

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

Māris KUMERMANIS
Doktora studiju programmas „Ražošanas tehnoloģija” doktorants

**NEREGULĀRA RAKSTURA VIRSMU 3D RAUPJUMA
PARAMETRU PĒTĪJUMI**

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mēraparāti un metroloģija

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
J.RUDZĪTIS

Rīga 2011

UDK 978-9934-10-025-3

Kumermanis M. Neregulāra rakstura
virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi.
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU,
2011.-26 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI institūta
2011.gada 17. marta lēmumu, protokols
Nr.3/11

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektos „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai” un „Mehānisku elementu virsmas un to iekšējās struktūras nanotehnoloģiskie pētījumi mašīnbūvē”.

4. LVS EN ISO 1302:2002 – Produktu ģeometriskās specifikācijas (GPS). Virsmas tekstūras norāde ražojumu tehniskajā dokumentācijā
5. ASME B46.1-2002 Surface texture (surface roughness, waviness, and lay)
6. Blunt L., Jiang X. Advanced techniques for assessment surface topography: Development of a basis for 3D surface texture standards. – USA: Butterworth-Heinemann, 2003. 355 p.
7. Rudzītis J., Krizbergs J., Skurba M. Automated system for three-dimensional roughness testing// Proceedings of the 10th International Conference on Precision Engineering (ICPE), July 18 – 20. - Yokohama, Japan, 2001. – 64 – 72 p.
8. Rudzītis J., Doroshenko R., Haytha R. Accuracy of surface roughness parameters// Proceedings of the X. International Colloquium on Surfaces, Jan. 31 – Feb. 02 - Chemnitz, Germany, 2000. – 102 – 108 p.
9. Stout K.J., Davis E.J., Sullivan P.J. Atlas of machined surfaces. – London: Chapman and Hall, 1993. – 247 p.
10. Stout K.J., Sullivan P.J., Dong W.P., Mainsah E., Luo N. The development of methods for the characterization of roughness in three dimensions. – Great Britain: University of Birmingham Edgbaston, 1993. 360 p.
11. Stout K.J., Blunt L. Three dimensional surface topography. – USA: Butterworth-Heinemann, 2000. 255 p.
12. Whitehouse D.J. Handbook of surface and nanometrology. – UK: Bristol, 2003. 1021 p.
13. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – Москва: Машиностроение, 1981. – 243 с.
14. Демкин Н.Б., Коротков М.А. Топографические характеристики поверхности и точность их определения. Механика и физика контактного взаимодействия. – Калинин: КГУ, 1978. – 146 с.
15. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – Москва: Машиностроение, 1977. – 526 с.
16. Лукьянов В.С., Самбурская Г.Н. Прогрешность измерения характеристик шерховатости поверхности, вызванная нелинейными амплитудами искажениями профиля. Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Рига: РПИ, 1974. - 74 – 81 с.
17. Лукьянов В.С., Самбурская Г.Н. Прогрешность измерения характеристик шерховатости поверхности, вызванная нелинейными амплитудами искажениями профиля. Метрологические и технологические исследования качества поверхности. – Рига: Зинатне, 1976. - 26 – 36 с.
18. Фельдман Я.С. Литмо. О классификации параметров микрогеометрии. Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Рига: РПИ, 1980., 68 – 75 с.
19. Методика выполнения измерений параметров шерховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода МИ 41-75. – Москва, Издательство стандартов, 1975. - 16 с.
20. Рудит Я.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. – Рига: РПИ, 1982. – 101 с.
21. Кризберг Ю.Я. Разработка и исследование метода определения топографических параметров нерегулярной шерховатости поверхности на основе косвенных измерений. – Москва, 1985. - 16 с.

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS
TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 5 jūlijā, pulkst. 10.00 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6K, 405. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Viktors Mironovs
Rīgas Tehniskā Universitāte

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Rein Laaneots
Tallinas Tehniskā Universitāte, Igaunija

Asoc. profesors, Dr.phys Aleksejs Kataševs
Rīgas Tehniskā Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Māris Kumermanis(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, noslēgumu, izmantoto informācijas avotu sarakstu, 3 pielikumus, 39 ilustrācijas, kopā 107 lappuses. Izmantoto informācijas avotu sarakstā ir 43 nosaukumi.

Saturs

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Publikācijas.....	7
Promocijas darba saturs.....	8
1. VIRSMAS RAUPJUMA PĒTĪJUMU APSKATS.....	8
1.1. Virsmas raupjums un raupju virsmu klasifikācija.....	8
1.2. Virsmas raupjuma parametru datu bāzes.....	8
1.3. Parametru noteikšanas precizitāte.....	8
1.4. Parametru mērīšanas metodes un metodikas.....	9
1.5. Galvenie pētījumu virzieni.....	9
2. VIRSMAS 3D RAUPJUMA MĒRĪŠANAS SISTĒMAS ANALĪZE.....	9
2.1. Sistēmas darbības princips - datu punktu skaits.....	9
2.2. Punktu skaita noteikšana izmantojot gadījuma procesu teoriju.....	10
2.3. Punktu skaita noteikšana izmantojot grafisko aproksimāciju.....	12
2.4. Punktu skaits, pie kura stabilizējas parametru vērtības.....	13
2.5. Secinājumi.....	13
3. VIRSMAS (3D) RAUPJUMA TEORĒTISKAIS APRAKSTS.....	14
3.1. Mikrotopogrāfijas vispārējie jēdzieni un modelis.....	14
3.2. Izejas parametri.....	14
3.3. Korelācijas matrica.....	15
3.4. Secinājumi.....	15
4. 3D PARAMETRU NOTEIKŠANA PA VIRSMAS ŠĶĒLUMIEM.....	16
4.1. Izejas dati.....	16
4.2. Sevišķie raupjas virsmas gadījumi.....	17
4.3. Instrukcija 3D parametru aptuvenai noteikšanai.....	17
4.4. Secinājumi.....	18
5. VIRSMAS 3D RAUPJUMA PARAMETRI UN TO NOTEIKŠANAS PRECIZITĀTE.....	18
5.1. Virsmas 3D raupjuma parametri.....	18
5.2. 3D parametru noteikšanas precizitāte.....	18
5.3. Parametru analītiskie un eksperimentālie pētījumi.....	19
5.4. Mērījumu rezultātu statistiskā apstrāde.....	19
5.5. Parametru mērījumu rezultāti dažādi apstrādātām virsmām.....	20
5.5. Secinājumi.....	20
6. VIRSMAS 3D RAUPJUMA PARAMETRU MĒRĪŠANAS INSTRUKCIJA.....	21
7. 3D PARAMETRU DATU BĀZES VEIDOŠANA.....	21
7.1. Datu bāzes veidošanas principi.....	21
7.2. Datu bāzes piemērs plakanslīpētai virsmai.....	22
NOSLĒGUMS.....	25
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	25

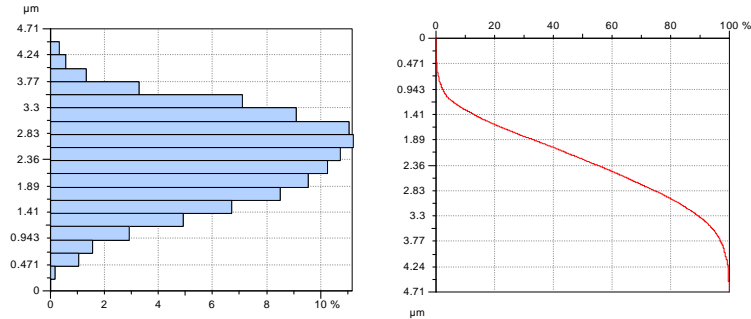
NOSLĒGUMS

Promocijas darbā „Neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi” ir iegūti sekojoši rezultāti:

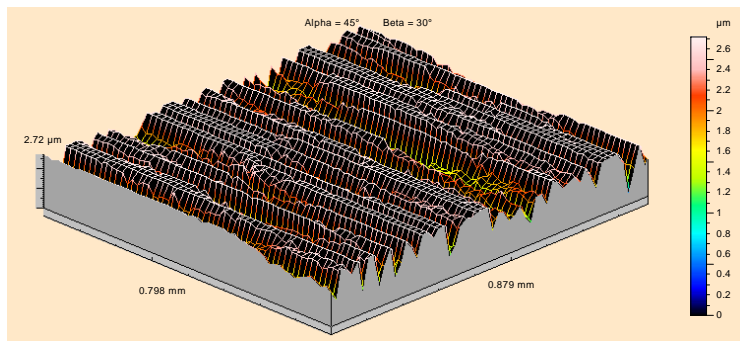
- 1) Veicot literatūras apskatu, konstatēts, ka darba izstrādes laikā pieejamajos informācijas avotos ir daļēji vai nemaz nav pērti būtiski 3D virsmas raupjuma parametru noteikšanas jautājumi. Esošajos standartos ir iekļauti profila parametri un to noteikšanas jautājumi, bet nav informācijas par 3D parametriem un problēmām to noteikšanā. Standarts ISO/DIS 25178 joprojām atrodas izstrādes stadijā.
- 2) Apskatīta 3D mērīšanas sistēma un tās galvenais raksturlielums, ietekmējošs sagaidāmo parametru precizitāti – datu punktu skaits pa abām mērīšanas asīm. Izstrādātas 3 metodes punktu skaita noteikšanai – pēc gadījuma procesu teorijas, grafiskās aproksimācijas metode un punktu skaita, pie kura stabilizējas parametru vērtības noteikšanas metode. Veikts šo metožu salīdzinājums, novērtēta katras metodes precizitāte un izdarīti secinājumi par metožu pielietojamību. Dots ieteicamais punktu skaits dažādiem virsmu apstrādes veidiem.
- 3) Veikti virsmas 3D raupjuma pētījumi, definēts raupjas virsmas raupjuma mirotopogrāfiskais modelis un tā izejas parametri, aprakstot virsmu ar gadījuma lauku teoriju. Apskatīta uz dotā modeļa bāzes izveidotā virsmas 3D raupjums parametru noteikšanas metodika pa virsmas šķēļumiem, veikti secinājumi par tās pielietojamību 3D raupjuma parametru noteikšanai.
- 4) Definēti svarīgākie virsmas 3D raupjuma parametri (nestandarta): Ra_T , H_{max} , M_B , η_w , H , V_u un Sa , St , Sds , Stp , Ssc , $Vm(h)$. Apskatīti to noteikšanas precizitātes jautājumi – mērīšanas laukumiņu un trašu izmēri. Veikts parametru aprēķins pēc šķēļumu metodes un eksperimentāla parametru mērīšana, kā rezultātā var secināt, ka augstāk minētie parametri ir izmantojami virsmu 3D raupjuma raksturošanai. Noteikti parametru izmantošanas nosacījumi.
- 5) Parametru Sa un Ra eksperimentālajos mērījumos secināts, ka 3D raupjuma parametri ir stabilāki par profila parametriem, tiem ir mazāka relatīvā kļūda (vidēji ap 5%) un tai ir tendence samazināties, palielinot mērīšanas laukuma izmērus. Profila parametru relatīvās kļūdas ir lielākas par 5%, tās nav atkarīgas no mērīšanas trases garuma.
- 6) Izstrādāta virsmas 3D raupjuma parametru mērīšanas metodika izmantojot kontakta tipa mēriekārtas.
- 7) Apskatīti virsmas 3D raupjuma parametru datu bāzes veidošanas principi un tās saturs. Izstrādāts datu bāzes piemērs plakanslīpētai virsmai.

IMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

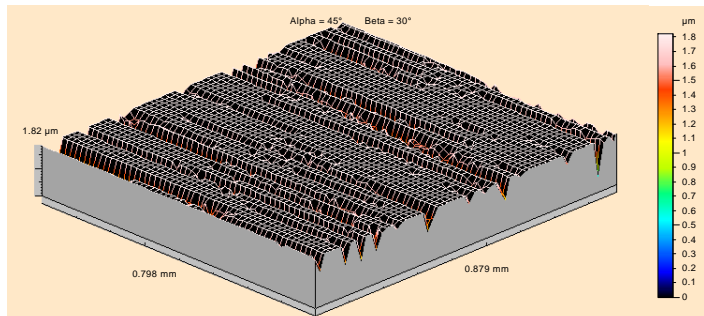
1. LVS EN ISO 12085:1997 – Ģeometrisko produktu specifikācijas. Virsmas tekstūra. Profila metode. Zīmējuma parametri
3. LVS EN ISO 4288:1997 – Ģeometrisko produktu specifikācijas. Virsmas struktūra. Profila metode. Noteikumi un procedūras virsmas struktūras novērtējumam
2. LVS EN ISO 4287:1998 – Ģeometrisko produktu specifikācijas. Virsmas struktūra. Profila metode. Termini, definīcijas un virsmas struktūras parametri



7.3. att. Plakanslīpētas virsmas sadalījums pēc augstuma un virsmas atbalsta līkne



7.4. att. Plakanslīpēta virsma ar 30% nogriezumā no augstākās virsotnes



7.5. att. Plakanslīpēta virsma ar 70% nogriezumā no augstākās virsotnes

Tēmas aktualitāte

Mūsdienu ražošanā ir nepieciešams pilnvērtīgs virsmas raupjuma novērtējums, apskatot virsmu kā telpisku objektu. Promocijas darbā „Neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi” ir veikti dažādi apstrādātu virsmu raupjuma pētījumi, kā arī izstrādāta virsmas raupjuma mērīšanas metodika mērīšanai ar kontakta tipa mēraparātiem, bāzēta uz gadījuma lauku teoriju. Izstrādāti virsmas 3D raupjuma parametru datu bāzes veidošanas principi.

Pašlaik nav ticamu datu par virsmas raupjuma 3D parametru mērījumiem. Nav definēta vienota pieeja un metodika virsmas 3D raupjuma novērtēšanai izmantojot kontakta tipa mērīšanas metodes. Uz doto brīdi nav apstiprinātu standartu par virsmas 3D raupjuma jautājumiem. Tāpēc ir nepieciešama šo problēmu pētīšana.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt virsmas 3D raupjuma parametru mērīšanas metodiku un izstrādāt neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru datu bāzes veidošanas principus.

Ievērojot iepriekš rakstīto ir izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- 1) Sagatavot pētījumu teorētisko bāzi, pielietojot gadījuma lauku teoriju.
- 2) Izpētīt tādus svarīgus 3D parametru mērīšanas raksturlielumus kā nepieciešamais punktu skaits, mērīšanas laukumu izmēri un to skaits uz pētāmās virsmas.
- 3) Veikt eksperimentus analītisko sakarību pārbaudei.
- 4) Noteikt virsmas raupjuma raksturojošos 3D parametrus, veikt to analītiskus un eksperimentālus pētījumus.
- 5) Sagatavot mērīšanas metodiku.
- 6) Izstrādāt 3D raupjuma parametru datu bāzes veidošanas principus precīzi apstrādātām un pārklātām virsmām.

Pētījumu metodika

Neregulāra rakstura virsmas raupjuma modeļu un teorētiskajiem pētījumiem tika izmantotas gadījuma procesu un lauku teorijas. Eksperimentālie pētījumi tikai veikti ar Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50 un Surtronic 25 mērīšanas iekārtām, un TalyMap Expert mērījumu datu apstrādes programmu. Eksperimentu rezultātu apstrādei izmantotas matemātiskās statistikas metodes un datorprogrammas MatCAD, Graph un AutoCAD.

Zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti

Darba zinātniskā novitāte un rezultāti ir:

- 1) Neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma mērīšanas metodika kontakta tipa mēriekārtām.
- 2) Virsmas 3D raupjuma parametru noteikšanas pa šķēlumiem (netiešo mērījumu) metodes pilnveidošana.
- 3) 3D raupjuma parametru precizitātes pētījums – mērījumam nepieciešamā datu punktu skaita noteikšana.

- 4) Dažādi apstrādātu un pārklātu virsmu 3D raupjuma parametru datu bāzes veidošanas principi, un plakanslīpētas virsmas piemērs.

Praktiskais pielietojums

Pētījumi, veikti dotajā promocijas darbā „Neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi” ļauj novērtēt dažādu cietu ķermeņu virsmu 3D raupjuma parametrus kā mikro, tā nano līmeņos. Izstrādātie virsmas raupjuma 3D parametru datu bāzes veidošanas principi un piemērs plakanslīpētām virsmām dos informāciju par sagaidāmo virsmas raupjumu un tā parametriem plakanslīpētām virsmām. Tālāka datu bāzes papildināšana dos informāciju par citiem apstrādes veidiem un sagaidāmo virsmas raupjumu, un otrādi – pēc nepieciešamajiem virsmas raupjuma parametriem būs iespējams aptuveni noteikt virsmas apstrādes metodi.

Autors aizstāv šajā darbā

- 1) Neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru mērīšanas metodiku.
- 2) Virsmas 3D raupjuma parametru noteikšanas pa šķēlumiem metodes pilnveidošanu.
- 3) Mērījumam nepieciešamā punktu skaita noteikšanas paņēmienus.
- 4) Apstrādātu virsmu 3D raupjuma parametru datu bāzes veidošanas principus.

Darba aprobācija

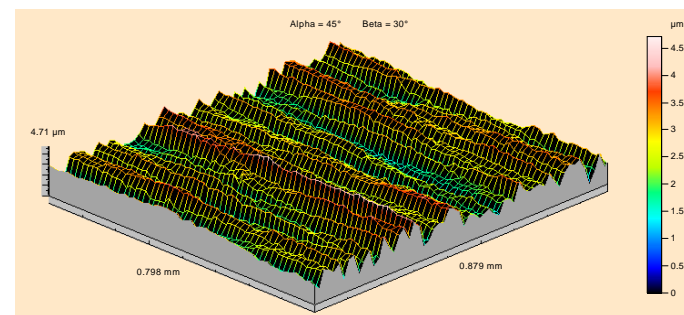
Par galvenajiem promocijas darba rezultātiem ziņots sekojošās konferencēs un semināros, saņemot atzinīgus novērtējumus:

Latvijā:

- Rīgas Tehniskās universitātes 48. starptautiskā zinātniskā konference, 11.10. – 13.10.2007
- Rīgas Tehniskās universitātes 48. starptautiskā zinātniskā konference, 13.10. – 15.10.2008
- Rīgas Tehniskās universitātes 48. starptautiskā zinātniskā konference, 12.10. – 16.10.2009
- 6th International Scientific Conference „Engineering for Rural Development”, 24.05 – 25.05.2007, Latvija, Jelgava
- RTU Mehānikas institūta un LNMK apvienotais seminārs, 18.05.2010, Latvija, Rīga

Ārvalstīs:

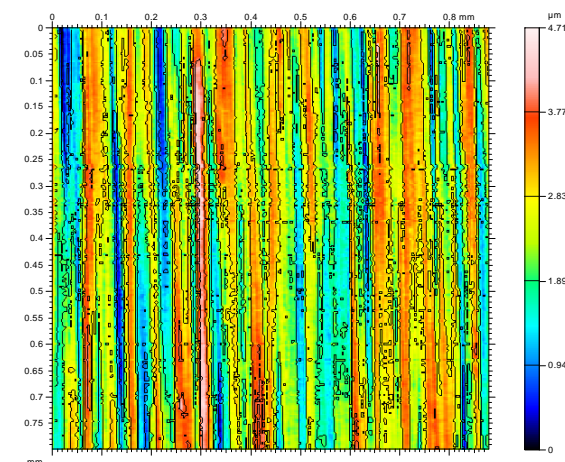
- 7th International Conference european society for precision engineering and nanotechnology, 20.05 – 24.05.2007, Bremen, Germany
- 11th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2007, 05.09 – 09.09.2007, Hammamet, Tunisia
- XII. International Colloquium on Surfaces, 28.01 – 29.01.2008, Chemnitz, Germany
- 10th Anniversary International Conference european society for precision engineering and nanotechnology, 18.05 – 22.05.2008, Zurich, Switzerland



7.1. att. Plakanslīpēta virsma aksonometriskajā projekcijā

7.1. tabula

Slīpētas virsmas 3D raupjuma parametri		
Parametrs	Vērtība	Piezīmes
Sa	0.628 μm	
St	4.71 μm	
STp	2.9%	Pie līmeņa 1 μm zem augstākās virsotnes
Sds	3903 pks/mm ²	Tikai informatīviem nolūkiem
Ssc	0.0279 l/ μm	
Vm	0.00241 mm ³ /mm ²	Pie līmeņa 0.01 % zem augstākās virsotnes



7.2.att. Plakanslīpētas virsmas kontūrkarte

ieskatu apstrādes procesa problēmās, kuras būtiski ietekmē sagaidāmo virsmas raupjumu, piemēram: deformācijas, siltuma procesi u.t.t.

2) Parametriskā informācija. Apskatīsim virsmas raupjuma parametrus, ar kādiem varētu raksturot konkrēto virsmu. Vispārējā gadījumā izmantosim sekojošus raupjuma 3D un 2D parametrus:

Sa – vidējā aritmētiskā novirze absolūtās vienībās virs un zem vidusplaknes, raksturojoša virsmas mikrotopogrāfijas īpašības augstumā (amplitūdas parametrs). Mērvienība – mikrometrs.

St – virsmas kopējais augstums. Tas ir augstums starp visaugstāko virsotni un visdziļāko ieplaku. Mērvienība – mikrometrs.

Sds – virsotņu blīvums. Telpiskais parametrs. Mērvienība - virsotņu skaits/mm². Punkts tiek uzskatīts kā virsotne, ja tas ir augstāks nekā 8 blakus esošie punkti.

Stp – atbalsta indekss uzdotajā dziļumā. Pieder pie tilpuma parametru grupas. Mērvienība – procenti.

Ssc – vidējais aritmētiskais virsotņu izliekums. Pieder pie hibrīda parametriem. Mērvienība – 1/mikrometri.

Vm(h) – materiāla tilpums dziļumā h. Pieder pie funkcionālo parametru grupas. Mērvienība – mm³/mm².

Ra – vidējā aritmētiskā novirze profilam. Mērvienība – mikrometrs.

RSm – nelīdzenumu vidējais solis. Mērvienība – milimetri.

3) Vizuālā informācija. Datu bāzē tiks iekļauta arī vizuālā informācija par virsmas raupjumu, tāda kā:

- virsmas aksonometriskā projekcija, parādoša virsmas raupjuma struktūru un apstrādes pēdu virzienu;
- virsmas kontūrkarte – virsmas 2D attēlojums, ar informāciju par virsmas negludumu augstumu;
- virsmas korelācijas funkcija, parādoša sakaru starp virsmas raupjuma punktiem;
- virsmas sadalījuma pēc augstuma histogramma un virsmas atbalsta līkne;
- profilogrammas pa galvenajiem virsmas nelīdzenumu virzieniem ar profila parametriem;
- informācija par dilšanas procesa galvenajām stadijām: virsmu pēc piestrādes un virsmu pirms katastrofālās dilšanas.

7.2. Datu bāzes piemērs plakanslīpētai virsmai

Datu bāzes piemērā plakanslīpētai virsmai dots ieskatš slīpēšanas procesa būtībā. Apskatīti slīpēšanas veidi un paņēmieni. Apskatītas problēmas, ietekmējošas sagaidāmo virsmas raupjumu, tādas kā slīpgraudu ģeometrija, siltuma procesi u.t.t. Doti plakanslīpētas virsmas raupjuma parauga Rugotest 107 Ra 1.6 mērījumu rezultāti vizuālā un parametriskā veidā, piemēram:

- 4th International Conference „Mechatronic Systems and Materials” MSM 2008, 14.07 – 17.07.2008, Bialystok, Poland
- 9th International Conference of the european society for precision engineering and nanotechnology, 02.06 – 05.06.2009, San Sebastian, Spain

Publikācijas

Veikto pētījumu rezultāti publicēti deviņos zinātniskajos rakstos:

1. Rudzītis J., Kumermanis M. Determination of surface roughness microtopographical parameters on method of indirect measuring// Proceedings of 7th International Conference european society for precision engineering and nanotechnology. - Bremen, Germany, 2007. – pp. 313-316.
2. Ruzītis J., Kumermanis M. Design of machine details and surface roughness// Proceedings of 6th International Scientific Conference „Engineering for Rural Development”. – Jelgava: Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, 2007. – pp. 214-215.
3. Kumermanis M., Rudzītis J. Surface roughness and design of machine details// Proceedings of 11th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2007. – Tunisia, Hammamet, 2007. – pp. 551-553.
4. Kumermanis M., Rudzītis J. Simple method of surface roughness microtopographical parameters determination// Proceedings of XII. International Colloquium on Surfaces. – Chemnitz, Germany, 2008 – pp. 163-166.
5. Kumermanis M., Rudzītis J. Accuracy of surface roughness parameters determination// Proceedings of 10th Anniversary International Conference european society for precision engineering and nanotechnology. – Zurich, Switzerland, 2008 – pp. 285-289.
6. Kumermanis M., Rudzītis J. Microtopography model of rough surface// Proceeding of 4th International Conference „Mechatronic Systems and Materials” MSM 2008. – Bialystok, Poland, 2008 – pp. 222.
7. Kumermanis M., Rudzītis J. Microtopography model of rough surface// ISSN 1012-0394. Solid State Phenomena Vols. 147-149. – Trans Tech Publications, Switzerland, 2009 – pp. 686-689.
8. Kumermanis M., Rudzītis J., Torims T., Determination of 3D surface roughness parameters by using cross-section methods// Proceedings of 9th International Conference of the european society for precision engineering and nanotechnology. – San Sebastian, Spain, 2009 – pp. 319-322.
9. Rudzītis J., Krizbergs J., Odišis I., Torims T., Kumermanis M., Muiznieks G., Strazdina I. Determination of 3D surface roughness parameters by using cross-section methods// ISSN 1407-8015. Scientific Journal of Riga Technical University, Transport and Engineering. – 6.sērija – 31 sējums – Rīga: RTU izdevniecība, 2009. – 71.-74. lpp.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, secinājumus, izmantoto informācijas avotu sarakstu (43 avoti), 3 pielikumus, 39 attēlus, 35 tabulas, kopā 107 lapaspuses.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Ievads

Dažādu cietu ķermeņu virsmas kvalitātes novērtēšanai mūsdienās vairs nepietiek ar profila jeb divu dimensiju (2D) mērīšanas metodēm. Ir nepieciešams izmantot metodes, bāzētas uz virsmas telpisku (3D) aprakstu.

1. nodaļa. VIRSMAS RAUPJUMA PĒTĪJUMU APSKATS

1.1. Virsmas raupjums un raupju virsmu klasifikācija

Apskatītas virsmas mikrotopogrāfijas definīcijas. Kas vispār ir virsmas raupjums, ko mēs ar to saprotam? Veikta virsmas raupjuma klasifikācija pēc gadījuma teorijas. Doti piemēri dažādi apstrādātu virsmu 3D raupjumam.

1.2. Virsmas raupjuma parametru datu bāzes

Lai sekmīgi raksturotu virsmas raupjumu, nepietiek to raksturot ar vienu parametru (tradicionāli Ra – profila vidējo aritmētisko novirzi). Ir nepieciešama kompleksa virsmas raksturošana, izmantojot parametru grupas. Raksturošanas uzskatāmībai tiek izmantotas raupjuma parametru datu bāzes. Analizējot eksistējošās parametru datu bāzes [15, 13, 20, 1, 2, 3, 4, 9, 10, 7, 18, 5] varam secināt, ka nav vienotas pieejas dažādi apstrādātu virsmu raksturošanai. Daudzas no datu bāzēm ir morāli novecojušas, sastādītas izmantojot mūsdienām neatbilstošas mērīšanas iekārtas. Parametru vērtībām piemīt samērā lielas izkliedes viena apstrādes veida robežās. Līdz ar to ir nepieciešams izveidot vizuāli uzskatāmu, mūsdienīgu dažādi apstrādātu virsmu 3D raupjuma parametru datu bāzi, izmantojot mūsdienu mērīšanas iekārtas, iekļaujot tajā gan profila, gan virsmas raupjuma parametrus.

1.3. Parametru noteikšanas precizitāte

Mērot virsmas 3D raupjumu, līdzīgi kā jebkuros citos mērījumos, ir ļoti svarīgi zināt rezultātu, šajā gadījumā, virsmas raupjuma parametru noteikšanas precizitāti. Zem šī termina saprotam mērījumu skaitu, kas nodrošina parametra vērtības iegūšanu ar iepriekš uzdoto parametra kļūdu un ar noteiktu ticamības varbūtību. Virsmas raupjuma parametru precizitātes jautājumi ir visai maz pētīti [15, 14, 16, 27, 8]. Tā kā parametru noteikšanas precizitāti ietekmē ļoti daudz iekšējo un ārējo faktoru, tad pārsvarā tiek pētīta tikai atsevišķu faktoru vai to grupu ietekme uz mērījumu rezultātu precizitāti. Veiktajiem precizitātes pētījumiem ir visai ierobežota pielietojamība, tie ir piesaistīti konkrētām mērīšanas iekārtām vai virsmu grupām. Tomēr daži no pētījumu virzieniem ir derīgi tālākai to pilnveidošanai izmantojot mūsdienīgas iekārtas un datu apstrādes programmatūru.

novērojamas atkāpes no teorētiski sagaidāmās, kas izskaidrojams ar reālo virsmu nevienādabīgumu.

6. nodaļa. 3D PARAMETRU MĒRĪŠANAS INSTRUKCIJA

- 1) Sagatavo mēriekārtu 2D (profila) mērījumiem.
- 2) Mērāmo detaļu novieto uz mēriekārtas galdīņa tā, lai mērāmās virsmas apstrādes pēdu galvenais virziens (ja tāds ir redzams) būtu perpendikulārs mērīšanas virzienam (iekārtas galvenajai asij). Ja virsmai nav izteikta dominējošā apstrādes pēdu virziena, tad virsmas orientācija var būt brīva.
- 3) Ja nav zināms mērāmās virsmas raupjuma parametrs Ra vai RSm , tad to nosaka aptuveni - vizuāli vai pēc kādas citas metodes. Ja ir zināms, tad pāriet pie punkta 7.
- 4) Pēc zināmā vai aptuveni noteiktā parametra Ra vai RSm , saskaņā ar standartu, piemēram, ISO 4288:1996 vai citu, nosaka mērījuma bāzes garumu l un mērīšanas trases garumu L .
- 5) Veic izmēģinājuma mērījumu, nosakot parametra Ra vai RSm vērtību.
- 6) Pārbauda vai iegūtā Ra vai RSm vērtība atbilst punktā 4 minētajām prasībām. Ja neatbilst, tad atgriežas pie punkta 3, ja atbilst pāriet pie nākamā punkta.
- 7) Veic profila mērījumu, nosakot parametra RSm vērtību.
- 8) Nosaka vidējo raupjuma soļu skaitu bāzes garumā:

$$N_l = \frac{l}{RSm}$$

- 9) Reizina iegūto soļu skaitu bāzes garumā N_l ar attiecīgai virsmai noteikto punktu skaitu, iegūstot virsmas 3D raupjuma parametru mērījumam nepieciešamo punktu skaitu pa abām asīm.
- 10) Sagatavo mēriekārtu virsmas topogrāfijas mērīšanai. Iestāda mērīšanas laukuma izmērus un punktu skaitu pa asīm. Veic mērījumus.
- 11) Datu apstrādes programmā, piemēram, TalyMap Expert, atver iegūto mērījuma rezultātu failu un veic nepieciešamās darbības, tādas kā virsmas līmeņošanu, formas atdalīšanu, filtrēšanu, parametru izvēli u.t.t.

7. nodaļa. 3D PARAMETRU DATU BĀZES VEIDOŠANA

7.1. Datu bāzes veidošanas principi

Pētot un raksturojot virsmu 3D raupjumu, izmantojot mūsdienu mērīšanas iekārtas, piemēram, Taylor Hobson Intra 50, ir praktiski neierobežotas iespējas virsmas raksturošanai gan parametriski, gan vizuāli. Bet, kā jau minēts iepriekš, dažādas virsmas nevar raksturot ar vieniem un tiem pašiem parametriem.

Līdz ar to, informāciju par virsmām un to raupjumu vēlams apkopot pēc zināmas sistēmas (algoritma). Šo jautājumu var risināt ar datu bāzes palīdzību, kurā būtu veikts virsmu iedalījums pēc radniecīgas struktūras un katrai virsmu grupai dodot tikai tai raksturīgu informāciju par raupjumu.

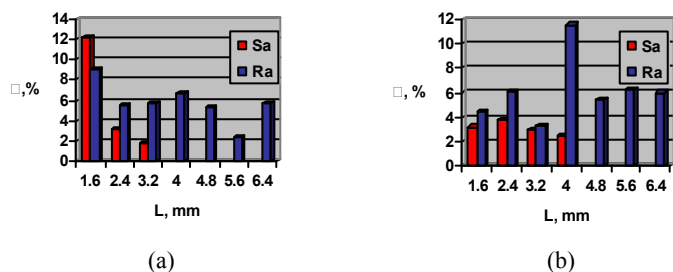
Datu bāzes saturs vispārīgā gadījumā:

- 1) Apstrādes procesa raksturojums. Veiksim īsu konkrētā virsmas apstrādes procesa raksturojumu: kādi instrumenti tiek pielietoti, kādi darbagaldi. Apskatīsim raksturīgākos apstrādes procesa parametrus un sagaidāmo virsmas kvalitāti (raupjumu). Kā arī dosim īsu

materiāls ir ar ierobežotu apjomu, divi – trīs desmiti mērījumu, bieži vēl mazāk. Tas parasti ir saistīts ar eksperimentu dārdzību un sarežģītību. Tāds ierobežots materiāls ir nepietiekams, lai atrastu iepriekš nezināmo gadījuma lieluma sadalījuma likumu. Bet tomēr šo materiālu var izmantot un apstrādāt, lai iegūtu zināmu informāciju par gadījuma lielumu. Piemēram, uz ierobežota statistiskā materiāla pamata var noteikt, kaut vai orientējoši, galvenos gadījuma lieluma skaitliskos raksturojumus: matemātiski sagaidāmās vērtības, dispersijas, dažreiz – augstākos momentus. Praksē bieži gadās, ka sadalījuma likuma veids ir iepriekš zināms, bet atliek tikai atrast tikai dažus parametrus, no kuriem tas ir atkarīgs. Piemēram, ja iepriekš ir zināms, ka gadījuma lielums sadalās pēc normālā likuma, tad datu apstrādes uzdevums noved pie divu tā parametru m – matemātiski sagaidāmās vērtības un σ – vidējās kvadrātiskās novirzes noteikšanas.

5.5. Parametru mērījumu rezultāti dažādi apstrādātām virsmām

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt 5.2. nodaļā minētās teorētiskās sakarības profila parametra Ra un 3D parametra Sa noteikšanas precizitātei (mērījumu skaitam). Veikti profila Ra mērījumi pie dažādiem mērīšanas trašu L garumiem un virsmas Sa mērījumi pie dažādiem kvadrātveida mērīšanas laukuma malas L izmēriem.



5.2. att. Sa un Ra relatīvā kļūda pie dažādām L vērtībām plakanslīpētai (a) un virsmai apstrādātai ar elektrodzirkstelēm (b).

Rezultāti apstrādāti saskaņā ar 5.4. nodaļu. Meklēta parametru relatīvā kļūda ε_β mazāka par 5%, pie ticamības varbūtības $\beta = 0.90$. 5.2. att. parādīti rezultāti plakanslīpētai un virsmai, apstrādātai ar elektrodzirkstelēm. Pa horizontālo asi atlikts lielums L , kas Ra gadījumā apzīmē mērīšanas trases garumu, bet Sa gadījumā kvadrātveida bāzes laukuma malas izmēru. Pa vertikālo asi atlikta relatīvās kļūdas ε_β vērtības procentos.

5.6. Secinājumi

Definēti galvenie 3D raupjuma parametri, to noteikšana izmantojot raupjas virsmas mikropogrāfisko modeli un 3D raupjuma parametru noteikšanas pa virsmas šķēļumiem metodi. Apskatīts arī kā 3D parametrus definē Taylor Hobson mērīšanas sistēmas izstrādātāji. Veikts šo parametru analītiski - eksperimentāls salīdzinājums, kā rezultātā secināts, ka parametru vērtības uzrāda labu sakrītību un parametri ir pielietojami virsmu raupjuma raksturošanai. 3D parametru noteikšanas precizitātes pētīšana parāda, ka ir

1.4. Parametru mērīšanas metodes un metodikas

Ir virkne dažādu metožu, derīgu virsmas mikropogrāfijas mērīšanai, katra izmantojoša citu darbības principu mijiedarbībā ar virsmu. Visas metodes var iedalīt četrās kategorijās:

- elektroniskā tipa instrumenti;
- optiskā tipa instrumenti;
- vizuālās vai taustes metodes;
- skenējošās zondāžas metodes.

Neviena no šīm metodēm nav universāla, derīga visu virsmu adekvātam novērtējumam. Metodes savā starp atšķiras ne tikai ar darbības principu, bet arī ar izšķirtspēju, mērījumam nepieciešamo laiku, iekārtas izmēriem, izmaksām un prasībām pret apkalpojošo personālu, u.t.t. Mērījumu rezultātu izklādes, mērot vienu un to pašu virsmu ar dažādām metodēm var sasniegt pat 80%.

Kad ir izvēlēta konkrētā mērīšanas metode (mēriekārta), ir nepieciešama metodika, pēc kuras veikt mērījumus, lai iegūtu reālus virsmas 3D raupjuma parametrus. Līdzīgi kā iepriekšējos pētījumu apskata virzienos, arī šajā gadījumā ir novērojamas būtiskas atšķirības starp dažādām mērīšanas metodikām [19, 10, 15]. Ja profila mērījumu metodikas ir noteiktas standartos, tad 3D parametru mērīšana nav apskatīta nevienu no oficiālajiem standartiem. Patreizējās 3D parametru noteikšanas metodikas ir atvasinātas no profila parametru metodikām. Nav skaidri definēta un pamatota tādu būtiska mērījumu parametra kā, piemēram, datu punktu skaita izvēle.

1.5. Galvenie pētījumu virzieni

Veiktais pētījumu un literatūras apskats parāda, ka nav vienotas pieejas virsmas 3D raupjuma parametru novērtēšanai izmantojot kontakta metodes, novērojamas būtiskas atšķirības starp standartu un pētnieku piedāvātajām mērīšanas metodikām. Daudziem 3D raupjuma parametriem trūkst vai ir nepilnīgas to definīcijas, nav skaidra to nozīmē un pielietojamība virsmas raupjuma novērtēšanā.

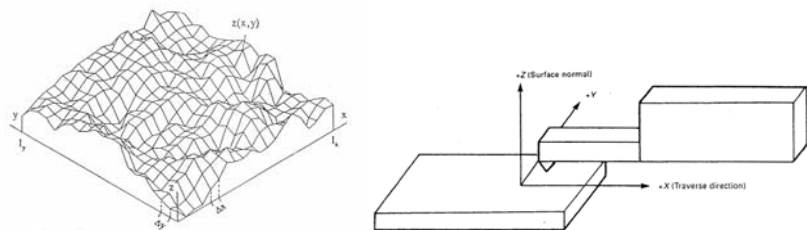
Ievērojot iepriekš rakstīto, tiek izvirzīti sekojoši galvenie pētījumu virzieni:

- 3D virsmas raupjuma parametru mērīšanas metodikas izstrāde un eksperimentāla tās pārbaude;
- 3D parametru noteikšana, to analītisks un eksperimentāls novērtējums;
- Izstrādātās metodikas pielietošana cietu ķermeņu virsmu un nanopāklājumu 3D raupjuma pētījumos;
- Mērījumu rezultātu apkopošana virsmas 3D raupjuma parametru datu bāzē.

2. nodaļa. VIRSMAS 3D RAUPJUMA MĒRĪŠANAS SISTĒMAS ANALĪZE

2.1. Sistēmas darbības princips - datu punktu skaits

Mērot virsmas topogrāfiju izmantojot profilēšanas metodes mēraparātus, mērāmais apgabals tiek uzdots taisnstūra laukuma veidā, orientēts pa X un Y asīm [10]. Mērīšanas procesā ir jāsavāc noteikts skaits profilu, paralēlu parauga galvenajai asij (parasti tā ir X ass), ar noteiktu intervālu (2.1. att.). Mērāmo virsmu mērīšanas procesā jānovieto tā, lai X ass būtu perpendikulāra apstrādes pēdām. Pa X asi tiek uzdoti datu punkti un to skaita izvēle ir galvenais uzdevums ticamu datu iegūšanai.



2.1. att. 3D mērišanas sistēma

Datu punktu skaits būtiski ietekmē mērijumu rezultātus, pārāk mazs punktu skaits noved pie neprecīziem rezultātiem, savukārt pārāk liels to skaits palielina negludumu detalizāciju un mērijumam nepieciešamo laiku, nedodot būtisku informācijas pieaugumu.

Ievērojot iepriekš rakstīto, tiks veikti trīs eksperimenti ar mērķi noteikt optimālo datu punktu skaitu. Tiks pētīti sekojošu virsmas apstrādes veidu etaloni, visvairāk atbilstoši neregulāra rakstura virsmas raupjumam:

- Plakanslīpēšana – Rugotest 104 (ISO/DIS – 2632);
- Elektroerozija – Rugotest 107 (ISO/DIS – 2632);
- Apšaušana ar skrotīm – Rugotest 3 (ISO/DIS – 2632).

2.2. Punktu skaita noteikšana izmantojot gadījuma procesu teoriju

Virsmas ģeometriskais apraksts ir samērā sarežģīts, jo virsmas nelīdzenumi ir izvietoti dažādos augstumos un tiem piemīt gadījuma konfigurācija. Šīs problēmas risināšanai ir jāizmanto kāds no matemātiskajiem modeļiem. Eksistē daudz dažādu virsmas modeļu. Ir zināmi raupjuma modeļi, pieņemot nelīdzenumu veidu ģeometrisku elementu formā – sfēru, konusu, nošķeltu konusu, elipsoīdu, cilindru, prizmu u.t.t. Bet reālajiem negludumiem ir būtiskas novirzes un to raksturs ir neregulārs.

Ir pierādīts [20], ka gadījuma funkcijas vispilnīgāk apraksta neregulāra rakstura virsmu raupjumu, jo bez negludumu augstuma, tās ievēro arī likumsakarības garenvirzienā. Raupjas virsmas profilu var aprakstīt ar normālu stacionāru gadījuma procesu $h(x)$, kura korelācijas funkcija $K(\tau)$ ir nepārtraukta un tai ir nepārtraukti atvasinājumi (τ - attālums pa abscisu asi starp profila punktiem). Zinot procesa korelācijas funkciju

$$K(\tau) = \sigma^2 \rho(\tau), \quad (2.1)$$

kur σ – gadījuma procesa $h(x)$ vidējā kvadrātiskā novirze;

$\rho(\tau)$ – normētā korelācijas funkcija ($0 \leq \rho(\tau) \leq 1$)

var izdarīt secinājumu, ka pamatinformāciju par raupjuma varbūtīgajām īpašībām dotajam modelim augstumā satur tikai viens parametrs σ , kuru dotā modeļa apstākļos var nomainīt ar vienkāršāku parametru – profila vidējo aritmētisko novirzi Ra .

Vispārējā gadījumā korelācijas funkcijas izvēlei var tikt izmantoti dažādi kritēriji, šeit apskatīsim tikai vienu metodi – korelācijas funkcijas ekspress novērtējumu, balstītu uz īpašo profila punktu izmantošanu (2.2. att.). Pie tiem pieder krustojumi ar viduslīniju $n(0)$, profila maksimumi m un pārliekumi s .

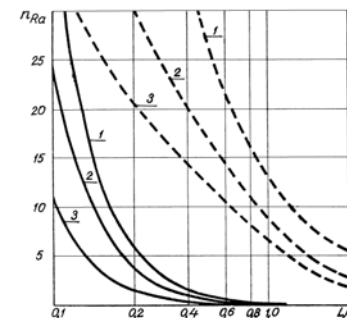
Izotropā raupjuma gadījumā ($c = 1$) iegūstam:

$$n_{Ra_T} = \frac{\pi \alpha_\beta^2}{4 \varepsilon^2 \alpha_1 L^2}, \quad (5.2)$$

Veicot formulas (5.2) un salīdzināšanu ar mērijumu skaitu, nepieciešamu profila Ra mērijšanai [20], iegūsim

$$\frac{n_{Ra_T}}{n_{Ra}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 L}} \quad (5.3)$$

No (5.3) izriet, ka pie dotajiem 3D parametru mērijšanas nosacījumiem nepieciešams vismaz 8 reizes mazāk mērijumu. Tādā veidā, ja Ra profilam nepieciešama mērijšanas trase, sastāvoša no vismaz 8 bāzes garumiem, tad Ra_T virsmai pietiek tikai ar vienu mērijumu kvadrātveida laukumā ar malu garumiem vienādiem ar bāzes garumiem (skatīt 5.1. att.).



5.1. att. Parametru Ra un Ra_T mērijumu skaits pie Ra ($\varepsilon = 0.05$; $\beta = 0.9$):

- 1 - Ra 2,51 μm ; 2 - Ra 0,98 μm ; 3 - Ra 0,56 μm .
- (--- profilam; ___ virsmai)

Tāda 3D parametra stabilitāte ir viegli izskaidrojama: Ra_T laukumam dod vairāk informācijas salīdzinot ar vienu trasi Ra gadījumā.

5.3. 3D parametru analītiskie un eksperimentālie pētījumi

Veikti 5.1. nodaļā uzskaitīto parametru pētījumi. Pēc 4.3. nodaļā minētās instrukcijas aprēķinātas parametru Ra_T , H_{max} , M_B , η_u , H , V_u vērtības un salīdzinātas ar tiem atbilstošo, izmērīto parametru Sa , St , Sds , Stp , Ssc , $Vm(h)$ vērtībām ar mērķi novērtēt parametru derīgumu virsmu 3D raupjuma novērtēšanai.

Kopumā rezultātu atbilstība vērtējam kā laba, izņemot virsotņu skaita parametru M_B un Sds . Šajā gadījumā problēma ir virsotnes definīcijā. Kā rāda darbi [10, 14, 17, 12], tad virsotne tiek definēta dažādi un starp šīm definīcijām ir novērojamas būtiskas atšķirības. Tādēļ šajā gadījumā parametru M_B un Sds jāinterpretē tikai kā informatīvus.

5.4. Mērijumu rezultātu statistiskā apstrāde

Lai atrastu gadījuma lieluma sadalījuma likumu, ir jāizmanto samērā plašs statistiskais materiāls, bieži vairāku simtu mērijumu apjomā. Tomēr praksē šis statistiskais

4.4. Secinājumi

Veiktā virsmas raupjuma analīze parāda, ka principā jebkura tipa virsmai var norādīt 3D parametru izejas datu sistēmu un metodiku to noteikšanai, izmantojot virsmas šķēlumus. Tomēr tas ir pilnā mērā jūtams tikai pamatā virsmām ar neregulāra rakstura nelīdzenumiem, aptuveni aprakstāmām ar normāliem gadījuma laukiem. Tādā gadījumā izejas datu sistēmu veido viens augstuma (σ) un divi šķēluma soļa parametri (n , m), kuri atkarībā no virsmas tipa var tikt noteikti pēc pieciem, trim, diviem vai vienu virsmas šķēlumu.

Pašu 3D parametru noteikšanas metodi var nosaukt par aprēķinu-eksperimentālu, jo pēc šķēlumu parametriem, atrastiem eksperimentālā ceļā, tiek aprēķināti izejas parametri, pēc kuriem savukārt tiek noteikti meklējamie virsmas 3D raupjuma parametri, raksturojoši nelīdzenumu augstumu, soli vai formu.

5. nodaļa. 3D PARAMETRI UN TO NOTEIKŠANAS PRECIZITĀTE

5.1. 3D parametri

Ir radīti daudz dažādi virsmas 3D raupjuma parametri, bet neviens no tiem nevar vispusīgi un precīzi definēt jebkuras virsmas mikrotopogrāfiju. Parametru izmantošanā pastāv zināmi ierobežojumi, tādi kā parametru skaitlisko vērtību atkarība no mērījumu mēroga, no mērīšanas iekšējiem un ārējiem apstākļiem. Parametriem bieži ir atšķirīgas definīcijas, kas noved pie viena parametra dažādām interpretācijām.

Šajā nodaļā apskatīti virsmas 3D raupjuma parametri, definēti izmantojot gadījumu lauku teoriju un parametri – analogi, Taylor Hobson mērīšanas sistēmas izstrādātāju definītie [10]. Galvenie raupjuma 3D parametri ir sekojoši:

- Ra_T ; Sa – vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes;
- H_{max} ; St – maksimālais negluduma augstums
- M_B ; Sds – virsotņu skaits pacēlumā
- η_w ; Stp – atbalsta laukums
- H ; Ssc – izciļņu liekuma rādiuss (vidējais aritmētiskais virsotņu izliekums)
- V_w ; $Vm(h)$ – izciļņu materiāla tilpums

5.2. 3D parametru noteikšanas precizitāte

Eksperimentāli nosakot raupjuma 3D parametrus ir nepieciešams zināt kļūdu, kāda rodas sakarā ar mērījuma bāzes laukuma ierobežotību, un kādiem jābūt šī bāzes laukuma izmēriem, pie kuriem var novērtēt parametrus ar iepriekš uzdoto jeb sagaidāmo precizitāti.

Risinot apskatīto problēmu var izmantot pieeju, balstītu uz zināmo matemātiski sagaidāmās vērtības un dispersijas pamata atrast nepieciešamo mērījumu skaitu. Šajā gadījumā tas būs mērīšanas bāzes laukumu skaits. Kā piemēru apskatīsim parametru Ra_T .

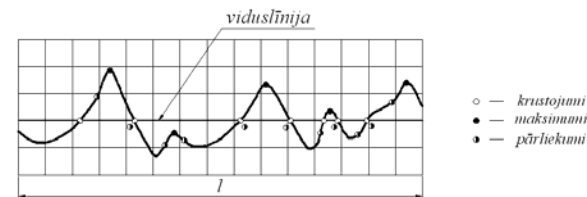
$$n_{Ra_T} = \frac{\pi t_\beta^2}{4\varepsilon^2 c \alpha L^2}, \quad (5.1)$$

kur t_β - tabulas koeficients [20];

ε - parametra relatīvā kļūda, % [20];

c – raupjas virsmas anizotropijas koeficients (3.3);

L – mērīšanas kvadrāta (apgabala) malas garums, mm [22].



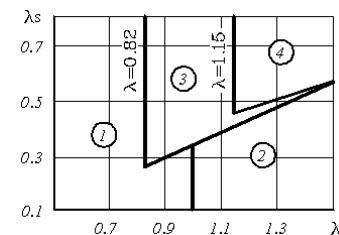
2.2. att. Profila īpašie punkti

Izvēloties korelācijas funkciju, ir nepieciešams noteikt tās tipu un aproksimācijas funkcijas veidu. Pētījumu ērtībai tiek ieviesti divi bezizmēra parametri:

$$\lambda = \frac{E\{n(0)\}}{E\{m\}}; \quad \lambda_s = \frac{E\{n(0)\}}{E\{s\}} \quad (2.2)$$

kuru vērtības atrodas robežās: $0 \leq \lambda \leq 2.0$; $0 \leq \lambda_s \leq 1.0$.

Zinot šos parametrus, pēc 2.3. att. nosakām korelācijas funkcijas tipu [20].



2.3. att. Korelācijas funkcijas izvēle pēc īpašajiem profila punktiem

Apskatīsim punktu skaita noteikšanu plakanslīpētās virsmas paraugam – Rugotest 104 N7 Ra 1.6 μm .

1) Veicot profila mērījumus, saskaņā ar [19], iegūstam sekojošus izejas datus:

$$Ra = 1.57 \mu\text{m}; \quad n(0) = 25; \quad m = 37; \quad s = 47.$$

2) Pēc formulām (2.2) aprēķinām korelācijas funkcijas parametrus:

$$\lambda = 0.68; \quad \lambda_s = 0.53$$

3) Pēc 2.3. att. šīm vērtībām atbilst pirmā tipa korelācijas funkcija [20] ar parametru α_H un λ vērtību apgabalu:

$$(1 + \alpha\tau^2)^{-1}; \quad \alpha_H = \frac{1}{2}; \quad 0 \leq \lambda \leq 2$$

4) Aprēķinām korelācijas intervālus τ_{KH} un τ_K [20]:

$$\tau_{KH} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71 \text{ mm}; \quad \tau_K = \frac{\tau_{KH}}{n(0)} = \frac{0,71}{25} = 0,028 \text{ mm} \quad (2.3)$$

5) Raupjuma solis pa viduslīniju:

$$RSm = \frac{2}{n(0)} = \frac{2}{25} = 0,08 \text{ mm} \quad (2.4)$$

6) Punktu skaits bāzes garumā:

$$k = \frac{l}{\tau_k} = \frac{0,8}{0,028} = 29 \text{ punkti} \quad (2.5)$$

7) Soļu skaits uz bāzes garumu:

$$z = \frac{l}{RSm} = \frac{0,8}{0,08} = 10 \text{ soļi} \quad (2.6)$$

8) Nekorelētu punktu skaits uz soli:

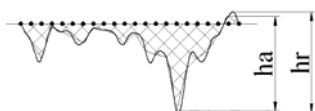
$$Ps = \frac{k}{z} = \frac{29}{10} = 2,9 \Rightarrow 3 \text{ punkti} \quad (2.7)$$

Līdzīgā veidā var noteikt punktu skaitu arī citādi aprēķinātām virsmām.

2.3. Punktu skaita noteikšana izmantojot grafisko aproksimāciju

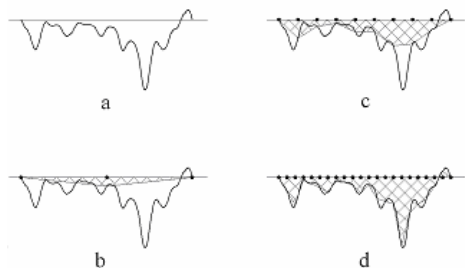
Vēl viens no paņēmieniem kā noteikt punktu skaitu ir aprakstīt negludumu, izmantojot grafisko aproksimāciju. Šajā gadījumā no virsmas raupjuma profilogrammas bāzes garumā tiek ņemts negludums ar lielāko soli Sm un sarežģītāko struktūru.

Meklēts tiek punktu skaits, pie kura aproksimētā negluduma kopējā augstuma novirze ha no reālā negluduma augstuma hr būtu mazāka par 5% ($hr - ha \leq 5\%$) (2.4. att.).



2.4. att. Reālā hr un aproksimētā ha negludumu augstumi

Attēlā 2.5.a. redzams reālais negludums, 2.5.b. parāda negluduma izskatu (iesvītrotais laukums), ja to aprakstītu ar trīs punktiem, 2.5.c. negludums tiek aprakstīts ar 10 punktiem, bet 2.5.d. ar 22 punktiem.



2.5. att. Negluduma aproksimācija pie dažādām punktu skaita vērtībām

$n(0)$ un m ; pie $\varphi = 30^\circ$ un 135° - tikai m . Dotā pieceja var tikt izmantota arī cita tipa raupjumam.

4.2. Sevišķie raupjas virsmas gadījumi

Raupjām virsmām ar virzītu anizotropiju piemīt izteiktas apstrādes pēdas vienā virzienā vai berzes pēdas. Tām raksturīgi divi galvenie savstarpēji perpendikulāri virsmas virzieni, saukti par šķērs un garen raupjumu. Tādas virsmas veidojas ēvelēšanas, virpošanas, frēzēšanas, plakanslīpēšanas un slīdes berzes procesos.

Šajā gadījumā noteikšanai pakļauj pie $\varphi = 0^\circ$ (šķērsraupjums) σ, n, m ; pie $\varphi = 30^\circ$ - n un m , bet pie $\varphi = 60^\circ$ - tikai m .

Virsmas raupjums ar stipri izstieptu virzītu anizotropiju ir iepriekšējo gadījumu paveids, pie šķērsraupjuma soļa vairāk nekā kārtas atšķirības pret garenraupjuma soli. Tādas virsmas pārsvarā veidojas uz mīkstiem materiāliem.

Šajā gadījumā pie $\varphi = 0^\circ$ (šķērsraupjums) novērtē σ, n, m , pie $\varphi = 45^\circ$ - n un m .

Speciālais anizotropā raupjuma gadījums – izstiepts izotropis lauks. Dotais matemātiskais modelis atšķiras ar to, ka tas sevī ietver kā virsmu izotropās, tā anizotropās īpašības. Mainot anizotropijas koeficienta c vērtības var viegli pāriet no augstākminētajiem anizotropijas gadījumiem pie izotropām virsmām $0 \leq c \leq 1$.

Šeit pie $\varphi = 0^\circ$, t.i., šķērsraupjumam nosaka σ, n, m , bet pie $\varphi = 45^\circ$ - tikai n .

Izotropa raupja virsma. Anizotropijas koeficients $c = 1$, tādēļ, lai atrastu trīs atlikušos matricas (4.1) nezināmos - σ^2, K_{20}, K_{40} , ir nepieciešams tikai viens brīvi orientēts virsmas šķēlums.

4.3. Instrukcija 3D parametru aptuvenai noteikšanai

Virsmām ar izteiktu nelīdzenumu virzienu piedāvā salīdzinoši vieglu instrukciju aptuvenai aprēķinu - eksperimentālai 3D parametru noteikšanai [21].

- 1) Mēriekārta tiek noregulēta raupjuma parametru noteikšanā trasē, perpendikulāri apstrādes (berzes) pēdām.
- 2) Veic virsmas izmēģinājuma trasēšanu, nosaka n_1 un m_1 skaitu. Pēc uzdotās relatīvās kļūdas ε , ticamības varbūtības β un palīglieluma $\lambda = n_1/m_1$, piemēram, saskaņā ar [19], nosaka mazāko mērīšanas trases garumu L un mērījumu skaitu.
- 3) Veic mērījumus un nosaka vidējās aritmētiskās parametru $\bar{R}_a, \bar{n}_1, \bar{m}_1$ vērtības.
- 4) Noregulē mēraparātu nulļu skaita noteikšanai $n(45^\circ)$ virzienā, veidojošu 45° leņķi pret pirmo trasi. Mērīšanas trases garums un bāzes garums pie tam jābūt: $L_{45} \geq \sqrt{2}L; l_{45} \geq \sqrt{2}l$.
- 5) Nosaka vidējo nulļu skaitu $\bar{n}(45^\circ)$ pie tā paša mērījumu skaita, kāds punktā 3.
- 6) Nosaka vidējo anizotropijas koeficienta vērtību $\bar{c} = (2[\bar{n}(45^\circ) / \bar{n}_1] - 1)^{1/2}$.
- 7) Uz lielumu $\bar{R}_a, \bar{n}_1, \bar{m}_1, \bar{c}$ pamata tiek izrēķināti nepieciešamie virsmas 3D raupjuma parametri.

4. nodaļa. 3D PARAMETRU NOTEIKŠANA PA VIRSMAS ŠĶĒLUMIEM

Šajā nodaļā apskatīta metode 3D parametru aprēķinu-eksperimentālai noteikšanai, izmantojot virsmas šķēlumus. Noteikti šķēlumu parametri, to skaits un orientācija. Apskatītas virsmas vispārējā gadījumā un definēti sevišķie raupjas virsmas gadījumi.

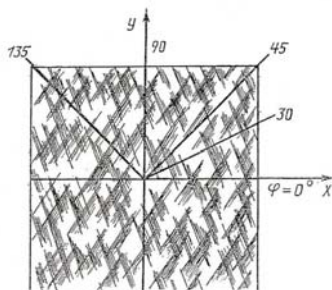
4.1. Izejas dati

Izejas datus iekļautajai informācijai jābūt minimāla pēc apjoma, bet tai pat laikā pietiekamai lai noteiktu augstuma, soļa un mikronelīdzenumu formas parametrus. Šajā gadījumā tiek izmantota divu argumentu funkcija $h(x, y)$ un tās atvasinājumi (3.4). Lielums h_1 , piemēram, tiek izmantots augstuma parametru noteikšanai, h_2 un h_3 – virsmas gradienta novērtēšanai, h_4 un h_6 – mikronelīdzenumu virsotnes liekumam.

Visa 3D parametru kompleksa pētīšana, balstīta uz lielumiem h_1, h_2, \dots, h_6 prasa to savstarpējā sadalījuma sešmēru blīvuma zināšanu, kas savukārt tiek noteikts ar matricu (3.5). No kurienes izriet, ka $h(x, y)$ aprakstās ar diferencējumu viendabīgu divmēru gadījuma lauku. Momenti k_{ij} tad tiek noteikti pēc lauka korelācijas funkcijas $K_h(\tau_1, \tau_2)$ un matricu var pārrakstīt sekojošā veidā sekojošā veidā [21]:

$$\begin{vmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 & K_{20} & K_{11} & K_{02} \\ & -K_{20} & -K_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & -K_{20} & 0 & 0 & 0 \\ & & & K_{40} & K_{31} & K_{22} \\ & & & & K_{22} & K_{13} \\ & & & & & K_{04} \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

Matrica satur izejas parametru kopu – lauka korelācijas funkcijas atvasinājumus jeb raupjas virsmas 3D attēlojumu vispārīgā veidā. No dotās matricas izriet, ka noteikšanai tiek pakļauti deviņi lielumi K_{ij} . To atrašana notiek pēc virsmas šķēļumiem. Deviņu izejas lielumu K_{ij} noteikšanai nepieciešami pieci neatkarīgi virsmas šķēļumi (4.1).

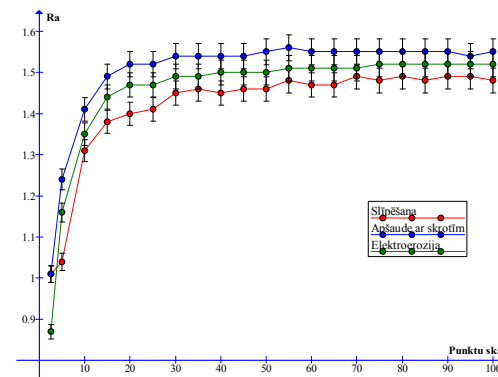


4.1. att. Mērīšanas trašu izvietojums raupjai virsmai vispārīgā gadījumā.

Šo šķēlumu orientācija uz virsmas un lieluma ϕ_i izvēle principā var būt brīva. Bet aprēķina formulu vienkāršošanai un vienmērīgākai pētāmās virsmas aptveršanai var iesaka sekojošas leņķa ϕ vērtības: $0, 30, 45, 90, 135^\circ$. Attiecībā pret izvēlētajiem pieciem šķēļumiem (4.1. att.) noteikšanai tiek pakļauti pie $\phi = 0^\circ - \sigma, n(0)$ un m ; pie $\phi = 45^\circ$ un $90^\circ -$

2.4. Punktu skaits, pie kura stabilizējas parametru vērtības

Šajā gadījumā eksperimenta mērķis ir noteikt punktu skaitu uz raupjuma soli pa viduslīniju RSm , pie kura parametra Ra un vērtības ir stabilas, ar novirzi mazāku par 5%. Mērīts virsmas profils, atkārtoti vienā un tajā pašā vietā, pie dažādām punktu skaita uz bāzes garumu vērtībām. Mērījumu rezultāti dažādi apstrādātām virsmām redzami 2.6. att.



2.6. att. Parametra Ra izmaiņa atkarībā no punktu skaita

2.5. Secinājumi

Nodaļā veikto pētījumu rezultāti ir sekojoši:

- 1) Apskatīta virsmas 3D raupjuma mērīšanas sistēma, pielietojot kontakta tipa mēriekārtas: datu nolasišanas princips un galvenie izejas parametri 3D raupjuma parametru mērījumiem. Secināts, ka galvenais rezultātu precizitāti ietekmējošais faktors ir datu punktu skaits pa abiem mērīšanas virzieniem.
- 2) Izstrādātas trīs metodes datu punktu skaita uz raupjuma vidējo soli RSm noteikšanai virsmām ar neregulāru rakstura raupjumu. 2.1 tabulā redzams punktu skaits uz raupjuma vidējo soli RSm , noteikts pēc katras no metodēm, trim apstrādes veidiem. Dotas arī šo metožu kļūdas.

2.1. tabula

Virsmas apstrādes veids	Datu punktu skaits					
	Punktu skaita noteikšanas metode					
	Gadījuma procesu teorija		Grafiskā aproksimācija		Parametru stabilizēšanās	
	punkti	kļūda	punkti	kļūda	punkti	kļūda
Plakanslīpēšana	3	88%	22	5%	30	2%
Elektroerozija	5	23%	14		20	
Apšaušana ar skrofīm	5	8,4%	14		20	

- 3) No 2.1. tabulas redzams, ka gadījuma procesu teorijas metode dod samērā lielu kļūdu. Tas izskaidrojams ar to, ka tika izmantots pilns korelācijas intervāls un noteikts nekorelēto punktu skaits. Pēc grafiskās aproksimācijas un parametru stabilizēšanās metodes noteikto punktu skaits dod mazas parametru kļūdas. Un

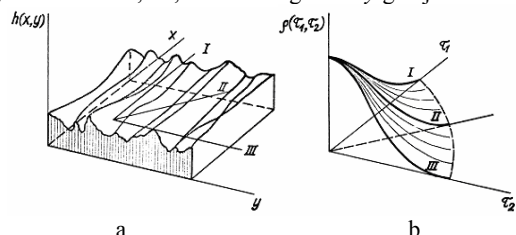
ievērojot šo abu metožu rezultātus var ieteikt neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru mērījumos izmantot vienu punktu skaitu – 22 punktus uz raupjuma vidējo soli RSm . Pie šāda punktu skaita parametru kļūda būs 2 ... 5 % robežās.

3. nodaļa. VIRSMAS (3D) RAUPJUMA TEORĒTISKAIS APRAKSTS

3.1. Mikrotopogrāfijas vispārējie jēdzieni un modelis

Kā jau minēts iepriekš, tad pilnīgam virsmas raupjuma aprakstam nepietiek tikai ar profila īpašību zināšanu – nepieciešams izmantot mikrotopogrāfijas jeb 3D metodes.

Virsmas raupjumu mikrotopogrāfiskajā izpratnē jāraksturo ar trīs koordinātēm, kuras Dekarta koordinātu sistēmā veido augstums h , aplūkojamā punkta abscisa un ordināta, nosakošas tā stāvokli plaknē (3.1.a att.). Neregulāra rakstura virsmas raupjuma pētījumos samērā efektīvas ir gadījuma funkciju teorijas metodes. Mikrotopogrāfiju var uzskatīt par gadījuma funkciju, tikai divmēru, t.i., divu mainīgo x un y gadījuma lauku $h(x,y)$.



3.1. att. Shematisks neregulāra rakstura virsmas raupjuma modeļa (a) un tam atbilstošās normētās korelācijas funkcijas (b) attēlojums.

Gadījuma laukiem, līdzīgi gadījuma procesiem, svarīgs raksturlielums ir korelācijas funkcija, kura ir atkarīga no diviem mainīgajiem τ_1 , τ_2 – vektora τ , savienojosa divus virsmas punktus, taisnleņķa Dekarta koordinātēm (3.1.b att.). Virsmas raupjums šajā gadījumā tiek aprakstīts ar normālu gadījuma lauku $h(x,y)$, kura korelācijas funkcija ir nepārtraukta un tai ir nepārtraukti atvasinājumi. Gadījuma lauka vidējās vērtības lomu izpilda plakne, kuru sauc par vidējo plakni. Analogiski gadījuma procesiem, aprakstot normālo gadījuma lauku, ir jāzina tā matemātiski sagaidāmā vērtība un lauka korelācijas funkcija.

3.2. Izejas parametri

Ja raupjums ir aprakstīts ar normālu viendabīgu gadījuma lauku, tad tā izejas parametri ir Ra , σ un raupjuma soļi: S_1m – perpendikulāri apstrādes pēdu virzienam un S_2m – apstrādes pēdu virzienā. Arī šajā gadījumā izmanto īpašos punktus (2.2. nodaļa), tikai atskaitītus attiecībā pret vidējo raupjas virsmas plakni, nevis pret šķēluma vidējo līniju. Pēc šo punktu attiecības var spriest par raupjas virsmas izotropijas pakāpi, kuru apzīmē ar c un sauc par anizotropijas koeficientu:

$$c = \frac{E\{n_2(0)\}}{E\{n_1(0)\}} = \frac{E\{S_1m\}}{E\{S_2m\}} \quad (3.1)$$

Koeficients c mainās no 0 līdz 1. Pie $c=1$ lauks ir izotropis, pie $c=0$, maksimāli izstieps tā, ka vienā virzienā mēs iegūstam taisnu līniju.

3.3. Korelācijas matrica

Tādu virsmas nelīdzenumu raksturlielumu pētīšana, kā maksimumi, liekums, slīpums, ir saistīta ar gadījuma lauka atvasinājumiem un noved pie kopējas gadījuma lauka sadalījuma izmantošanas. Ja apzīmējam izejas normālo gadījuma lauku ar $h_1=h(x,y)$, tad tā atvasinājumi h_2, h_3, h_4, h_5, h_6 ir sekojoši:

$$h_2 = \frac{\partial h(x,y)}{\partial x}; \quad h_3 = \frac{\partial h(x,y)}{\partial y}; \quad h_4 = \frac{\partial^2 h(x,y)}{\partial x^2}; \quad h_5 = \frac{\partial^2 h(x,y)}{\partial x \partial y}; \quad h_6 = \frac{\partial^2 h(x,y)}{\partial y^2} \quad (3.2)$$

Tā kā normālā gadījuma lauka atvasinājumi arī veido normālo lauku, tad kopīgos sadalījumus h_1, h_2, \dots, h_6 var apskatīt uz daudzvērtu normālā sadalījuma pamata, korelācijas matricas veidā:

$$\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ & & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ & & & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ & & & & k_{55} & k_{56} \\ & & & & & k_{66} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

kur k_{ij} – lielumu h_1, h_2, \dots, h_6 korelācijas momenti.

3.4. Secinājumi

Veiktais virsmas 3D raupjuma teorētiskais pētījums parāda, ka:

- 1) Ir iespējams izveidot neregulāra rakstura neizotropas virsmas matemātisko modeli viendabīga gadījuma lauka veidā un noteikta tā izejas datu, raksturojošu virsmas 3D raupjumu, kopu;
- 2) Izejas datu kopu veido augstuma parametrs Ra vai $\sigma(Rq)$ un savstarpēji perpendikulāru virsmas šķēlumu īpašie punkti: šķērsraupjumam – $n_1(0)$ vai S_1m ; garenraupjumam – $n_2(0)$ vai S_2m . Atšķirībā no profila parametriem, tie tiek noteikti attiecībā pret vidējo plakni.
- 3) Apskatītas pieņemtā raupjuma modeļa varbūtīgās likumsakarības: gadījuma lielumu savstarpējais sadalījuma blīvums un tā atvasinājumi, veidojoši korelācijas momentu matricu.
- 4) Ieviests raupjas virsmas anizotropijas mērs c , nosakāms kā šķērs un garenraupjuma vidējo soļu S_1m un S_2m attiecība.