma)]^2 \right) \right\} \quad (4.7.)$$

kur $\alpha_1\alpha_2$ – korelācijas funkcijas aproksimācijas parametri perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām

$$\sqrt{\alpha_1\alpha_2} = \frac{\pi^2 E\{N_1(0)\}E\{N_2(0)\}}{2} \quad (4.8.)$$

kur $N_1(0), N_2(0)$ – krustojumu skaits ar viduslīniju virzienos perpendikulāri un paralēli apstrādes pēdām, mm^{-1} .

Pēc attiecīgiem pārveidojumiem vienādojumu (4.1.) n_{Vm} noteikšanai var pārrakstīt sekojošā veidā:

$$n_{Vm} = \frac{t_{\beta}^2 \cdot 2\pi \cdot \left([1 - \Phi(\gamma)]^2 + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i^2 i!} [\Phi^{(i-1)}(\gamma)]^2 \right)}{\varepsilon^2 \cdot L^2 \cdot Str \cdot \alpha_1 \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\gamma^2}{2}} - \gamma [1 - \Phi(\gamma)] \right\}^2} \quad (4.9.)$$

4.4. Tabulā ir atspoguļoti nepieciešamie dati plakanslīpētās virsmas n_{Vm} noteikšanai pie $\varepsilon=0.1$ un $\beta=0.9$ atkarībā deformācijas līmeņa γ un trases garuma L .

4.4. Tabula

Nepieciešamais mērījumu skaits parametra V_m noteikšanai pie atšķirīgiem deformācijas līmeņiem

$N.p.k.$	L	Str	$N_1(0)$	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

4.4.Tabulas turpinājums

$N.p.k.$	L	Str	$N_l(0)$	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

$N.p.k.$	L	Str	$N_l(0)$	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 4.4.Tabulas datiem var secināt, ka precīzai materiāla tilpuma V_m noteikšanai pat pie standartizētiem mērīšanas laukuma izmēriem ir jāveic vairāki atsevišķi 3D raupjuma mērījumi. Pie tām, palielinoties deformācijas līmenim mērīšanas eksperimentu apjoms pieaug vairākās reizēs. Tas ir pierādījums, kāpēc 3.5.Sadaļā parametra V_m eksperimentālām vērtībām bija ievērojamas novirzes no aprēķinātām.

4.4. Secinājumi

- Raupjuma parametru Sa , RSm_1 un RSm_2 noteikšanas precizitāte pie relatīvās kļūdas 0,1 un ticamības varbūtības 0,9 būs nodrošināta ar vienu 3D raupjuma mērījumu pie standartizētā trases garuma, kurš sastāda 5 bāzes garumus.
- Materiāla tilpuma V_m noteikšanas precizitātes nodrošināšanai pie relatīvās kļūdas 0,1 un ticamības varbūtības 0,9 ir jāveic no 6 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 analītiskais noteikšanai virsmām ar neregulāru raksturu un izteikto anizotropiju.

1) Pirms virsmas 3D ģeometrijas uzņemšanas:

- 1.1. Izvēlēties mērīšanas laukuma (kvadrāta) malas izmēru, kurš atbilstu 5 bāzes garumiem. Bāzes garumu izvēlās atkarībā no iepriekš noteiktās vai jau zināmas Ra/Sa vērtības pēc ISO 21920 standarta datiem.
- 1.2. Atkarībā no mērīšanas laukuma izmēriem izvēlēties atbilstošo attālumu starp virsmas punktiem pa X un Y asīm un punktu skaitu, ņemot vērā mēriekārtas specifikāciju un mērīšanas eksperimenta ierobežojums (piem. maksimālo punktu skaitu);
- 1.3. Nodrošināt topogrāfijas uzņemšanu perpendikulāri apstrādes pēdām; Ja parauga izmēri ir mazāki par 5 bāzes garumiem jāveic papildus eksperimenti. To skaitu atkarībā no parametra rēķina pēc 4.Sadaļas formulām.

2) Pēc virsmas 3D ģeometrijas uzņemšanas:

- 2.1. Veikt virsmas līmeņošanu, 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 nosaka 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 izmantot datoroperāciju “calculate”→standarts ISO 21920→ un sliekšnis 10%.
- 2.5. Parametra RSm_2 noteikšanai pastāv divi varianti:
 - 2.5.1. Parametru RSm_2 nosaka, izmantojot virsmas tekstūras indeksu Str pēc vienādojuma (3.17).
 - 2.5.2. No nolīmeņotās virsmas izvilkt visus Y-ass profilus. Izmantojot datorprogrammas funkciju “calculate”→ standarts ISO 21920, izvēlēties “Waviness” profilu ar cut-off par vienu vienību mazāko nekā bāzes garums → sliekšnis 10%. Aprēķināt 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 izvēlēties funkciju “slices”. Ievadot vajadzīgo līmeni: $1Sq$, $2Sq$ utt. nolasīt “volume of material” vērtību.

5. VIRSMAS DILŠANAS INTENSITĀTES UN NODILUMA NOTEIKŠANA

Dotajā 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 pieved pie sarežģītiem aprēķiniem.

Vispārīgi kontaktēšanas zonās notiek materiāla tilpuma V' tieša deformācija, bet tā nelokalizēties konkrētajā tilpumā, bet izplatīsies dziļāk mikroizciļņa ķermenī. Savukārt, pētījumos tika pamatots, ka deformācijas izplatīšanas faktoru dziļākos materiāla slāņos drīkst neņemt vērā. Saskaņā ar [7], dilšanas intensitāti J_h nosaka pēc vienādojuma:

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

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 [44], kura aprēķinā tapāt kā pie nodiluma noteikšanas, ņem vērā tādus raupjuma parametrus kā Sa , RSm un tādas mehāniskās īpašības kā cietība un elastības konstante:

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

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

Materiāla elastības konstanti aprēķina pēc formulas:

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

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 vienādojumu (5.1.) prasa arī kontakta izmēra izpēti, kurš tiek izteikts kā reāla kontakta laukuma garums d berzes virzienā. Pamatojoties uz Normālā gadījuma procesa raksturojumiem parametru d var izteikt sekojošā veidā [81]:

$$d = \frac{2\pi}{\sqrt{-R_0''}} [1 - \Phi(\gamma)] e^{\frac{\gamma^2}{2}} \quad (5.4.)$$

kur R_0'' - korelācijas funkcijas 2.kārtas atvasinājums;

Korelācijas funkcijas 2.kārtas atvasinājumu nosaka pēc formulas:

$$\sqrt{-R_0''} = \frac{2\pi}{RSm} \quad (5.5.)$$

Attiecīgi vienādojumu (5.4.) var pārveidot sekojošajā veidā:

$$d = RSm [1 - \Phi(\gamma)] e^{\frac{\gamma^2}{2}} \quad (5.6.)$$

Deformācijas līmeni γ un ciklu skaitu līdz materiāla sagraušanai nosaka atkarībā no kontakta veida – elastīgā vai plastiskā.

Analizējot vienādojumu (5.1.), var secināt, ka nav nepieciešamības meklēt deformētā materiāla tilpuma precīzu vērtību, jo V' jebkurā gadījumā tiks nokoriģēts ar pusempirisko lielumu n – ciklu skaitu līdz materiāla sagraušanai. Tāpēc parametra V' vietā var izmantot standarta ISO 25178-2 parametru Vm (pēc funkcijas “slices” pielietošanas), noteiktu pie konkrēta deformācijas līmeņa. Veicot dilšanas intensitātes aprēķinus konkrētai virsmai var izmantot eksperimentālo Vm vērtību, savukārt, veicot prognozēšanas aprēķinus, materiāla tilpuma noteikšanai jāizmanto vienādojums (3.25.), kas bija pamatots 3.5.Sadaļā.

5.1. Nodiluma aprēķins elastīgā kontakta gadījumā

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

$$F_1(\gamma) = \left(\frac{q_{el} \cdot \theta_{sum}}{k_{el}} \right) \cdot \left(\frac{RSm_1}{Sa} \right) \quad (5.7.)$$

kur $F_1(\gamma)$ – tabulēta funkcija [44];

q_{el} – slodze, MPa;

k_{el} – koeficients, kurš ir atkarīgs no virsmas tekstūras indeksa Str [44];

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

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

$$\theta_{sum} = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi \cdot E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{\pi \cdot E_2} \quad (5.8.)$$

Pēc funkcijas $F_1(\gamma)$ aprēķinātās vērtības nosaka deformācijas līmeni γ [44]. Ciklu skaitu līdz materiāla sagraušanai pēc dažiem pārveidojumiem var izteikt ar sekojošo vienādojumu [6]:

$$n_{el} = \left(\frac{3\theta\sigma_0}{4kf\sqrt{2\pi(4\gamma - \gamma^2)}} \cdot \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{el}} \quad (5.9.)$$

kur k – konstanta, atkarīga to berzes-nogurumu raksturlielumiem [7];

f – berzes koeficients;

σ_0 – materiāla ilgzitūības spriegumu robežvērtība, MPa;

t_{el} – noguruma līknes parametrs [7];

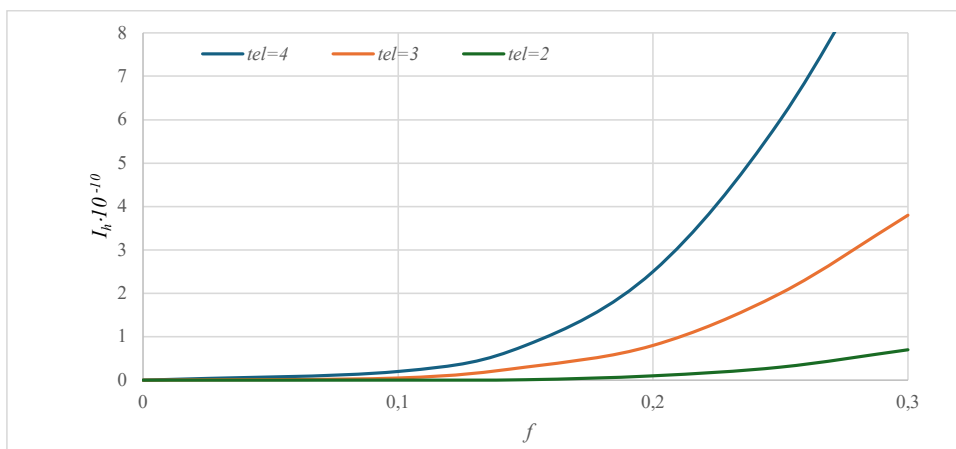
Dilšanas intensitāti elastīgā kontakta gadījumā tiek piedāvāts rēķināt pēc sekojošās formulas:

$$I_{h_el} = \frac{V_m}{\left(\frac{3\theta\sigma_0}{4kf\sqrt{2\pi(4\gamma - \gamma^2)}} \cdot \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{el}} \cdot RSm_2 [1 - \Phi(\gamma)] e^{\frac{\gamma^2}{2}} \cdot Aa} \quad (5.10.)$$

Pēc vienādojuma (5.10.) var secināt, ka dilšanas intensitāti elastīgā kontakta gadījumā ietekmē tādi fizikāli-mehāniskie raksturlielumi kā materiāla sagraujošais spriegums σ_0 , noguruma līknes radītājs t_{el} , elastības modulis E , Puasona koeficients μ un berzes koeficients f . Pēc dažiem matemātiskiem pārveidojumiem var secināt, ka:

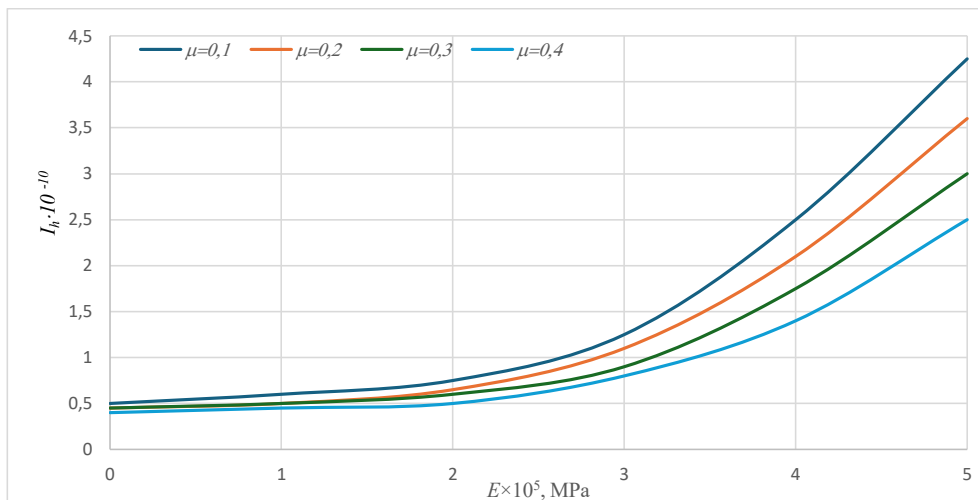
$$I_{h_el} \sim f^{t_{el}} \quad (5.11.)$$

Ņemot vērā, ka parametram t_{el} ir plašs vērtību diapazons ($t_{el}=1..10$ un vairāk), tad paliek skaidrs, ka berzes koeficienta izmaiņas pieved pie dilšanas intensitātes ievērojamām izmaiņām. Dotās sakarības grafiskais attēlojums ir redzams 5.2.att. Var secināt, ka berzes koeficienta lielākas vērtības ($f=0,2..0,3$) vairāk ietekmē dilšanas intensitātes izmaiņas.



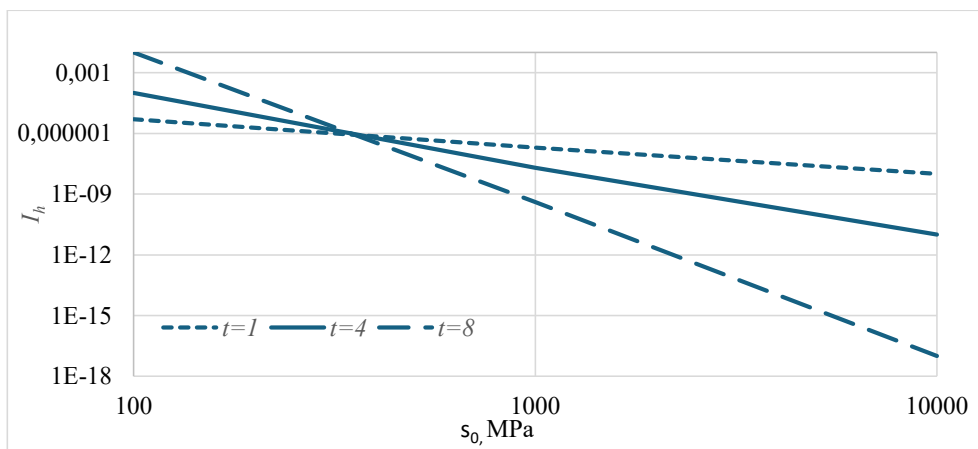
5.2.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no berzes koeficienta f

Materiāla elastības-stiprības īpašības raksturojas ar elastības moduli E un noguruma līknes parametru t , kurš ir saistīts ar stiepes izturību. Ja apskatīt atsevišķi parametra E ietekmi, tad var redzēt, ka nodilums palielinās ar elastības moduļa palielināšanos (skat. 5.3.att.). Izmaiņas ir dotas atkarībā no Puasona koeficienta μ vērtībām. Tiem palielinoties, dilšanas intensitāte samazinās.



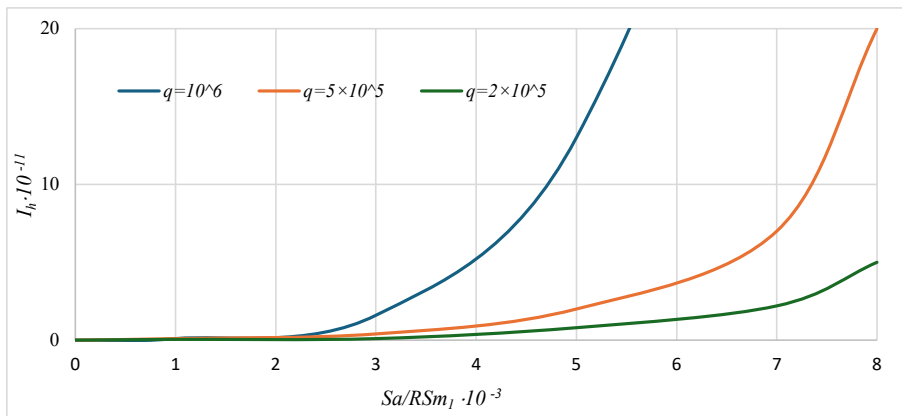
5.3.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no elastības moduļa E

5.4.att. ir redzamas I_h izmaiņas atkarībā no materiāla stiprības īpašībām. Tā parametra σ_0 palielināšanās samazina nodiluma lielumu jo vairāk, jo lielāks ir noguruma līknes parametrs t .



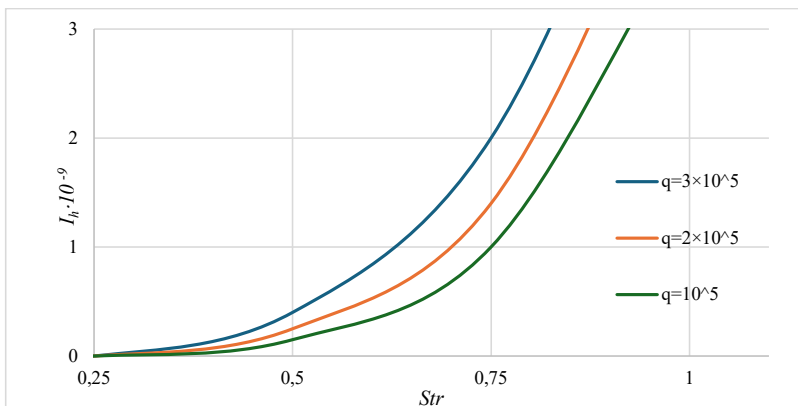
5.4.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no sagraujošā sprieguma σ_0

Svarīgi apskatīt arī virsmas raupjuma parametru ietekmi uz dilšanas intensitāti. Pēc vienādojuma (5.10.) ir saprotams, ka dilšanas intensitāte ir atkarīgā no detaļas vidējā aritmētiskā augstuma Sa un raupjuma soļiem RSm_1 un RSm_2 . Analīze norāda uz to, ka Sa vērtības samazināšana un RSm vērtību palielināšana pazemina dilšanas intensitāti, jo šajā gadījumā virsmas nelīdzenumiem ir lēzens raksturs. Grafiski tas ir atspoguļots 5.5.att. Var pamanīt, ka samazinoties Sa/RSm attiecībai nodilums strauji pazeminās, sasniedzot kādu stabilāku vērtību, t.i. gludākām virsmām diluma lielums ir mazāk jūtīgs pret raupjuma parametru izmaiņām.



5.5.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no Sa/RSm_1 attiecības

5.6.att. ir atspoguļota arī slodzes ietekme uz dilšanas intensitāti. Pie augstākām īpatnējām slodzēm Sa/RSm vairāk ietekmē dilšanas intensitāti, ko var izskaidrot ar slodzes papildus ietekmi uz tuvinājumu.



5.6.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no virsmas tekstūras indeksa Str

5.2. Nodiluma aprēķins plastiskā kontakta gadījumā

Plastiskā kontakta gadījumā deformācijas līmeni γ nosaka pēc funkcijas $F_2(\gamma)$ aprēķinātās vērtības:

$$F_2(\gamma) = \frac{q_{plast.}}{H \cdot k_{plast}} \quad (5.12.)$$

kur $F_2(\gamma)$ – tabulētas funkcija [44];

q_{plast} – slodze, MPa;

k_{plast} – koeficients, kurš ir atkarīgs no virsmas tekstūras indeksa Str [44].

Pēc funkcijas $F_2(\gamma)$ aprēķinātās vērtības nosaka deformācijas līmeni γ [44]. Ciklu skaits dotajā gadījumā tiek izteikts ar sekojošo vienādojumu [6]:

$$n_{plast} = \left(\frac{e_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_T - 2fH}{\sigma_T + 2fH} \cdot \frac{1}{\pi(4\gamma - \gamma^2)}} \cdot \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{plast}} \quad (5.13.)$$

kur σ_T – materiāla tecēšanas robeža, MPa;

t_{plast} – noguruma līknes parametrs [7];

Dilšanas intensitāti plastiskā kontakta gadījumā tiek piedāvāts rēķināt pēc sekojošās formulas:

$$I_{h_plast} = \frac{V_m}{\left(\frac{e_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_T - 2fH}{\sigma_T + 2fH} \cdot \frac{1}{\pi(4\gamma - \gamma^2)}} \cdot \frac{RSm_2}{Sa} \right)^{t_{plast}} \cdot RSm_2 [1 - \Phi(\gamma)] e^{\frac{\gamma^2}{2}} \cdot Aa} \quad (5.14.)$$

Lineāra nodiluma lielums h tiek izteikts ar sekojošo formulu:

$$h = I_h \cdot L_{ber} \quad (5.15.)$$

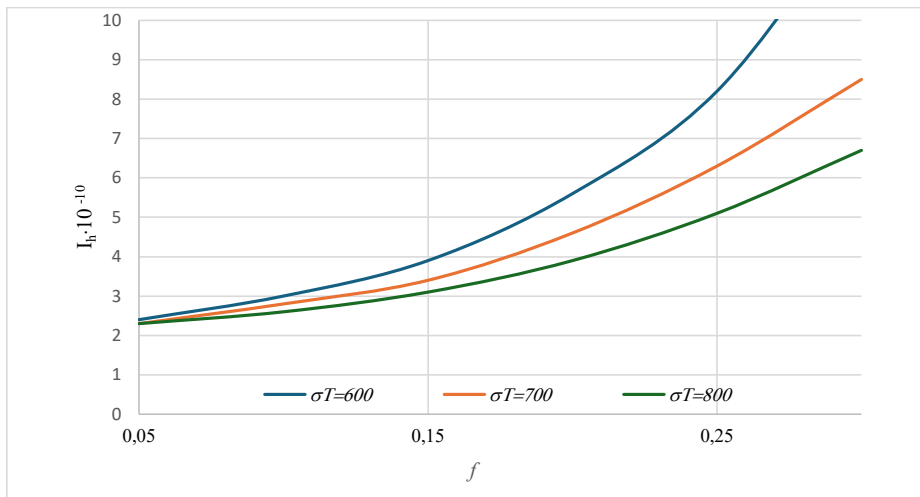
kur L_{ber} – berzes ceļš, mm.

$$L_{ber} = V \cdot t \quad (5.16.)$$

kur V – gājiena ātrums, m/s;

t – darba laiks, s.

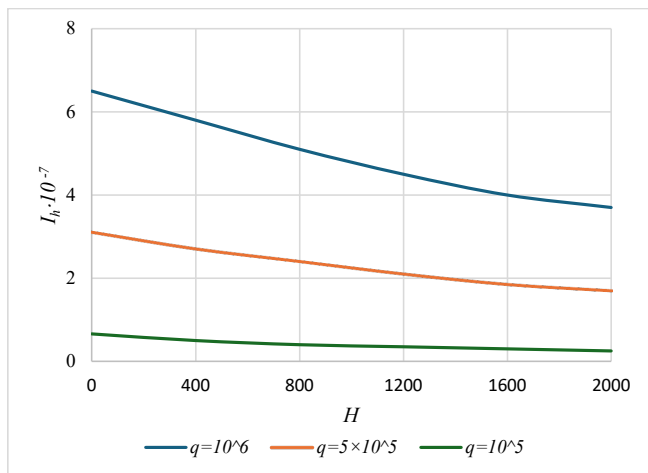
Tātad plastiskā kontakta gadījumā dilšanas intensitāti nosaka pēc tādiem fizikāli-mehāniskiem raksturlielumiem kā materiāla cietība H , materiāla tecēšanas robeža σ_T , pagarinājums e_0 , noguruma līknes radītājs t un berzes koeficients f . Nozīmīga ietekme ir berzes koeficientam f , savukārt I_h izmaiņas ir mazākas, salīdzinot ar elastīgo kontaktu, jo parametra t vērtības ir robežās no 1 līdz 3. Grafiski tas ir parādīts 5.7.att.



5.7.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no berzes koeficienta f

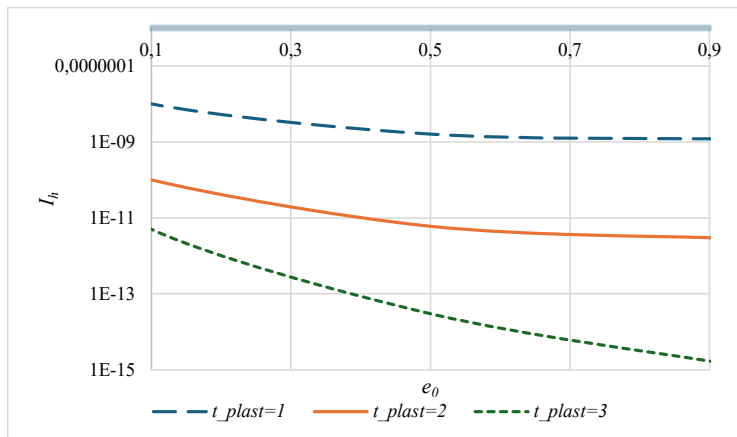
Pie berzes koeficienta $f > 0,2$ notiek dilšanas intensitātes strauja palielināšanās. Pie tām, palielinoties parametra σ_T vērtībai dilšanas intensitāte samazinās.

Dilšanas intensitātes izmaiņas atkarībā no cietības H pie dažādiem īpatnējiem spriegumiem ir atspoguļotas 5.8.att. Palielinoties cietībai H un samazinoties spriegumam q , dilšanas intensitāte arī samazinās.



5.8.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no cietības H

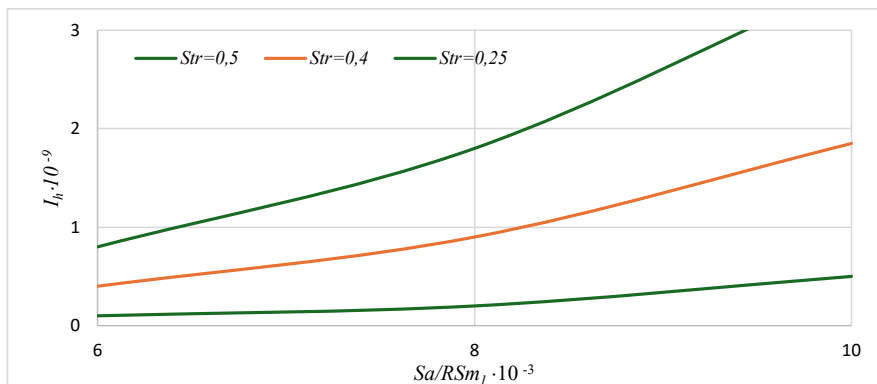
5.9.att. ir redzamas I_h izmaiņas atkarībā no relatīvā pagarinājuma e_0 pie dažādām noguruma līknes parametra t vērtībām. Palielinoties e_0 un t , dilšanas intensitāte samazinās.



5.9.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no relatīvā pagarinājuma e_0

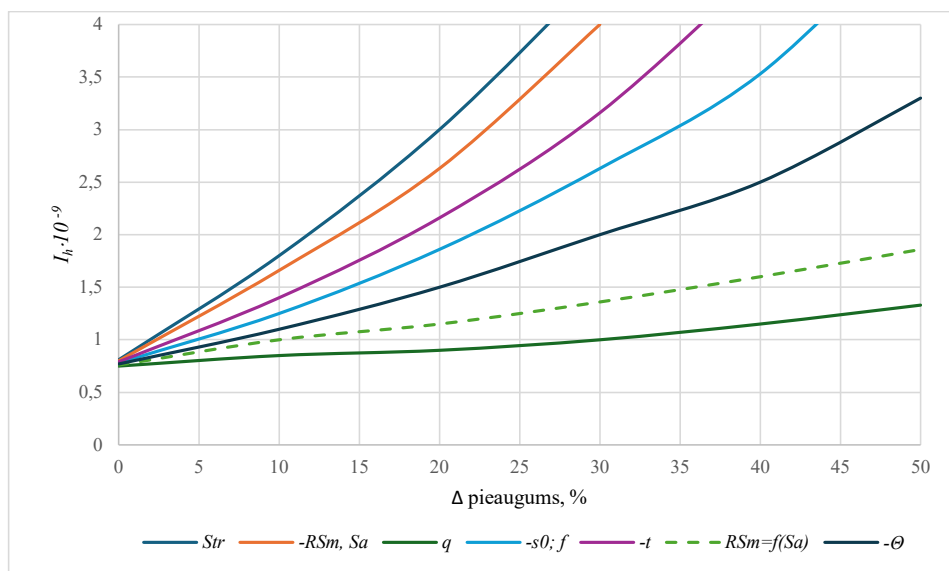
Plastiskā kontakta gadījumā nodiluma lieluma jutīgums pret Sa/RSm attiecību ir mazāks salīdzinājumā ar elastīgo kontaktu, ko var izskaidrot ar papildus saiti starp virsmas raupjuma parametriem un deformācijas līmeni γ .

5.10.att. ir atspoguļota raupjuma anizotropijas ietekme uz dilšanas intensitāti I_h . Var secināt, ka pie mazākas raupjuma soļu attiecības nodilums samazinās. Jo lielāka ir Str vērtība, jo lielāka ir tā ietekme uz dilšanas intensitāti.

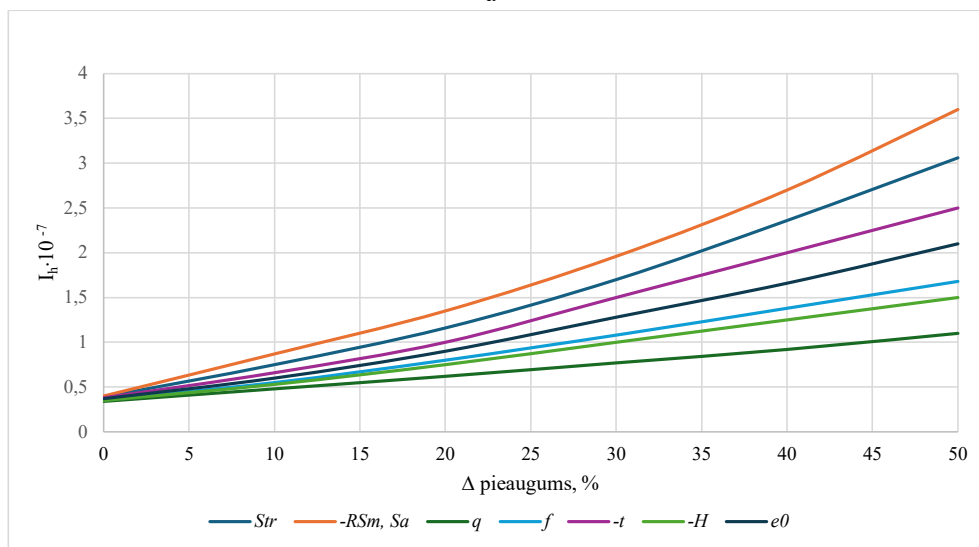


5.10.att. Dilšanas intensitātes I_h izmaiņas atkarībā no Sa/RSm_l attiecības

Diezgan svarīgi ir salīdzināt dažādu parametru ietekmi uz dilšanas intensitāti, nosakot tās īpatnējo svaru. Šim nolūkam tika uzkonstruētas sakarības, kuras atspoguļo dažādu parametru ietekmi uz dilšanas intensitāti elastīgā un plastiskā kontakta gadījumos, kas ir redzams 5.11.att. a, b. Tajos ir parādītas parametru vērtību izmaiņas un tiem atbilstošais I_h pieaugums.



a



b

5.11.att. Parametru izmaiņas ietekme uz dilšanas intensitāti I_h
a – elastīgā kontakta gadījumā, b – plastiskā kontakta gadījumā

Ja pieņem, ka nodilumu ietekmējošo parametru vērtības izmainās neatkarīgi viena no otras, var secināt, ka dilšanas intensitāti visvairāk ietekmē raupjuma parametri. Pie tam anizotropijas rādītājam Str , kura vērtības ir mazākas par 0,2, ir lielāka ietekme uz reālā kontakta laukuma

izmaiņām nekā parametriem Sa un RSm , kas pieved pie kontaktspiegumu un dilšanas intensitātes izmaiņām. Raupjuma parametriem Sa un RSm ir vienāda, bet pretēja ietekme uz I_h izmaiņām, tas nozīmē, ka nodilumizturības paaugstināšanai ir nepieciešams samazināt nelīdzenumu augstumu Sa vai palielināt raupjuma soli RSm .

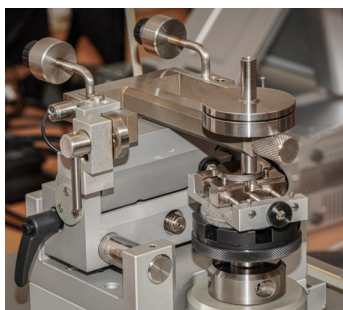
Pie esošiem pieņēmumiem mazāka ietekme uz I_h ir materiāla noguruma raksturlielumiem: σ_0 , e_0 , t un berzes koeficientam f . Savukārt, pamatojoties uz vairākiem berzes eksperimentu rezultātiem, var secināt, ka nodilumizturību, galvenokārt, nosaka berzes virsmu fizikāli-mehāniskie un materiāla noguruma raksturlielumi. Šādus rezultātus var izskaidrot ar korelācijas esamību starp atsevišķiem parametriem. Šāda saite ir parametriem Sa un RSm , Sa un f u.c. Pamatojoties uz eksperimentāliem pētījumiem [17], tika iegūts, ka sakarību starp parametriem RSm un Sa pie $0,1 < Sa < 2,5$ var izteikt sekojošajā veidā:

$$RSm \approx 35e^{Sa} \quad (5.17.)$$

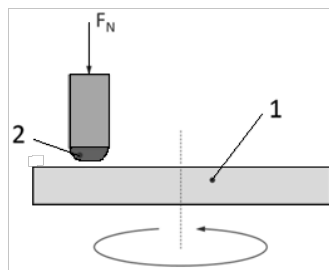
Ņemot vērā vienādojuma (5.17.) sakarību var iegūt berzes virsmu raupjuma parametru samazināto ietekmi uz dilšanas intensitāti, kas 5.11.att. ir parādīts ar pārtraukto līniju. Pie tam, kā ir zināms, raupjuma parametru vērtības stabilizējas detaļu piestrādes laikā, nodrošinot minimālo dilšanas intensitāti.

5.3. Analītisko aprēķina rezultātu un berzes eksperimentā iegūto datu salīdzinājums

Lai pārbaudītu nodiluma noteikšanas modeļa pareizību ir nepieciešams salīdzināt analītiskā aprēķina rezultātus ar eksperimentāliem datiem. Šim nolūkam tika veikta berzes pāra tērauds (102Cr6) - bronza (CW307G) testēšana uz tribometra CSM Instruments pēc shēmas lode-disks [19]. Berzes eksperimenta shēma un tam nepieciešamais aprīkojums ir atspoguļoti 5.12.att. Lodītes virsma pirms berzes eksperimenta bija noslīpēta, lai būtu nodrošināts konstants nominālais kontakta laukums starp lodītes virsmu un rotējošo disku.



a



b

5.12.att. Berzes eksperimenta attēlojums

a - tribometrs CSM Instruments; b – testēšana pēc shēmas lode (2) – disks (1)

Berzes eksperimenta rezultāti berzes pārim tērauds - bronza ir atspoguļoti 5.13.att. Lineārā nodiluma noteikšanai tika veikti 5 eksperimenti pie diska rotācijas ātruma $v=0,3$ m/s un pieliktās slodzes $q=1,45$ MPa, un aprēķināta vidējā vērtība; Nodiluma aprēķinam bija nepieciešams izpētīt tribotreka šķērsgriezuma laukumu. Šīm nolūkam datorapstrādes programmā McubeMapUltimate 10 tika veikti tribotreka profilu mērījumi 4 vietās.

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

5.13.att. Diska (bronza CW307G) eksperimentālās nodiluma vērtības [19]

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

5.1.tabula.

Izejas dati dilšanas intensitātes un nodiluma noteikšanai diskam no bronzas CW307G

Parametri		Noslīpētā lodīte	Disks	mērvienības
		Tērauds (102Cr6)	Bronza (CW307G)	
Raupjuma parametri	Sa	-	1,7	μm
	Sq	-	2,15	μm
	RSm_1	-	0,035	mm
	RSm_2	-	1,16	mm
	Str	-	0,03	-
Fizikāli-mehāniskie raksturlielumi	E	$2,12 \times 10^5$	$1,15 \times 10^5$	MPa
	μ	0,28	0,34	-
	H	-	200	MPa
	σ_r	-	360	MPa
	f	0,18		-

5.1.tabulas turpinājums

Parametri		Noslīpētā lodīte	Disks	mērvienības
		Tērauds (102Cr6)	Bronza (CW307G)	
Materiāla noguruma raksturlielumi	$e\theta$	-	0,39	-
	$t_{plast.}$	-	2	-
Konstruktīvie raksturlielumi	q	1,45		MPa
	V	0,3		m/s
	Aa	3,46		mm ²
	t	13334		s

- 1) Pirmkārt, tika noteikta materiāla elastības konstante:

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

- 2) Attiecīgi kontakta veida kritērijs KK :

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

Pieņemam, ka dotajā gadījumā tiek nodrošināts plastiskais kontakts ($KK \leq 0,7$).

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

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

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

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

- 4) Ciklu skaits līdz materiāla sagraušanai:

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

- 5) Kontakta laukuma garums:

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

- 6) Deformētā materiāla tilpums:

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

7) Dilšanas intensitāte:

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

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

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

9) Lineārais nodilums:

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

Lineārā nodiluma eksperimentāli noteiktās un aprēķinātās vērtības pēc konkrētā berzes ceļa ir atspoguļotas 5.2.Tabulā.

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

5.4. Secinājumi

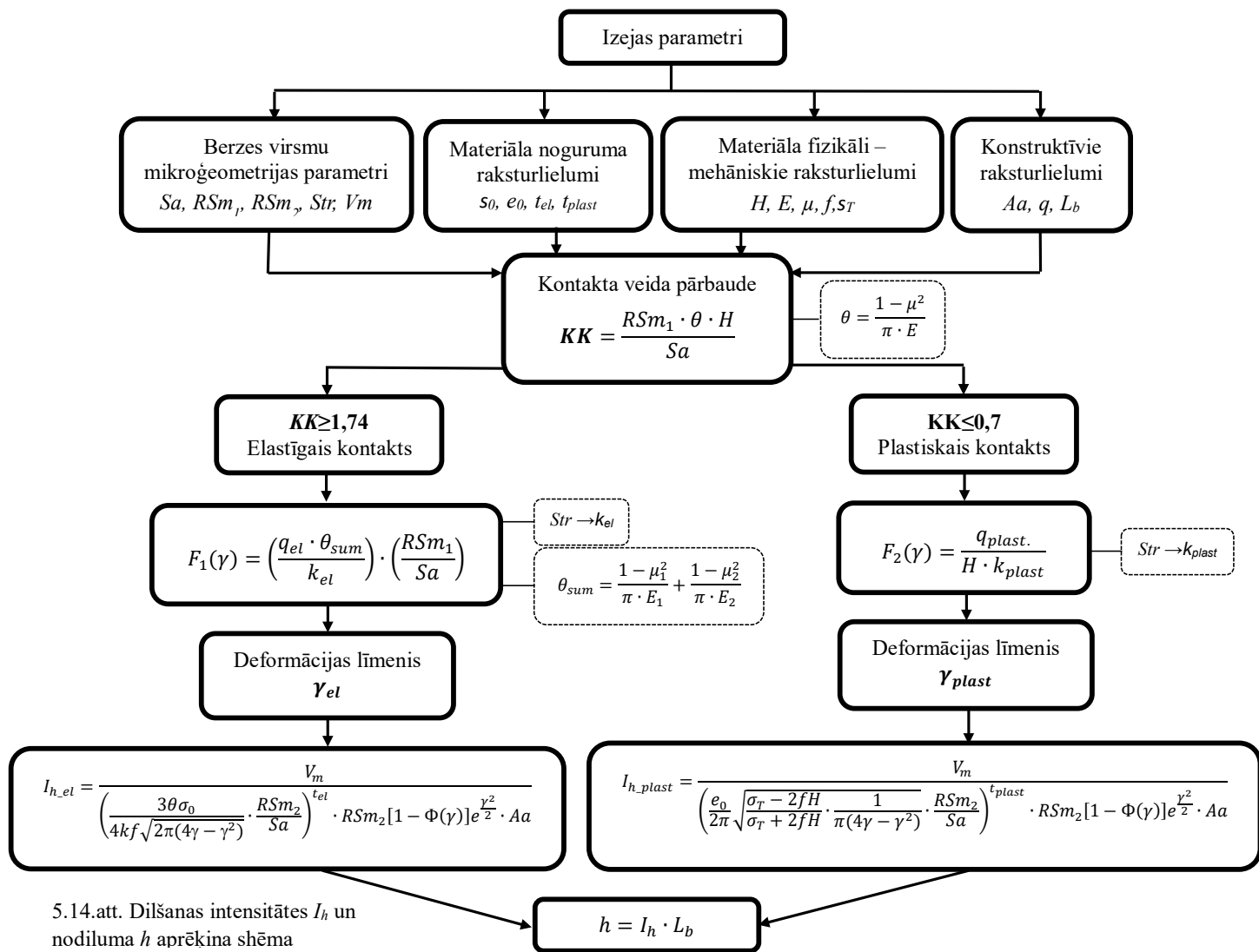
1. Relatīvā novirze starp nodiluma analītiskā aprēķina rezultātiem un eksperimenta rezultātiem nepārsniedz 5%.
2. Sa/RSm attiecības palielināšana dod dilšanas intensitātes pieaugumu.
3. Pareizai dilšanas intensitātes noteikšanai un prognozēšanai jāņem vērā korelācija starp raupjuma parametriem Sa un 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 nogurumsagrūšana. Dilšanas intensitātes aprēķinu veic sekojošā 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 profilogrāfu-profilometru. Raupjuma parametrus nosaka pēc 4.5.Sadaļas rekomendācijām. 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.

5.14.att. ir atspoguļota dilšanas intensitātes un nodiluma aprēķina shēma, ņemot vērā kontakta veida kritēriju.



5.14.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 likuma normalitāti, kā arī viens konkrēts kontakta veids. Veicot diluma simulāciju un aprēķinu galīgo elementu vidē vairākos gadījumos pētnieki pielieto Arčarda un Fleišera nodiluma aprēķinu modeļus, un vienkāršo berzes pāra kontakta tipu (gluda virsma-gluda virsma), kur virsmas raupjums nav ņemts vērā, kas attiecīgi samazina rezultātu ticamību. Pie tām esošajos nodiluma aprēķinu modeļos raupjuma parametru pielietošanas pareizība un noteikšanas precizitāte nav pamatota, kas arī samazina iegūto rezultātu ticamību. Lai atrisinātu eksistējošo problēmu tika izvirzīta sekojošā hipotēze: Virsmas 3D un 2D raupjuma parametru precizēta noteikšana un integrēšana, kā arī atsevišķo materiāla noguruma raksturlielumu izmantošana dilšanas intensitātes aprēķinos un prognozēšanā paaugstinās rezultātu ticamību elastīga un plastiskā kontakta gadījumos”. Dotās hipotēzes apstiprinājums ir redzams sekojošajos 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, dotām novirzēm nav izteiktas ietekmes uz vidējā aritmētiskā augstuma Sa analītisko noteikšanu. Taču, lai paaugstinātu rezultātu precizitāti, tika piedāvāts parametru Sa rēķināt, 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 RSm_2 noteikšanai, kura ir apgrūtināta ar novirzi starp virsmas vidusplakni un profilu viduslīnijām.
4. Raupjuma parametru Sa , RSm_1 un RSm_2 noteikšanas precizitāte pie relatīvās kļūdas 0,1 un ticamības varbūtības 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 dotā parametra noteikšanas precizitāti. Viena mērīšanas eksperimenta ietvaros iegūtās Vm vērtības ir mazākas par aprēķinātām.
6. Promocijas darba ietvaros tika izstrādāta metodika raupjuma parametru Sa , RSm_1 , RSm_2 , 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 sastāda 5%.

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

REKOMENDĀCIJAS TĀLĀKAI IZPĒTEI

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

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. K.L. Johnson. Contact Mechanics. Cambridge Univ. Press, 1985, p. 306-311.
2. A. Lockrey. An evaluation of adhesive contact models for elastic solids using atomic force microscopy. University of Southampton, United Kingdom, 2021, 43 p.
3. F. P. Bowden, D. Tabor. The friction and lubrication of solids. Oxford at the Clarendon press, 1950, 331 p.
4. J.F. Archard, Elastic deformation and the laws of friction. Proc. R. Soc. Lond. A243, 190–205 (1957)
5. Popova, E.; Popov, V.L.; Kim, D.E. 60 years of Rabinowicz' criterion for adhesive wear. Friction 2018, 6, 341–348.
6. И.В. Крагельский. Трение и износ. Машиностроение, 1968. 475 стр.
7. Kragelsky, I.V.; Alisin, V.V. Tribology: Lubrication, Friction and Wear. UK: Professional Engineering Publishing limited London and Bury St Edmunds, 2005. 948 p.
8. Fleischer, G. Verschleiß und Zuverlässigkeit, 1st ed.; Verlag Technik: Berlin, Germany, 1980.
9. 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. 2016, 97, 440–466.
10. Lijesh, K.P.; Khonsari, M.M. On the Modeling of Adhesive Wear with Consideration of Loading Sequence. Tribol. Lett. 2018, 66, 105.
11. Lijesh, K.; Khonsari, M.; Kailas, S.V. On the integrated degradation coefficient for adhesive wear: A thermodynamic approach. Wear 2018, 408–409, 138–150.
12. Xiang, G.; Han, Y.; Wang, J.; Wang, J.; Ni, X. Coupling transient mixed lubrication and wear for journal bearing modeling. Tribol. Int. 2019, 138, 1–15.
13. 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 2022, 502, 204379.
14. 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 2023, 11, 364.
15. Greenwood, J.A. and Williamson, J.P., 1966. Contact of nominally flat surfaces. Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences, 295(1442), pp.300-319.
16. Greenwood, J.A.; Tripp, J.H. The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proc. Inst. Mech. Eng. 1970, 185, 625–633.
17. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига, Зинатне, 1975. 211 стр. (in Russian).
18. Konrads G. Mašīnu detaļu slīdes virsmu dilšana. - Rīga, RTU Izdevniecība, 2006. 80.lpp.

19. G.Spriņģis. Slīdes berzes pāra detaļu nodiluma analīze un noteikšana. Promocijas darbs. RTU Izdevniecība, Rīga, 2023, 101 lpp.
20. Pin on Disk Test: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
21. Xue Y, Chen J, Guo S, et al. Finite element simulation and experimental test of the wear behavior for self-lubricating spherical plain bearings. *Friction* 2018; 6(3): 297–306.
22. Duo, Yang, et al. “Discrimination of Wear Performance Based on Surface Roughness Parameters Arithmetic Mean Height (S_a) and Skewness (S_{sk}).” *Wear*, vol. 548–549, 2024, p. 1-10.
23. Yan L., Guan L., Wang D., Xiang D. Application and prospect of wear simulation based on ABAQUS: A Review. *Lubricants*, Vol.12, article no.57, 2024, pp. 1-26.
24. UMESHMOTION subroutine in ABAQUS: <https://caeassistant.com/product/umeshmotion-subroutine-in-abaqus/>
25. Rough surface generator plug-in for Abaqus/CAE: https://www.youtube.com/watch?v=kuCzG_OzWTM
26. Youngbin Lim, Sangyul Ha, RufGen: A plug-in for rough surface generation in Abaqus/CAE. *SoftwareX* 22 (2023) 101380. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101380>.
27. Rough surface generation & analysis: https://www.mysimlabs.com/surface_generation.html
28. Constructing Rough surface for ABAQUS using MATLAB: <https://www.youtube.com/watch?v=DdnmJvsBCnY>
29. 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. *Proc Inst Mech Eng Part J J Eng Tribol* 237(2): 356–368 (2023).
30. 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* 2023, 13, 270, p. 1-25.
31. 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, 148, 38–47.
32. 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* 2021, 56, 2339–2356.
33. 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.
34. Ting, Chen ; Weiguo, Ma ; Kaihui, Zhu ; Zilong, Hu 2024 "Wear simulation of UHMWPE against the different counterface roughness in reciprocating unidirectional sliding motion" *Scientific reports*, 14(1): 15858; | <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66613-w>

35. Awwad KYE, Fallahnezhad K, Yousif BF, et al. Finite element analysis and experimental validation of polymer–metal contacts in block-on-ring configuration. *Friction* 2023; 12: 554–568. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0795-x>
36. Maier M, Pusterhofer M, Grün F. Modelling Approaches of Wear-Based Surface Development and Their Experimental Validation. *Lubricants*. 2022; 10(12):335. <https://doi.org/10.3390/lubricants10120335>
37. R. Tandler, N. Bohn, U. Gabbert, E. Woschke, Analytical wear model and its application for the wear simulation in automotive bush chain drive systems, *Wear* 446–447, 203193 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203193> [CrossRef] [Google Scholar]
38. Bose, K. and Ramkumar, P., “Finite Element Sliding Wear Simulation of 2D Steel-on-Steel Pin-on-Disc Tribometer,” SAE Technical Paper 2018-28-0011, 2018, doi:10.4271/2018-28-0011
39. Li, C., Karimbaev, R., Wang, S., Amanov, A., Wang, D., and Abdel Wahab, M., “Fretting Wear Behavior of Inconel 718 Alloy Manufactured by DED and Treated by UNSM,” *Sci. Rep.*, 13(1)1308, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28128-8>
40. Terwey, J.T.; Fourati, M.A.; Pape, F.; Poll, G. Energy-Based Modelling of Adhesive Wear in the Mixed Lubrication Regime. *Lubricants* 2020, 8, 16. doi:10.3390/lubricants8020016
41. Winkler, A.; Bartz, M.; Wartzack, S. Numerical Wear Modeling in the Mixed and Boundary Lubrication Regime. *Lubricants* 2022, 10, 334. <https://doi.org/10.3390/lubricants10120334>
42. LVS EN ISO 25178-2:2022. Izstrādājumu ģeometriskās specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: laukums. 2.daļa: Terminu, definīcijas un virsmas īpašību parametri
43. Рудзитис Я.А. Контактная механика поверхностей. Часть 1. (Mechanics of surface contact. Part 1). Riga: Riga Technical University, 2007. 193 p. (in Russian).
44. 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).
45. LVS EN ISO 21920-2:2022. Izstrādājumu ģeometriskās specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: profils. 2.daļa: Terminu, definīcijas un virsmas īpašību rādītāji
46. Seewig J., Scot P.J., Eifler M., Barwick B., Huser D. Crossing-The-Line Segmentation as a Basis for Rsm and Rc Evaluation. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 8, 2020, pp.1-18.
47. Buj-Corral I, Domínguez-Fernández A, Durán-Llucià R (2019) Influence of print orientation on surface roughness in fused deposition modeling (FDM) processes. *Materials* 2019, 12, 3834. 12 p. <https://doi.org/10.3390/ma12233834>
48. 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)

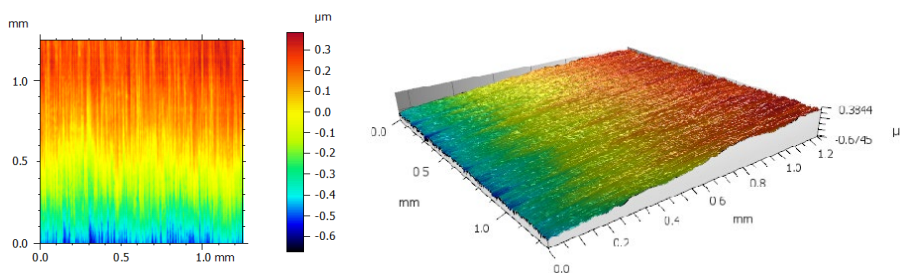
49. Springis G., Boiko I., Linins O. Calculation of wear of metallic surfaces using material's fatigue model and 3D texture parameters. *Tribology in Industry*, Vol. 45, Iss. 4, 2023, pp.729.-741.
50. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход (Surface roughness: theoretically-probabilistic approach). Москва: Наука, 1975. 344 стр. (In Russian).
51. 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, *316*, 97–121.
52. 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.;
53. 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* 2024, *7*, 340–357. <https://doi.org/10.3390/surfaces7020021>
54. 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.* 2021, *14*, 235–248. <https://doi.org/10.1007/s12289-020-01576-7>
55. 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.* 2024, *14*, 619. <https://doi.org/10.3390/app14020619>
56. Hernández, H. Testing for Normality: What is the Best Method. *ForsChem Research Reports*, 6, (2021) 1-38. <https://www.researchgate.net/publication/351128739>
57. Schematic illustrations demonstrate the meaning of parameters Rsk (a) and Rku (b) at https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustrations-demonstrate-the-meaning-of-parameters-Rsk-a-and-Rku-b_fig1_374990091
58. LVS ISO 5479:2000. Statistisko datu apstrāde - Normālsadalījuma novirzes testi
59. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. „Шероховатость, волнистость, профиль”, Международный опыт: СПб.: Изд-во Политехн, ун-та, 2007.- 136 стр.
60. Todhunter L., Leach R., Blateyron F. Mathematical approach to the validation of form removal surface texture software. *Surface Topography: Metrology and Properties*, Vol.8, No. 4, 2020, pp. 1-10.
61. Chiodini, S. In-Situ and Real Time Scanning Probe Microscopy of Organic Ultra THIN films. Ph.D. Thesis, Università di Bologna, Bologna, Italy, 2015, 177 p.
62. Zienert,A.; Langer,J.; Rothe,T.; Wachner,D.; Hofmann,L.; Gottfried,K.: Automatic Analysis of CMP Dishing in Via Arrays from AFM Images. European CMP & WET Users Group Meeting, Buchs (Switzerland), 2023 Apr 20-21; Oral Presentation

63. West, P.; Starostina, N., A Guide to AFM Image Artifacts, Pacific Nanotechnology, Inc., Santa Clara, 2002, 12 p.
64. Vestergaard M., Bengtson S., Pedersen M., Rankl C. and Moeslund T. Stitching Grid-wise Atomic Force Microscope Images . In *Proceedings of the 11th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications - Volume 3: VISAPP, 2016*, p.112-119.
65. Pan, Xiao, "Processing and feature analysis of atomic force microscopy images" (2014). Masters Theses. 7268. 55 p. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7268
66. Leveling and form removal. [online] [27.02.2025] Available at: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-leveling-form-removal.html>
67. Least squares linear regression. [online] [04.03.2025] Available at: https://kenndanielso.github.io/mlrefined/blog_posts/8_Linear_regression/8_1_Least_squares_regression.html
68. Polynomial Interpolation and Least Squares Fitting [online] [04.03.2025] Available at: chromeextension://efaidnbmninnibpcajpgclclefindmkaj/https://www.colorado.edu/amath/sites/default/files/attached-files/week9_0.pdf
69. Surface Metrology Guide: <http://www.digitalsurf.fr/en/guide.html> [skat. 18.06.2020]
70. Marinello, F.; Carmignato, S.; Voltan, A.; Savio, E.; De Chiffre, L. Error Sources in Atomic Force Microscopy for Dimensional Measurements: Taxonomy and Modeling. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2010, 132, 0309031–0309038.
71. Shu H., Zou C., Chen J. and Wang S. Research on micro/nano surface flatness evaluation method based on improved particle swarm optimization algorithm. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Vol. 9, 2021, pp.1-13.
72. The mean and standard deviation of Z-scores [online] [04.03.2025] Available at: <https://mathspace.co/textbooks/syllabuses/Syllabus-786/topics/Topic-12842/subtopics/Subtopic-171748/?activeTab=theory>
73. Necas D., Valtr M., Klapetek P. How levelling and scan line corrections ruin roughness measurement and how to prevent it. *Scientific Reports* 10(1), 2020, pp. 1-15.
74. NEČAS, D.; KLAPETEK, P.; VALTR, M., 2020: Estimation of roughness measurement bias originating from background subtraction. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY* 31(9), p. 094010-1 - 15, doi: 10.1088/1361-6501/ab8993
75. 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. ISSN 1691-5976.
76. LVS EN ISO 25178-3:2012. Izstrādājumu ģeometriskās specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: laukums. 3. daļa: Specificēšanas operatori
77. Mitutoyo. Surface roughness/contour measuring system. Japan: Basic Operation guide No.99MBB745A1, 2019.

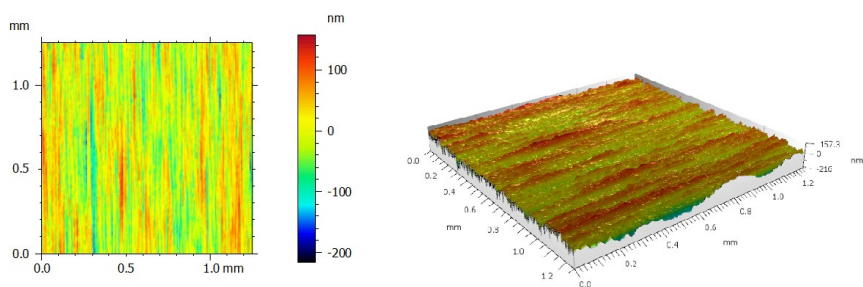
78. McubeMap Ultimate 10. The Analysis software and the Reference guide. Digital Surf: www.digitalsurf.com
79. Li H., Cheung C.F., Jiang X.Q., Lee W.B., To S. A novel robust Gaussian filtering method for the characterization of surface generation in ultra-precision machining. Precision Engineering, Vol. 30, Iss.4, 2006, pp. 421-430.
80. Lou S., Zeng W.H., Jiang X.Q., Scott P.J. Robust filtration techniques in geometrical metrology and their comparison. International Journal of Automation and Computing, Vol.10, 2013, pp. 1-8.
81. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М. Наука. 1970г. 392 с

PIELIKUMI

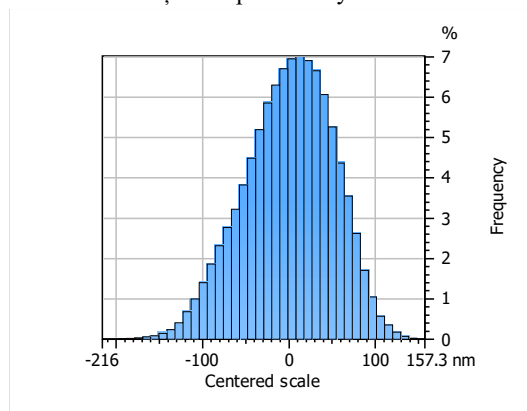
VIRSMAS TOPOGRĀFIJAS DATORAPSTRĀDES ETAPI



1.att. Izejas faila ielādēšana datorapstrādes programmā (paraugs Rugotest 104, N2)



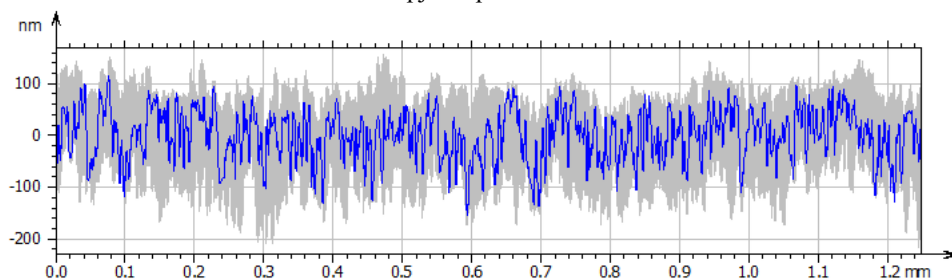
2.att. Virsmas līmeņošana pēc line-by-line + PL1/2 metodes



3.att. Virsmas ordinātu sadalījuma histogrammas ģenerēšana

ISO 25178-2 - Primary surface			
<i>S-filter (λs): None</i>			
<i>F-operation: None</i>			
Height parameters			
Sq	51.24	nm	
Ssk	-0.2779		
Sku	2.776		
Sp	157.3	nm	
Sv	216.0	nm	
Sz	373.4	nm	
Sa	41.44	nm	
Spatial parameters			
Sal	0.009304	mm	
Str	0.02024		
Std	90.77	°	

4.att. Virsmas 3D raupjuma parametru noteikšana

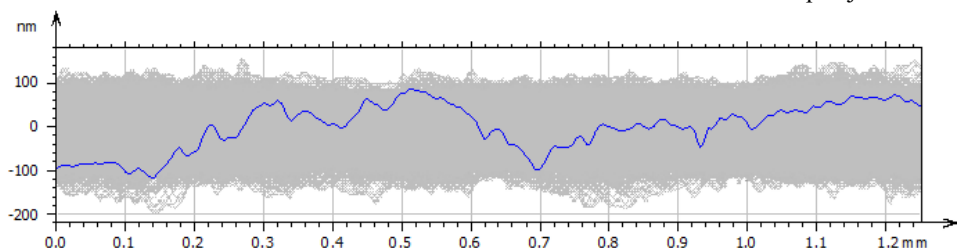


5.att. Virsmas raupjuma profilu izvilksana virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām

	Context		Mean	Min	Max	Values
ISO 21920-Main - Primary						
Height parameters						
Pq	nm		51.18	46.17	56.85	502
Psk			-0.2857	-0.4798	-0.0566	502
Pku			2.746	2.497	3.078	502
Pa	nm		41.44	37.75	45.05	502
Spatial parameters						
Pal	mm	$s = 0.2$	0.01041	0.004813	0.02382	502
Context						
Mean						
Values						
ISO 21920-Feature - Primary						
Feature parameters (element)						
Psm	mm	Thresholds: upper: 10 %, lower: 10 %			0.01697	502

6.att. Profilu raupjuma parametru noteikšana virzienā perpendikulāri apstrādes pēdām

1.Pielikuma turpinājums

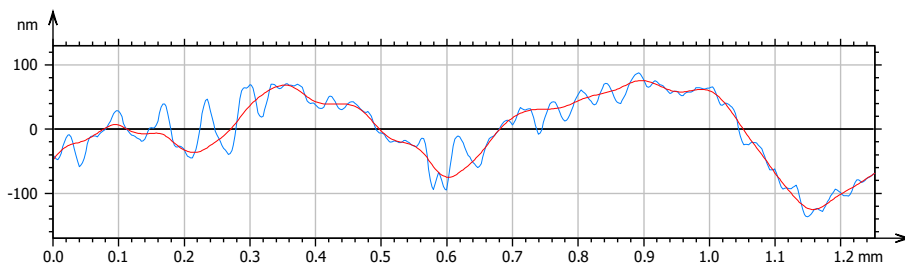


7.att. Virsmas raupjuma profilu izvilkšana virzienā paralēli apstrādes pēdām

		Context	Mean	Min	Max	Values	
ISO 21920-Main - Primary							
<i>S-filter (As): None</i>							
<i>F-operation: None</i>							
Height parameters							
Pq	nm		42.09	15.58	83.34	3201	
Psk			-0.1951	-1.534	1.007	3201	
Pku			2.446	1.382	5.285	3201	
Pa	nm		34.94	12.83	75.78	3201	
Spatial parameters							
Pal	mm	<i>s = 0.2</i>	0.1621	0.02638	0.4598	3201	
		Context	Mean	Values			
ISO 21920-Feature - Primary							
Feature parameters (element)							
Psm	mm	<i>Thresholds: upper: 10 %, lower: 10 %</i>	0.2922	3003			
Psm #1	mm	<i>Thresholds: upper: 20 %, lower: 20 %</i>	0.3927	2706			
Psm #2	mm	<i>Thresholds: upper: 30 %, lower: 30 %</i>	0.4668	2294			
Psm #3	mm	<i>Thresholds: upper: 40 %, lower: 40 %</i>	0.5233	1787			
Psm #4	mm	<i>Thresholds: upper: 50 %, lower: 50 %</i>	0.5459	1324			
Psm #5	mm	<i>Thresholds: upper: 60 %, lower: 60 %</i>	0.5518	853			
Psm #6	mm	<i>Thresholds: upper: 70 %, lower: 70 %</i>	0.5416	474			
Psm #7	mm	<i>Thresholds: upper: 80 %, lower: 80 %</i>	0.5280	183			
Information							
The result could not be calculated on all elements of the series							
Feature parameters (element)							
Wsm	mm	<i>Thresholds: upper: 10 %, lower: 10 %</i>	0.5198	0.1530	1.189	2590	
Information							
The result could not be calculated on all elements of the series							

8.att. Profilu raupjuma parametru noteikšana virzienā paralēli apstrādes pēdām

1. Pielikuma turpinājums



Information	
Profile	Waviness profile (S-F)
Filter settings	Robust Gaussian filter, cut-off 0.0800 mm, Do not cut ends

9.att. Viļņainības profila iegūšana ar datorprogrammas funkciju “Filtered profiles”



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.