



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un Mašīnzinību fakultāte

Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

Anita AVIŠĀNE

Aparātu inženierijas doktora programmas doktorante

**MĒRĪŠANAS SPĒKA UN VIRSMAS RAUPJUMA
IETEKME UZ AUGSTI ELASTĪGU MATERIĀLU
DETAĻU LINEĀRO IZMĒRU MĒRĪJUMU
PRECIZITĀTI**

Promocijas darba kopsavilkums

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mēraparāti un metroloģija

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

Rīga 2015

UDK 620.179.118(043.2)
Av 530 m

Aviņāne A. Mērišanas spēka un virsmas raupjuma ietekme uz augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērijumu precizitāti. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU 2015. - 39 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI institūta 2014. gada 04. jūnija lēmumu Nr. 2/14



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 26. maijā Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 405. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.sc.ing. Ēriks Kronbergs
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

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

Profesors, Dr.sc.ing. Jurijs Dehtjars
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Anita Avišāne.....(paraksts)

Datums: 11.05.2015

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā un satur ievadu, 7 nodaļas, noslēgumu, informācijas avotu sarakstu, 2 pielikumus, 18 tabulas 35 attēlus, 92 lappuses.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte	5
Promocijas darba mērķis un uzdevumi	5
Pētījuma metodika	5
Zinātniskā novitāte	6
Praktiskais pielietojums	6
Autors šajā darbā aizstāv	6
Darba aprobācija	6
Publikācijas	7
PROMOCIJAS DARBA SATURS	9
Izmantotie apzīmējumi un termini	9
1. nodaļa LITERATŪRAS APSKATS	10
2. nodaļa VIRSMAS RAUPJUMA DEFORMĀCIJAS ANALĪZE	12
2.1. Izcilņu deformācijas noteikšana	12
2.2. Viena virsmas raupjuma izcilņa deformācijas analīze	13
2.3. Virsmas raupjuma izcilņu deformācijas noteikšana	14
3. nodaļa RAUPJAS VIRSMAS IZCIĻŅU AUGSTUMA PĒTĪJUMI	15
3.1. Virsmas izcilņu augstuma sadalījuma blīvums	15
3.2. Izcilņu augstuma matemātiskā sagaidāmā vērtība	16
3.3. Releja likuma izcilņu augstuma matemātisko sagaidāmo vērtību asimptotika ...	17
3.4. Secinājumi	18
4. nodaļa VIRSMAS RAUPJUMA IZCIĻŅU LIEKUMS UN TO SKAITS	19
4.1. Virsmas raupjuma izcilņu liekums	19
4.2. Virsmas raupjuma izcilņu skaits	19
5. nodaļa VIRSMAS DEFORMĀCIJAS NOTEIKŠANA	21
5.1. Virsmas raupjuma izcilņu deformācijas	21
5.2. Virsmas raupjuma izcilņu nosēšanās	22
5.3. Pamatmateriāla deformācijas noteikšana	23
5.4. Augsti elastīgu materiālu detaļu raupjas virsmas deformācijas noteikšana ...	24
6. nodaļa ANALĪTISKO FORMULU EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE	26
6.1. Eksperimentālo paraugu lineāro izmēru mērīšana	27
6.2. Mērīšanas procesa datormodelēšana.....	28
6.3. Analītisko un eksperimentālo rezultātu analīze	28
6.4. Secinājumi	29
7. nodaļa AUGSTI ELASTĪGU MATERIĀLU DETAĻU MĒRĪŠANAS UN MĒRINSTRUMENTU IZVĒLES METODIKA	30
7.1. Vispārīgie noteikumi.....	30
7.2. Mērinstrumentu izvēle	30
7.3. Mērījumu kļūdas noteikšana	30
NOSLĒGUMS	37
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	39

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mūsdienās aizvien pieaugoša augsti elastīgu materiālu, it īpaši polimēru ražošana un no polimēriem izgatavotu produktu lietošanas pieaugums, tajā skaitā arī mašīnbūvē rada nepieciešamību paaugstināt to izgatavošanas precizitāti un efektivitāti. Ātra un augstas precizitātes detaļu izmēru kontrole, sekmē ražošanas procesa precizitātes un efektivitātes paaugstināšanos. Līdz šim nav izstrādā augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanas un mērījumu kļūdas noteikšanas metodika, kas apgrūtina pareizu mērinstrumentu izvēli konkrētiem materiāliem. Šādas metodikas izstrāde un ieviešana praksē ļauj veikt precīzu un kvalitatīvu detaļu kontroli, samazinot nepieciešamību pēc nepamatoti lielām izstrādājuma pielaidēm, jo izmantojot plastmasas, gumijas, neilona un citu augsti elastīgo materiālu mehāniskās īpašības, bieži detaļas no šiem materiāliem tiek projektētas un izgatavotas ar lielu pielaidi. Ņemot vērā, ka sintētiskie polimēri tiek iegūti no neatjaunojamiem dabas resursiem, to cenas pieaug, līdz ar to būtisks ir jautājums par šo resursu izmantošanas ierobežošanu. Samazinot šo materiālu patēriņa apjomus, var novērst daudzas ekoloģiskās problēmas. Pētījumā iegūtie rezultāti nodrošināšana augsti elastīgu, tajā skaitā polimēru materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitātes, kā arī ražošanas procesa efektivitātes paaugstināšanos.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba „Mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekme uz augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitāti” mērķis ir izpētīt augsti elastīgu materiālu detaļu kontaktmērīšanas procesu un izstrādāt metodiku mērījumu kļūdas noteikšanai.

Dotā mērķa sasniegšanai tiek risināti sekojoši uzdevumi:

- 1) Augsti elastīgu materiālu detaļu kontakta modeļa izstrāde;
- 2) Virsmas kontaktuzdevumu risināšanai nepieciešamo virsmas 3D raupjuma parametru pētījumi;
- 3) Mērījumu kļūdas aprēķina formulu iegūšana;
- 4) Aprēķinu rezultātu eksperimentāla pārbaude;
- 5) Augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanas un mērinstrumentu izvēles metodikas izstrāde.

Pētījuma metodika

Augsti elastīgu materiālu detaļu virsmas raupjuma modelim un teorētiskiem pētījumiem tika izmantotas: kontaktteorija, varbūtības teorijas speciālās nodaļas „Gadījuma procesu un lauku teorija”. Eksperimentālie pētījumi virsmas raupjuma noteikšanai tika veikti ar profilogrāfu – profilometru Form Talysurf Intra 50 (Taylor Hobson, UK), bezkontakta lineāro izmēru mērījumi ar 3D koordinātu mērīšanas iekārtu MarVision MS222 (Mahrs, Germany), lineāro izmēru kontaktmērījumiem izmantoti: digitālais mikrometrs DM2020 (Digital Micrometers Ltd, UK), mikrometrs МК (Калибр, Krievija), digitālā garuma mērīšanas sistēma TG30 (Compac, Switzerland). Datormodelēšana veikta ar programmām ANSYS un SolidWorks. Eksperimentu datu apstrādei izmantotas matemātiskās statistikas metodes un datorprogrammas MatCAD un Graph.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir sekojoša:

1. Mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekmes uz augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitātes pētījumi;
2. 3D virsmas parametru izmantošana kontaktuzdevumu risināšanā augsti elastīgu materiālu detaļu kontaktmērīšanā;
3. Augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērīšanas un mēraparātu izvēles metodika.

Praktiskais pielietojums

Pētījumi, kas veikti dotajā promocijas darbā „Mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekme uz augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitāti” ir ar praktisku nozīmi metroloģisko uzdevumu risināšanā augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērīšanas procesā. Mērot detaļas, kas izgatavotas no gumijas, neilona, polietilēna u.c. augsti elastīgiem materiāliem, uzņēmumu mērīšanas laboratorijās ir jāņem vērā kontaktdeformācijas, detaļu izmēru noteikšanai.

Pētījuma rezultātā izstrādātā augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanas un mērinstrumentu izvēles metodika, ļauj izvēlēties augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanas precizitātei atbilstošos mērinstrumentus.

Pētījumu rezultāti var tikt izmantoti gan Latvijas, gan ārvalstu uzņēmumu metroloģiskajās laboratorijās.

Autors šajā darbā aizstāv

1. Augsti elastīgu materiālu detaļu virsmu kontakta modeli;
2. Analītiskas sakarības, augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitātes noteikšanai;
3. Kontaktuzdevumu risināšanai nepieciešamo virsmas raupjuma parametru varbūtības likumsakarības;
4. Augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērīšanas un mēraparātu izvēles metodiku.

Darba aprobācija

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

- 12th euspen (European society for precision engineering & nanotechnology) International Conference, June, Stockholm, Sweden;
- 8th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM 2012). 8 - 13 July, 2012, Bialystok, Poland;
- Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, October 10-12, 2012, Riga, Latvia;
- 3rd International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress (APMAS 2013) Conference, 24-28 April 2013 Antalya, Turkey;
- 9th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM 2013), 01 – 03 July 2013, Vilnius, Lithuania;

- 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, University of Zadar, 23 – 26 October 2013, Zadar, Croatia;
- 4th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress (APMAS 2014) Conference, 24 – 27 April 2014, Antalya, Turkey;
- RTU Mehānikas institūta un Latvijas Nacionālās Mehānikas Komitejas apvienotais seminārs, 18.03.2014, Latvija, Rīga.

Publikācijas

Par veikto pētījumu izstrādi un rezultātiem ir publicēti 15 zinātniskie raksti:

1. Avišāne, A. The Elastic Deformation of Machine Elements in Mechatronics Systems. *Solid State Phenomena*, 2015, Volume 220 – 221, pp. 177 – 181. ISSN 1662-9779.
2. Avisane, A., Rudzītis, J., Kumermanis, M. Studies of the 3D Surface Roughness Height. No: 3rd International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress (APMAS 2013): AIP Conference Proceedings, Turcija, Antalya, 24.-28. aprīlis, 2013. New York: AIP Publishing LLC, 2013, 406.-409.lpp. ISBN 978-0-7354-1197-5. ISSN 1551-7616. e-ISSN 0094-243X. Pieejams: doi:10.1063/1.4849304
3. Avisane, A., Rudzītis, J., Springis, G. Research into the 3D roughness of a rough surface. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2014, Volume 51, Issue 1, 62.-73.lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: doi:10.2478/lpts-2014-0007 (**SCOPUS**)
4. Avišāne, A., Rudzītis, J., Upītis, G., Vilcāns, J. Influence of Flexible Body Contact Deformation on the Linear Dimension Measurement Precision. *Diffusion and Defect Data. V. Measurement techniques, Pt.B: Solid State Phenomena*, 2013, Vol.199, 321.-325.lpp. ISSN 1662-9779. Pieejams: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.199 (**SCOPUS**)
5. Kumermanis, M., Rudzītis, J., Avisane, A. Investigation of 3D Surface Roughness Characteristic's Accuracy. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2013, Vol.3, No.10, 632.-640.lpp. ISSN 2159-5275.
6. Kumermanis, M., Rudzītis, J., Avisane, A. Investigation of 3D Surface Roughness Characteristic's Accuracy. No: Proceedings of the 11th EUSPEN International Conference, Itālija, Como, 23.-26. maijs, 2011. Delft: EUSPEN, 2011, 145.-149.lpp. ISBN 9780955308291.
7. Rudzītis, J., Avisane, A. The Effect of Surface Roughness on Components Size Measurement Errors. No: Proceedings of the 11th international Conference of the European Society of Precision Engineering and Nanotechnology: The 11th Euspen International Conference, Itālija, Como, 23.-27. maijs, 2011. Netherlands: Euspen, 2011, 211.-214.lpp. ISBN 9780955308291.
8. Rudzītis, J., Avišāne, A., Avišāns, D. Investigation of Elastic Machine Element Measurement Error. No: *Procedia Engineering*, Horvātija, Zadar, 23.-26. oktobris, 2013. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2013, 1033.-1037.lpp. ISSN 1877-7058. Pieejams: doi:10.1016/j.proeng.2014.03.087 (**SCOPUS**)
9. Rudzītis, J., Avišāne, A., Springis, G. Statistics of Roughness Peak Height of Friction Surface. *Production Engineering*. Nr.35, 2013, 149.-152.lpp. ISSN 1407-8015. e-ISSN 2255-8721.
10. Rudzītis, J., Krizbergs, J., Avišāne, A., Springis, G., Kumermanis, M., Lungevičs, J. Calculation of 3D Texture Parameters. *Production Engineering*. Nr.35, 2013, 113.-117.lpp. ISSN 1407-8015. e-ISSN 2255-8721.
11. Springis, G., Rudzītis, J., Avišāne, A., Kumermanis, M., Lungevičs, J. Wear Calculation Possibility in Slide-Friction Pairs Using Surfaces with Nanocoatings. No: *Mechanical Engineering and Mechanics*. Rīga: 2012, 24.-28.lpp. ISBN 978-9984-9990-7-4.

12. Springis, G., Rudzītis, J., Avisane, A., Leitāns, A. Wear Calculation for Sliding Friction Pairs, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. Volume 51, Issue 2, Pages 41–54, ISSN (Online) 08688257, DOI: 10.2478/lpts -2014-0012, May 2014
13. Springis, G., Rudzītis, J., Avišāne, A., Kumermanis, M., Semjonovs, J., Leitāns, A. Wear Problems of Slide-Friction Pair. *Solid State Phenomena*, 2015, Volume 220 – 221, pp. 361 – 366. ISSN 1662-9779.
14. Springis, G., Rudzītis, J., Leitāns, A., Avišāne, A. Wear Calculation Model for Sliding Surfaces with Nano-Coatings. *Production Engineering*. Nr.35, 2013, 74.-78.lpp. ISSN 1407-8015. e-ISSN 2255-8721.
15. Vilcans, J., Torims, T., Avisane, A. Design of the experimental equipment to improve stamping with elastic media. No: 23rd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation 2012, Horvātija, Zadar, 24.-27. oktobris, 2012. Wien: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2012, 939.-942.lpp. (SCOPUS)

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Izmantotie apzīmējumi un termini

$[A_{m\bar{e}r}]$	–	mērījumu kļūdas pieļaujamā vērtība;
u	–	virsmas raupjuma izciļņu deformāciju līmenis;
γ	–	virsmas raupjuma izciļņu normētais deformācijas līmenis;
σ	–	gadījuma lauka vidējā kvadrātiskā novirze;
a	–	virsmas deformācija;
N_A	–	virsmas raupjuma visu izciļņu skaits uz laukuma vienību;
$N(\gamma)$	–	virsmas raupjuma izciļņu skaits virs līmeņa γ ;
e	–	kontaktaukuma ekscentritāte;
$K(e)$	–	pirmās pakāpes pilnais eliptiskais integrālis;
$E(e)$	–	otrās kārtas pilnais eliptiskais integrālis;
b_i	–	virsmas raupjuma izciļņa eliptiskā kontakta laukuma garākā pusass;
a_i	–	virsmas raupjuma izciļņa eliptiskā kontakta laukuma īsākā pusass;
θ	–	Materiāla elastīgo īpašību konstante;
E	–	elastības modulis;
μ	–	Puasona koeficients;
H	–	Virsmas raupjuma izciļņu vidējais liekums;
k_1, k_2	–	Virsmas raupjuma izciļņu galvenie liekumi;
$h_p(u)$	–	virsmas raupjuma izciļņu augstums virs līmeņa u ;
$E\{ \}$	–	matemātiskā sagaidāmā vērtība („matemātiskā cerība” pēc LZA terminoloģijas komisijas);
q	–	spiediens uz kontaktaukumu;
Aa	–	nominālais kontakta laukums, ko nosaka laukuma izmēri;
ξ_p	–	Virsmas raupjuma izciļņu augstuma normēta vērtība;
$f(\xi_p)$	–	virsmas raupjuma izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvums;
m	–	virsmas raupjuma profila maksimumu skaits uz garuma vienību;
$n(0)$	–	virsmas raupjuma profila nulļu skaits uz garuma vienību;
c	–	virsmas raupjuma anizotropijas koeficients;
$erfc(x)$	–	kļūdu integrālis;
Sa	–	virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes;
RSm	–	virsmas raupjuma vidējais solis;
St	–	virsmas raupjuma kopējais augstums;
ζ	–	virsmas deformācijas normētais lielums;
l	–	mērāmās detaļas nominālizmērs;

Augsti elastīgi materiāli – materiāli ar elastības moduli E līdz 200 N/mm^2 .

1. nodaļa LITERATŪRAS APSKATS

Dotajā darbā veikti pētījumi par mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekmi uz augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitāti. Šajā darbā ar terminu augsti elastīgi materiāli tiek saprasti materiāli ar elastības moduli E līdz 200 N/mm^2 . Apskatām līdz šim veiktos pētījumus par sekojošiem jautājumiem:

- 1) Mērīšanas kļūda un mērinstrumentu izvēle;
- 2) Kontaktdeformāciju veidošanās mērīšanas spēka ietekmē;
- 3) Virsmas raupjuma ietekme uz mērījumu precizitāti.

Mērīšanas kļūda un mērinstrumentu izvēle

No pareizas mērinstrumentu izvēles ir atkarīga tehniskās kontroles efektivitāte kā no metroloģiskā, tā no ekonomiskā viedokļa. Universālo mērinstrumentu izvēles pamatnoteikumus var formēt šādi [8]:

1) Mērinstrumentu precizitātei salīdzinājumā ar kontrolējamā izstrādājuma izgatavošanas precizitāti jābūt pietiekami augstai.

2) Darba ražīgumam kontroles operācijās jābūt iespējami augstākam, bet ar kontroli saistītiem izdevumiem, kontrolējamā izstrādājuma pašizmaksai jābūt iespējami mazākam īpatsvaram.

Mērījumu kļūdas pieļaujamā vērtība $[\Delta_{mēr}]$ atkarīga no izstrādājuma izgatavošanas pielāides T_{izstr} , kas savukārt saistīta ar nominālizmēru un precizitātes kvalitāti. Mērījumu kļūdas pieļaujamās vērtības ir pieņemtas no 20% līdz 35% no pielāides vērtības [6].

Galvenās mērīšanas kļūdas sastāvdaļas, kas jāņem vērā, novērtējot mērierīču kļūdas dažādos izmantošanas apstākļos, norādītas shēmā 1.1. attēlā.

Izejas dati mērīšanas kļūdas noteikšanai, mērot ar universāliem mērīšanas līdzekļiem								
Mērīšanas līdzekļu pieļaujamās kļūdas normālos apstākļos	Mērīšanas līdzekļu kļūdas iedaļas vērtības ietvaros	Nolasišanas subjektīvās kļūdas un uzslisana turot instrumentu rokās	Gala mēru bloka garuma kļūda, tai skaitā no piespiešanas	Temperatūras deformācijas, kas rodas no dažādiem iemesliem, ar kopēju apzīmējumu „temperatūras režīms”	Iestatišanas mezglu elastīgās deformācijas, mērīšanas spēka svārstību rezultātā	Virsmas raupjuma ietekme uz mērīšanas kļūdu	Kontaktdeformācijas mērīšanas spēka ietekmē	Specifiskas kļūdas, saistītas ar mērīšanas līdzekļa konstruktīvām īpašībām

1.1. att. Galvenās mērīšanas kļūdas sastāvdaļas [7]

Izvēlēties konkrētu mērīšanas līdzekli var izmantojot 9.1. tabulu, atkarībā no izmērāmā lieluma, izgatavošanas pielāides un pieļaujamās kļūdas pēc standarta GOST 8.051-1981 [12].

Dotais literatūras apskats rāda, ka mērījumu kļūdu ietekmē kontaktdeformācijas, bet veicot mērinstrumentu izvēli pēc aprakstītām metodikām kontaktdeformāciju izmērs nav ņemts vērā.

Kontaktdeformācijas mērīšanas spēka ietekmē

Kļūdas mērīšanas spēka ietekmē var iedalīt trīs veidos: kļūdas, kas rodas mērīšanas uzgaļa un detaļas kontakta zonā esošās elastīgās deformācijas rezultātā; kļūdas, kas rodas elastīgu deformāciju rezultātā izslēdzot kontakta zonu un kļūdas, kas rodas iestatīšanas mezgla un mērinstrumenta detaļu elastīgo deformāciju rezultātā [3]. Lai noteiktu mērījumu kļūdu mērīšanas spēka ietekmē, jāņem vērā, ka vietā, kur saskaras mērinstrumenta uzgalis un mērāmās detaļas virsma, rodas elastīgās deformācija – saspiešana. Parasti tiek noteikta mērīšanas spēka maksimālā vērtība un tā svārstības. Tomēr ar šiem datiem nav pietiekami, lai novērtētu mērīšanas spēka radīto kļūdu. Maksimālais mērīšanas spēks ir jāņem vērā, aprēķinot kontaktdeformācijas, kas tāpat ir atkarīgas arī no materiāla, formas un virsmas stāvokļa gan mērīšanas uzgalim, gan mērāmajam objektam [7].

Dotais literatūras apskats rāda, ka līdz šim kontaktmērīšanā nav pietiekoši izvērtēta mērīšanas spēka ietekme.

Virsmas raupjums un tā ietekme uz mērījumu kļūdu

Šobrīd esošās un praksē lietotās teorijas ar 2D parametriem tiek un tiks pārskatītas, tās pielāgojot 3D parametriem. Pieaugot prasībām un iespējām, ir klajā nācis jauns virsmu raksturojošs standarts – ISO 25178, kura pilnais nosaukums ir „Ģeometrisko programmproduktu specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: laukums” [11].

Raupjas virsmas profila un pašas virsmas modelis var tikt uzskatīts par izciļņu kopumu, kurus nepieciešams aprakstīt ar virkni parametru, raksturojošu to ģeometrisku formu. Ir zināmi daudzi aprēķina modeļi, kas savā starpā atšķiras ar parametru sastāvu un skaitu. Visplašāk, tā vienkāršības dēļ tiek lietots sfēriskais modelis. Raupjuma jeb nelīdzenumu raksturs sīkāk vēl ir izskaidrots ar korelācijas funkciju un varbūtības izkliedes blīvumu [9]. Pēdējā laikā pētnieki izmanto un vispilnīgāko priekšstatu par virsmas raupjumu dod virsmas modelis, kas aprakstīts ar *gadījuma funkcijas* palīdzību, jo līdz ar augstumu tā ņem vērā arī likumsakarības garen- un šķērsvirzienā [9].

Izstrādājuma virsmas raupjuma ietekme uz mērīšanas kļūdu parasti ir tiek noteikta atkarībā no mikroizciļņu augstuma, soļa un mērīšanas uzgaļa rādiusa. Mērījuma kļūda virsmas mikronegludumu dēļ tiek uzskatīta par niecīgu, kas neietekmē summāro mērījumu kļūdu.

Līdz šim nav izvērtēta virsmas raupjuma ietekme uz mērījumu kļūdu, kaut gan praktiskie eksperimenti rāda, ka raupjums atstāj ietekmi uz mērījumu precizitāti.

Galvenie pētījumu virzieni

Veiktais pētījumu un literatūras apskats parāda, ka jautājums par augsti elastīgu ($E \leq 200N/mm^2$) materiālu detaļu mērīšanu, kā arī mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekmi uz mērījumu precizitāti nav pietiekami pētīts. Šobrīd nav augsti elastīgu materiālu detaļu mērījumu kļūdas noteikšanas un mērinstrumentu izvēles metodikas.

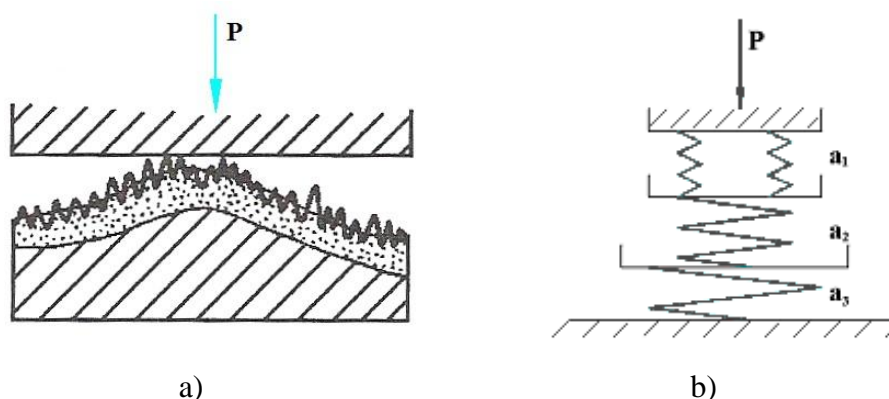
Ievērojot iepriekš minēto, tiek izvirzīti sekojoši galvenie pētījumu virzieni:

- Augsti elastīgu materiālu detaļu kontakta modeļa izstrāde;
- Virsmas kontaktuzdevumu risināšanai nepieciešamo virsmas 3D raupjuma parametru pētījumi;
- Mērījumu kļūdas aprēķina formulu iegūšana;
- Aprēķinu rezultātu eksperimentāla pārbaude;
- Augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanas un mērinstrumentu izvēles metodikas izstrāde.

2. nodaļa VIRSMAS RAUPJUMA DEFORMĀCIJAS ANALĪZE

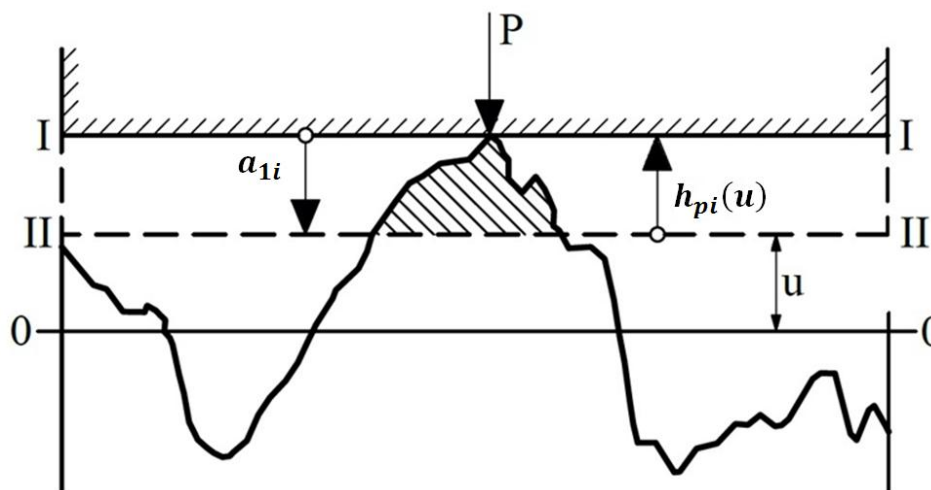
Detalju lineāro izmēru mērīšanā ir svarīgi noskaidrot, kādas ir sagaidāmās virsmas deformācijas. Tā kā mērīšanas procesam ir raksturīgas nelielas slodzes, nelieli kontakta laukumi un pieļaujamas ir tikai elastīgās deformācijas.

Lai precīzi noteiktu kopējo mērījumu kļūdu, ko ietekmē pieliktais spēks virsmas deformāciju ir nepieciešams sadalīt trīs daļās. Pirmā daļa ir virsmas raupjuma izciļņu deformācija a_1 , otrā daļa ir šo izciļņu nosēšanās a_2 , bet trešā ir pamatmateriāla deformācija a_3 . Shematiski, atsperu izskatā, tas ir attēlots 2.1. attēlā.



2.1. att. Kontakta shēma
a) kopējā; b) atsperu izskatā

Lai noteiktu detaļas virsmas izciļņu elastīgo deformāciju, pieņemsim, ka kontakts notiek starp raupju (mērāmā detaļa) virsmu un ideāli gludu un absolūti cietu (mērinstrumenta) virsmu. Šajā gadījumā pieliktā spēka P ietekmē ideālā virsma pārvietojas no stāvokļa I – I līdz stāvoklim II – II (2.2. att.), kurā iestājas līdzsvars starp pielikto spēku un izciļņu deformācijas pretestību. Uzskatīsim, ka šajā stāvoklī attālums starp ideālo un raupjo virsmu ir vienāds ar u .



2.2. att. Raupjas un ideāli gludas virsmas kontakts

2.1. Izciļņu deformācijas noteikšana

Tā kā virsmas raupjuma izciļņi ir izvietoti uz virsmas dažādos augstumos un ir neregulāras formas, tad elastības teorija nedod šāda izciļņu kontakta risinājumu. Ja skatam raupjas virsmas kontaktu, tad šajā kontaktteorijā parasti tiek pieņemts, ka virsmas raupjuma izciļņu deformāciju līmenis apstājas virs virsmas raupjuma vidējās plaknes, kas attēlā (2.2. att.)

parādīta ar līniju 0 – 0, līmenī u . Deformācijai tiek pakļauti tie virsmas izciļņi, kas atrodas virs šī deformācijas līmeņa. Tālāk aprēķinos ir izdevīgi pieņemt normēto deformācijas līmeni γ ($\gamma = u/\sigma$, kur σ ir gadījuma lauka vidējā kvadrātiskā novirze).

Ja raupjas virsmas izciļņu deformācija ir a_1 (2.1. att.), tad to var noteikt pēc sakarības [10]:

$$a_1 = (\gamma_0 - \gamma) \cdot \sigma, \quad (2.1)$$

kur

$\gamma_0 = St/\sigma$ – normētais deformācijas sākuma līmenis;

St – virsmas kopējais augstums.

Normētais deformācijas līmenis γ ir atkarīgs no izciļņu augstuma. Raupjas virsmas izciļņu augstums tiek atskaitīts no vidus līnijas (profila gadījumā) vai no vidus plaknes (3D virsmas gadījumā). Vispirms ir nepieciešams analizēt viena virsmas raupjuma izciļņa deformācijas.

2.2. Viena virsmas raupjuma izciļņa deformācijas analīze

Mūsu gadījumā tiks izmantots pēdējā laikā kontaktteorijā lietotais izciļņu modelis – eliptiskā paraboloida veidā. Šāds modelis dod iespēju ievērot izciļņu formu virsmas garen un šķērsvirzienā. Šāda izciļņa kontaktam var izmantot N.M. Beļajeva risinājumu – elipsoidālu virsmu kontaktam, kur vienu ķermeni pieņemam par ideālu cietu plakni, tad viena, brīvi izvēlēta, virsmas raupjuma izciļņa deformāciju a_{1i} var noteikt sekojoši [4]:

$$a_{1i} = \frac{3}{2} K(e) \frac{P_i \cdot \theta}{b_i}, \quad (2.2)$$

kur

$P_i = \frac{P}{N(\gamma)}$ – virsmas raupjuma izciļnim pieliktais spēks;

P – virsmai pieliktais spēks;

$N(\gamma)$ – virsmas raupjuma izciļņu skaits virs līmeņa γ ;

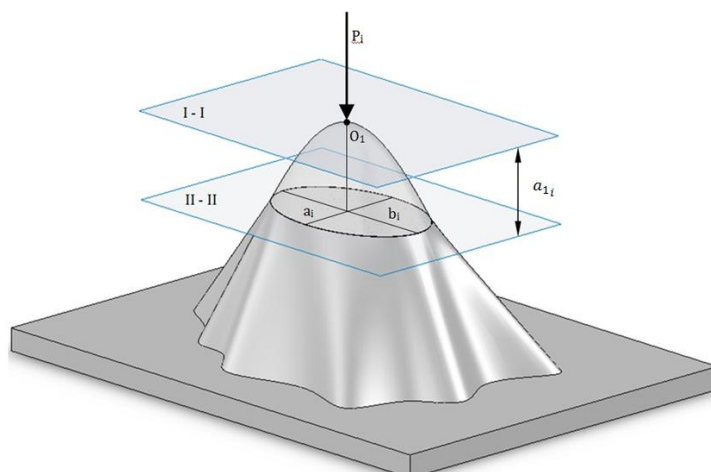
$K(e)$ – pirmās pakāpes pilnais eliptiskais integrālis;

$e = \sqrt{1 - \frac{a_i^2}{b_i^2}}$ – kontakta laukuma ekscentritāte;

b_i – virsmas raupjuma izciļņa eliptiskais kontakta laukuma garākā pusass (2.3. att.).

a_i – virsmas raupjuma izciļņa eliptiskais kontakta laukuma īsākā pusass (2.3. att.).

$\theta = \frac{1-\mu^2}{\pi \cdot E}$ – materiāla elastīgo īpašību konstante (E – elastības modulis, μ – Puasona koeficients).



2.3. att. Viena virsmas raupjuma izciļņa deformācija

No ideālas plaknes un virsmas raupjuma izciļņa kontakta shēmas (2.2. att.) redzams, ka deformācijas a_{1i} vērtība ir vienāda ar virsmas raupjuma izciļņa augstumu virs līmeņa u , ko apzīmē ar $h_{pi}(u)$. Līdz ar to no vienādojuma (2.2) varam iegūt vienam virsmas raupjuma izcilnim pieliktā spēka noteikšanas izteiksmi, ievietojot tajā eliptiskā paraboloīda pamatnes garākās pusass b_i vērtību, ko var noteikt pēc Herca formulas [4]:

$$P_i = \frac{2}{3 \cdot \theta} \cdot k'_q \cdot \frac{[h_{pi}(u)]^{3/2}}{H_i^{1/2}}, \quad (2.3)$$

kur

$H_i = (k_{1i} + k_{2i})/2$ – izciļņa vidējais liekums; k_{1i}, k_{2i} – izciļņa galvenie liekumi [1];

$k'_q = \frac{1}{K(e)} \cdot \left[\frac{E(e)}{K(e)(1-e^2)} \right]^{1/2}$ – koeficients, kas atkarīgs no virsmas raupjuma izciļņa ekscentritātes e .

No izteiksmes (2.3) vienam virsmas raupjuma izcilnim, ir iespējams turpinājumā iegūt vienādojumu visas virsmas raupjuma deformācijas noteikšanai.

2.3. Virsmas raupjuma izciļņu deformācijas noteikšana

Lai iegūtu izteiksmi kontakta laukumam pieliktā spēka P noteikšanai ir nepieciešams pārveidot vienādojumu (2.3), aizstājot šajā vienādojumā esošos viena virsmas raupjuma izciļņa mainīgos lielumus ar attiecīgiem mainīgajiem lielumiem pa kontakta laukumu. Tā kā virsmas raupjuma izciļņi pa virsmu ir izvietoti dažādos augstumos, kā arī šo izciļņu liekumi ir dažādi, tad izmantosim šo parametru matemātiskās sagaidāmās vērtības virs līmeņa γ :

$$E\{P\} \approx \frac{2}{3 \cdot \theta} \cdot k'_q \cdot \frac{E\{\xi_{p\gamma}\}^{3/2}}{E\{H\}^{1/2}} \cdot E\{N(\gamma)\}, \quad (2.4)$$

kur

$E\{P\}$ – virsmai pieliktā spēka matemātiskā sagaidāmā vērtība;

$E\{\xi_{p\gamma}\}$ – virsmas raupjuma izciļņu virsotņu augstuma matemātiskā sagaidāmā vērtība [3. nodaļa. nod.];

$E\{H\}$ – izciļņu vidējo liekumu matemātiskā sagaidāmā vērtība.

Lai noteiktu virsmas raupjuma deformāciju, ir lietderīgi pieņemt, ka pieliktais spēks ir sadalīts vienmērīgi pa kontakta laukumu, tad aprēķinu veikšanai ir ērtāk izmantot spiedienu uz kontakta laukumu:

$$q \approx \frac{2}{3 \cdot \theta} \cdot k'_q \cdot \frac{E\{\xi_{p\gamma}\}^{3/2}}{E\{H\}^{1/2}} \cdot E\{N_A(\gamma)\}, \quad (2.5)$$

kur

$q = \frac{P}{Aa}$ – spiediens uz kontakta laukumu, Aa – nominālais kontakta laukums, ko nosaka laukuma izmēri;

$N_A(\gamma) = \frac{N(\gamma)}{Aa}$ – virsmas raupjuma izciļņu skaits uz laukuma vienību.

Formula (2.5) rāda, ka virsmas raupjuma deformācijas noteikšanai ir jāzina virsmas raupjuma izciļņu virsotņu augstums $\xi_{p\gamma}$, izciļņu vidējais liekums H un virsmas raupjuma izciļņu skaits uz laukuma vienību $N_A(\gamma)$. Turpinājumā apskatīsim katru no šiem parametriem atsevišķi.

3. nodaļa RAUPJAS VIRSMAS IZCIĻŅU AUGSTUMA PĒTĪJUMI

Lai noteiktu izciļņu deformāciju, viens no būtiskākajiem parametriem ir virsmas izciļņu augstums. Darbā apskatītas un salīdzinātas trīs dažādas formulas virsmas izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvuma aprēķināšanai un virsmas izciļņu augstuma matemātiskās sagaidāmās vērtības noteikšanai tiem izciļņiem, kas atrodas virs nosacīta deformācijas līmeņa γ . Kontaktteorijā virsma tiek modelēta kā normāls gadījuma lauks. Šādam normālajam gadījuma laukam izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvuma likumu ir ieguvījis P.R. Naijaks, taču šī izteiksme ir praktiski nepiemērojama inženieruzdevumu risināšanai, tāpēc šajā darbā ir noskaidrots, ka esošo formulu ir iespējams aizstāt ar vienkāršāku sadalījuma likumu.

3.1. Virsmas izciļņu augstuma sadalījuma blīvums

Virsmas izciļņu augstuma sadalījuma likums 3D neregulāra rakstura virsmai (matemātiski – normālam gadījuma laukam) ir pētīts P.R. Naijaka darbā [2], kur virsmas izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvumu $f_{1\gamma}(\xi_p)$ var atrast dalot izciļņu virsotņu skaitu, kas atrodas līmenī $[\gamma, \gamma + d\gamma]$ ar visu virsmas izciļņu virsotņu skaitu virs līmeņa γ :

$$f_{1\gamma}(\xi_p) = \frac{E\{n_p(\gamma)\}}{E\{M_p(\gamma)\}}, \quad (3.1)$$

kur

$$\xi_p \quad - \quad \text{izciļņu augstuma normēta vērtība} \quad - \quad \xi_p = \frac{h_p}{\sigma};$$

$$E\{n_p(\gamma)\} \quad - \quad \text{izciļņu virsotņu skaita matemātiskā sagaidāmā vērtība līmenī} \quad [\gamma, \gamma + d\gamma];$$

$$E\{M_p(\gamma)\} \quad - \quad \text{visu virsmas virsotņu skaita matemātiskā sagaidāmā vērtība virs līmeņa} \quad \gamma.$$

Ievietojot sakarībā (3.1) $E\{n_p(\gamma)\}$ un $E\{M_p(\gamma)\}$ aprēķina formulas, iegūstam virsmas izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvumu $f_{1\gamma}(\xi_p)$ izciļņiem, kas atrodas virs līmeņa γ :

$$f_{1\gamma}(\xi_p) = \kappa_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ \frac{\lambda}{4} \sqrt{3(8 - 3\lambda^2)} \cdot \gamma \cdot e^{-\frac{4}{8-3\lambda^2}\gamma^2} + \frac{3\sqrt{2\pi}}{4} \lambda^2 (\gamma^2 - 1) e^{-\frac{\gamma^2}{2}} \phi \left(\sqrt{\frac{3\lambda^2}{8 - 3\lambda^2}} \gamma \right) \right. \\ \left. + 4 \sqrt{\frac{2\pi}{3(4 - \lambda^2)}} e^{-\frac{2}{4-\lambda^2}\gamma^2} \phi \left(\sqrt{\frac{4\lambda^2}{(4 - \lambda^2)(8 - 3\lambda^2)}} \gamma \right) \right\}, \quad (3.2)$$

kur:

$$\lambda \quad - \quad \text{bezizmēra parametrs} \quad \lambda = \frac{E\{n_1(0)\}}{E\{m_1\}}; \quad E\{n(0)\} \quad - \quad \text{nuļļu skaita matemātiskā sagaidāmā vērtība uz garuma vienību};$$

$$\kappa_1 \quad - \quad \text{raupjuma parametra} \quad \lambda \quad \text{un līmeņa} \quad \gamma \quad \text{funkcija};$$

$$\phi(\dots) \quad - \quad \text{Laplasa funkcija:} \quad \phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad \text{tās skaitliskās vērtības atrodamas [1].}$$

Tā kā P.R. Naijaka piedāvātā formula ir sarežģīta inženieraprēķinu veikšanai, tad ir svarīgi atrast vienkāršāku sadalījuma likumu, ar kuru aizstāt precīzo formulu. Darbā apskatīti divi biežāk lietotie varbūtību sadalījuma likumi: normālais sadalījuma (Gausa) likums un Releja likums. Iegūti vienādojumi virsmas izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvuma $f(\xi_p)$ noteikšanai pēc šiem likumiem:

Vienpusīgais normālā sadalījuma likums:

$$f_{2\gamma} = \frac{1}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma}{\sqrt{2}}\right)} \cdot \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\xi_p^2}, \quad \xi_p \geq 0 \quad (3.3)$$

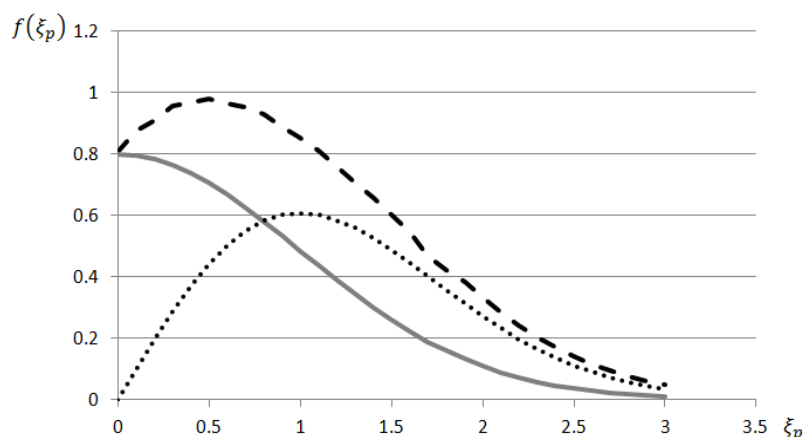
kur

$$\operatorname{erfc}(x) \quad - \quad \text{kļūdu integrālis} \quad \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} \cdot dt.$$

Releja likums:

$$f_{3\gamma}(\xi_p) = e^{\frac{1}{2}\gamma^2} \cdot \xi_p \cdot e^{-\frac{1}{2}\xi_p^2} = \xi_p \cdot e^{\frac{1}{2}(\gamma^2 - \xi_p^2)}. \quad \xi_p \geq 0 \quad (3.4)$$

Sadalījuma blīvuma grafiki doti 3.1. att. Attēlā redzams, ka sākot no vērtības $\xi > 1$ sadalījuma blīvuma izteiksmes tuvinās, pie tam tuvāk precīzajam sadalījuma blīvumam ir Releja sadalījuma blīvums. Līdz ar to Releja sadalījuma blīvumu diapazonam $\xi > 1$ var izmantot inženieruzdevumu risināšanai.



3.1. att. Virsmas izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvums

- P.R. Najjaka formula
- Vienpusīgais normālais sadalījuma likums
- Releja sadalījuma likums

3.2. Izciļņu augstuma matemātiskā sagaidāmā vērtība

Lai noteiktu izciļņu deformācijas un līdz ar to arī mērīšanas kļūdu, būtiski ir noteikt virsmas izciļņu augstuma matemātisko sagaidāmo vērtību. Tāpat kā iepriekš, arī virsmas izciļņu augstuma matemātisko sagaidāmo vērtība darbā noteikta ar P.R. Najjaka piedāvāto risinājumu, pēc vienpusīgā sadalījuma likuma un pēc Releja likuma.

P.R. Najjaks [2] savā pētījumā par raupjas virsmas gadījuma procesiem virsmas izciļņu virsotnes augstuma matemātisko sagaidāmo vērtību ir nosaka pēc formulas:

$$E_{1\gamma} = C_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ \frac{3\lambda^2 \sqrt{2\pi}}{4} (\gamma^2 + 1) \cdot e^{-\frac{\gamma^2}{2}} \cdot \phi(\beta_6 \gamma) + \frac{4\sqrt{\pi}\lambda}{\sqrt{3}} \cdot [1 - \phi(\beta_7 \gamma)] + \frac{\sqrt{6}\lambda}{\beta_7} \cdot \gamma e^{-\frac{\beta_7^2 \gamma^2}{2}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{6}} (4 - \lambda^2) \cdot e^{-\frac{2\gamma^2}{4 - \lambda^2}} \cdot \phi(\beta_8 \gamma) \right\}, \quad (3.5)$$

kur:

C_1 – normēts reizinātājs;

$$\beta_6 = \sqrt{\frac{3 \cdot \lambda^2}{8 - 3\lambda^2}} ; \quad \beta_7 = \sqrt{\frac{8}{8 - 3\lambda^2}} ; \quad \beta_8 = \sqrt{\frac{4\lambda^2}{(4 - \lambda^2)(8 - 3\lambda^2)}} .$$

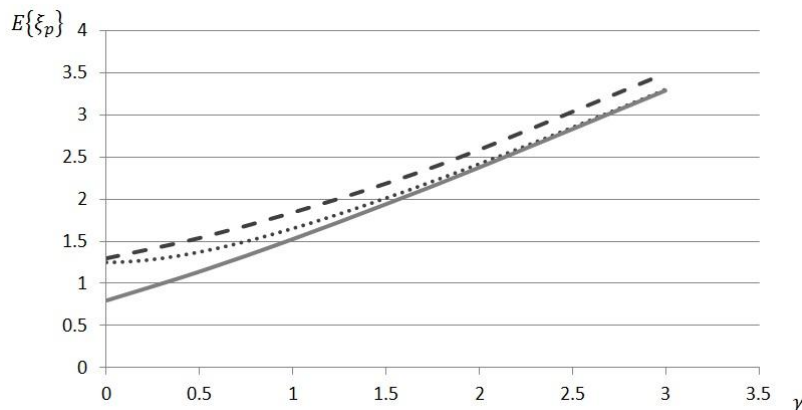
Virsmas izciļņu virsotnes augstuma matemātisko sagaidāmo vērtību pēc vienpusīgā normālā sadalījuma likuma nosaka pēc sekojošas izteiksmes:

$$E_2 \{ \xi_{p_\gamma} \} = \frac{2 \cdot e^{-\frac{1}{2}\gamma^2}}{\sqrt{2\pi} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\gamma}{2} \right)} . \quad (3.6)$$

Virsmas izciļņu virsotnes augstuma matemātiskā sagaidāmā vērtību pēc Releja likuma:

$$E_3 \{ \xi_{p_\gamma} \} = e^{\frac{1}{2}\gamma^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\gamma}{\sqrt{2}} \right) + \gamma \cdot e^{-\frac{1}{2}\gamma^2} \right] = e^{\frac{1}{2}\gamma^2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\gamma}{\sqrt{2}} \right) + \gamma . \quad (3.7)$$

Virsmas izciļņu augstuma matemātiskās sagaidāmās vērtības grafiki dotas 3.2. att. Attēlā redzams, ka sākot no vērtības $\gamma > 1$ virsmas izciļņu augstuma matemātiskās sagaidāmās vērtības izteiksmes tuvinās, pie tam tuvāk precīzajai vērtībai ir matemātiskā sagaidāmā vērtība pēc Releja likuma. Līdz ar to Releja likumu inženieruzdevumu risināšanai var izmantot diapazonam $\gamma > 1$.



3.2. att. Virsmas augstuma matemātiskā sagaidāmā vērtība

- P.R. Nijaka formula
- Vienpusīgais normālais sadalījuma likums
- Releja sadalījuma likums

3.3. Releja likuma izciļņu augstuma matemātisko sagaidāmo vērtību asimptotika

Kā jau iepriekš noskaidrojām, tad vistuvāk precīzajai, bet sarežģītājai P.R. Nijaka izciļņu augstuma matemātiskajās sagaidāmajās vērtības noteikšanas formulai ir Releja sadalījuma likums. No grafiski attēlotajām virsmas izciļņu augstuma matemātiskajām sagaidāmajām vērtībām 3.2. att. var redzēt, ka Releja likums tuvinās precīzajam likumam pie

augstiem līmeņiem($\gamma > 1.5$), tad iegūstam asimptotisku formulu izciļņu augstuma matemātiskai sagaidāmajai vērtībai:

$$E_4 \{ \xi_{p,\gamma} \} \sim \gamma + \frac{1}{\gamma}. \quad (3.8)$$

Visu iepriekš apskatīto izciļņu augstuma matemātiskās sagaidāmās vērtības noteikšanas sadalījuma likumu, precīzā formulas un Releja likuma asimptotiskas skaitliskās vērtības pie dažādiem deformācijas līmeņiem γ dotas 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Izciļņu augstuma matemātisko sagaidāmo vērtību salīdzinājums

γ	Precīzā formula	Vienpusīgais sadalījuma likums		Releja likums		Releja likuma asimptotiska	
	$E_{1\gamma}\{\xi_p\}$	$E_{2\gamma}\{\xi_p\}$	Novirze %	$E_{3\gamma}\{\xi_p\}$	Novirze %	$E_{4\gamma}\{\xi_p\}$	Novirze %
0	1,3032	0,7979	39%	1,2533	4%	-	-
0,5	1,5445	1,1411	26%	1,3764	11%	-	-
1,0	1,8254	1,5251	16%	1,6557	9%	-	-
1,5	2,1893	1,9387	11%	2,0158	8%	2,1667	1%
2,0	2,5897	2,3732	8%	2,4214	6%	2,5000	3%
2,5	2,6424	2,8227	7%	2,8543	8%	2,9000	10%
3,0	3,4922	3,2831	6%	3,3046	5%	3,3333	5%

3.4. Secinājumi

No iegūtajiem datiem varam secināt, ka precīzo formulu gan virsmas izciļņu augstuma varbūtību sadalījuma blīvuma noteikšanai, gan izciļņu augstuma matemātiskās sagaidāmās vērtības noteikšanai var aizstāt ar vienkāršāku. Vispiemērotākais precīzās formulas aizstāšanai ir Releja likums, bet pie augstiem līmeņiem ($\gamma > 1.5$) var izmantot Releja likuma asimptotiku.

4. nodaļa VIRSMAS RAUPJUMA IZCIĻŅU LIEKUMS UN TO SKAITS

4.1. Virsmas raupjuma izciļņu liekums

Raupjas virsmas izciļņu liekums ir svarīgs kontaktvirsmu parametrs. Tas raksturo virsmu īpašības berzē un nodilumā, kontakta cietību utt. Kā zināms no diferenciāl – ģeometrijas, virsmas vidējais liekums H , ir nosakāms kā galveno liekumu vidējā vērtība. Galveno liekumu summa vienāda ar liekumu summu, kas noteikta divos savstarpēji perpendikulāros virzienos [1]. Izciļņu virsotņu liekumu x un y virzienos nosaka:

$$H_x = \frac{\delta^2 h(x, y)}{\delta x^2}, \quad H_y = \frac{\delta^2 h(x, y)}{\delta y^2} \quad (4.1)$$

Gausa gadījuma lauka maksimuma punktos $\gamma \rightarrow \infty$ galveno liekumu vidējā vērtība:

$$E\{H_{1,2}\} = -\frac{[k_{22} + k_{33} \pm \sqrt{(k_{22} - k_{33} + 4k_{23})^2}] \cdot u}{2k_{11}}, \quad (4.2)$$

kur

$k_{11}, k_{22}, k_{33}, k_{23}$ – gadījuma lauka atvasinājumu korelācijas matricas elementi [10];

u – līmenis, virs kura apskatāmi lauka maksimumi.

Veicot pārveidojumus saskaņā ar J. Rudzīša pētījumiem [10] iegūstam, ka liekuma matemātiskā sagaidāmā vērtība ir:

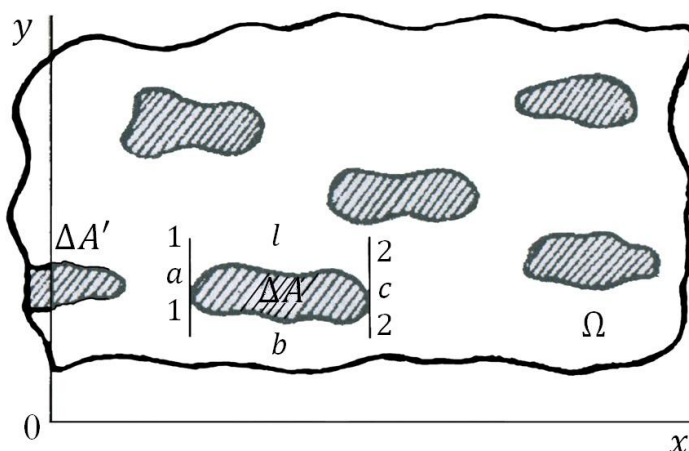
$$E\{H\} = \frac{1}{2}[E\{H_1\} + E\{H_2\}] = \frac{1}{2}\pi^2\sigma E^2\{n_1(0)\} \cdot (1 + c^2)\gamma; \quad (4.3)$$

Izotropai detaļai virsmai (vienveidīgai) pie $c = 1$:

$$E\{H_{vid}\} = \pi^2 E^2\{n_1(0)\} \sigma \gamma.$$

4.2. Virsmas raupjuma izciļņu skaits

Ar virsmas $h(x, y)$ izciļņu skaitu virs līmeņa u , saprot to raupjas virsmas daļu, kas krusto plakni līmenī u . Skats no augšas uz šķēluma plakni parādīts 5.1. att. Šķēlumu laukumi ir aizsvītroti.



4.1. att. Virsmas izciļņu skaita aprēķina shēma [10]

Izciļņu skaitu (šķēlumu laukumi) $N(\gamma)$ pētāmajā apgabalā Ω , var noteikt no kopējo

maksimumu un minimumu skaita starpības, kas atrodas uz līknei $a b c$ līdzīgām līknēm, par cik to maksimumu skaits ir par vienu lielāks nekā minimumu skaits. Tad vidējais izciļņu skaits uz laukuma vienību [10]:

$$E\{N(\gamma)\} \approx E\{m_i(\gamma)\} - E\{m_a(\gamma)\}, \quad (4.4)$$

kur

$E\{m_i(\gamma)\}, E\{m_a(\gamma)\}$ – attiecīgi minimumu un maksimumu vidējais skaits līknes l apakšējā daļā līmenī γ , kas atskaitīts no vidusplaknes.

Normālajam sadalījuma likumam var iegūt salīdzinoši vienkāršu rezultātu, tad virsmas izciļņu skaitu uz laukuma vienību varam aprēķināt pēc sekojošas izteiksmes:

$$E\{N_A(\gamma)\} \approx \frac{\pi c E^2\{n_1(0)\}}{2\sqrt{2\pi}} \cdot \gamma e^{-\frac{\gamma^2}{2}}, \quad (4.5)$$

kur

$N_A(\gamma) = \frac{N(\gamma)}{Aa}$ – virsmas raupjuma izciļņu skaits uz laukuma vienību;

Aa – nominālais kontakta laukums, ko nosaka laukuma izmēri.

5. nodaļa VIRSMAS DEFORMĀCIJAS NOTEIKŠANA

5.1. Virsmas raupjuma izciļņu deformācijas

Lai noteiktu virsmas raupjuma izciļņu deformācijas izmantosim iepriekšējās nodaļās iegūtās vērtības. Virsmas raupjuma izciļņu virsotņu augstuma matemātiskās sagaidāmās vērtības noteikšanai izmantosim Releja likuma asimtotiku (3.8), virsmas liekuma matemātiskās sagaidāmās vērtības noteikšanai izmantosim vienādojumu (4.3), virsmas raupjuma izciļņu skaits uz laukuma vienību virs līmeņa γ formulu (4.5). Ievietojot vienādojumā (2.5) šīs izteiksmes un veicot saīsināšanu, iegūstam spiediena uz kontaktaukumu aprēķina vienādojumu:

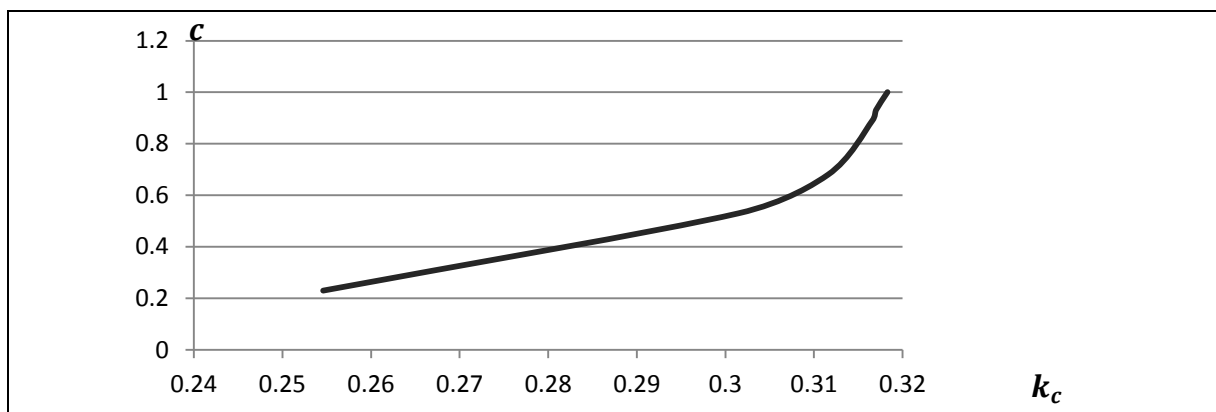
$$q = \frac{\sigma \cdot E\{n_1(0)\}}{3\sqrt{\pi} \cdot \theta} \cdot \frac{k_q' \cdot c}{\sqrt{(1+c^2)}} \cdot \sqrt{\left(\gamma + \frac{1}{\gamma}\right)^3 \cdot \gamma \cdot e^{-\gamma^2}}. \quad (5.1)$$

Lai vienādojumu (5.1) būtu iespējams lietot inženieruzdevumu risināšanai, teorētiskos parametrus σ un $n_1(0)$, aizstāsim ar praksē lietotajiem standarta parametriem Sa (virsmas raupjuma vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes) un RSm (virsmas raupjuma vidējais solis). Vienādojuma (5.1) daļu $\sqrt{\left(\gamma + \frac{1}{\gamma}\right)^3 \cdot \gamma \cdot e^{-\gamma^2}}$ aizstājam ar funkciju $t(\gamma)$:

$$t(\gamma) \approx 2 - \frac{1}{2} \cdot \gamma. \quad (5.2)$$

($\gamma = 1.0 - 4.0$)

Vienādojuma (5.1) daļu $\frac{k_q' \cdot c}{\sqrt{(1+c^2)}}$ aizstājam ar koeficientu k_c , kas atkarīgs no virsmas anizotropijas. Šī koeficienta atkarība no virsmas anizotropijas ir parādīta 5.1. att.



5.1. att. Koeficienta k_c atkarība no virsmas anizotropijas c

Līdz ar to vienādojumu (5.1) varam uzrakstīt sekojošā veidā:

$$q = \frac{\sqrt{2}}{3 \cdot \theta} \cdot \frac{Sa}{RSm} \cdot k_c \cdot \left(2 - \frac{1}{2} \cdot \gamma\right). \quad (5.3)$$

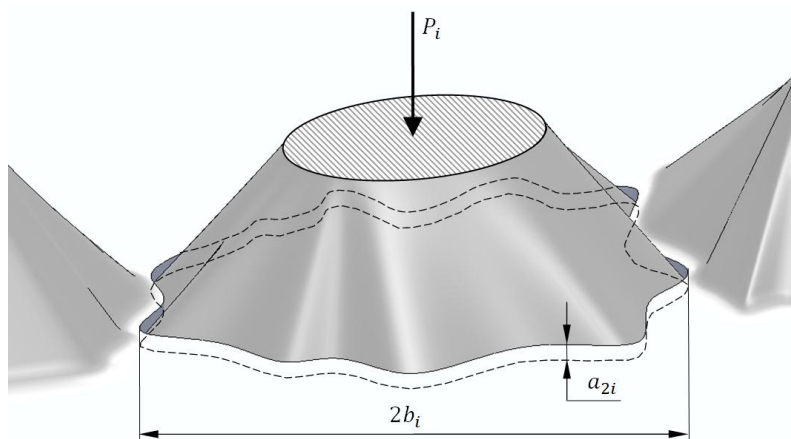
No vienādojuma (5.3) ir iespējams iegūt mainīgo lielumu γ un ievietojot to vienādojumā (2.1) iegūstam formulu virsmas raupjuma deformācijas a_1 noteikšanai un vienkāršojot šo

formulu inženieruzdevumu risināšanai, varam rakstīt:

$$a_1 \approx St - 5Sa \cdot \left(1 - \frac{q}{E} \cdot \frac{RSm}{Sa}\right). \quad (5.4)$$

5.2. Virsmas raupjuma izciļņu nosēšanās

Divu virsmu kontaktā izciļņi, it īpaši augstākie no tiem, pieliktā spēka ietekmē, ne tikai deformējas, bet notiek arī to vertikāla pārvietošanās jeb nosēšanās (5.2. att.). Nosēšanās a_2 lielums tāpat kā izciļņa deformācija ir atkarīgs no pieliktā spēka lieluma un no materiāla fizikāli mehāniskajām īpašībām.

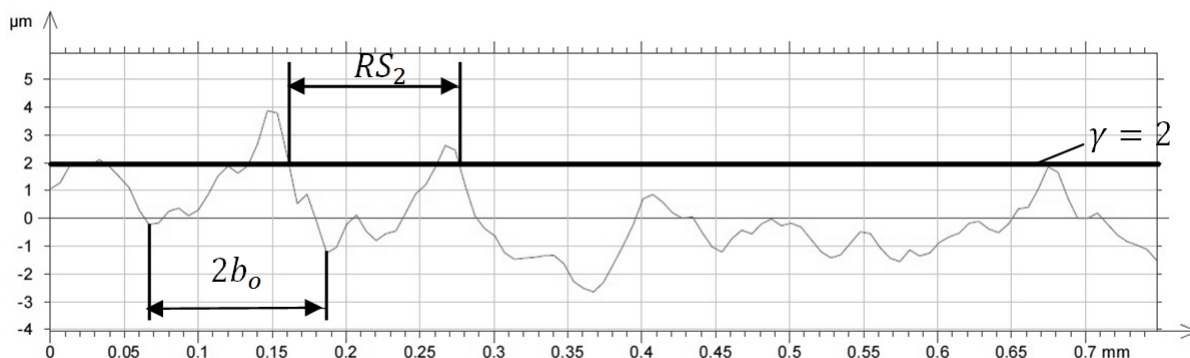


5.2. att. Izciļņa nosēšanās

Saskaņā ar L.A. Gaļina pētījumiem [5] šo izciļņu nosēšanos ir iespējams noteikt pēc sekojošas formulas:

$$a_{2i} = \frac{K(e) \cdot \theta \cdot P_i}{b_{2i}}. \quad (5.5)$$

Parametrs b_{2i} raksturo attālumu starp izciļņu ieplakām, tādējādi to var noteikt arī kā attālumu starp izciļņu virsotnēm. Šajā gadījumā mūs interesē tikai augstie izciļņi, kas atrodas virs līmeņa $\gamma = 2$, tad $E\{b_{2i}\}$ ir aptuveni vienāds ar RS_2 , kur RS_2 ir soli pa līniju līmenī $\gamma = 2$ (skat. 5.3. att.).



5.3. att. Virsmas raupjuma izciļņu solis pa līniju RS_2 līmenī $\gamma = 2$

Līdz ar to viena virsmas izciļņa nosēšanos var aprēķināt:

$$a_{2i} = \frac{K(e) \cdot \theta \cdot P_i \cdot e^{-2}}{RSm}. \quad (5.6)$$

Aprēķinot viena izciļņa nosēšanos, kontakta laukums ir pa visu izcilni, bet aprēķinot

izciļņu nosēšanas kontakta laukumā starp mērinstrumenta uzgali un mērāmo detaļu aprēķina formulā ir jāņem vērā ne tikai pieliktais spēks, bet arī kontakta laukums. Tāpēc aprēķinos ir lietderīgi izmantot īpatnējo spiedienu q . Līdz ar to, lai noteiktu nelīdzenu nosēšanas visā detaļas un mērinstrumenta uzgaļa kontakta laukumā, iegūto viena izciļņa nosēšanās vienādojumu pārveidojam sekojoši:

$$a_2 = \frac{K(e) \cdot \theta \cdot e^{-2} \cdot q}{RSm \cdot N_A(\gamma)}, \quad (5.7)$$

kur

$q = \frac{P}{Aa}$ – īpatnējais spiediens, Aa – nominālais kontakta laukums;

$N_A(\gamma) = \frac{N(\gamma)}{Aa}$ – virsmas izciļņu skaits uz laukuma vienību saskaņā ar vienādojumu (4.5).

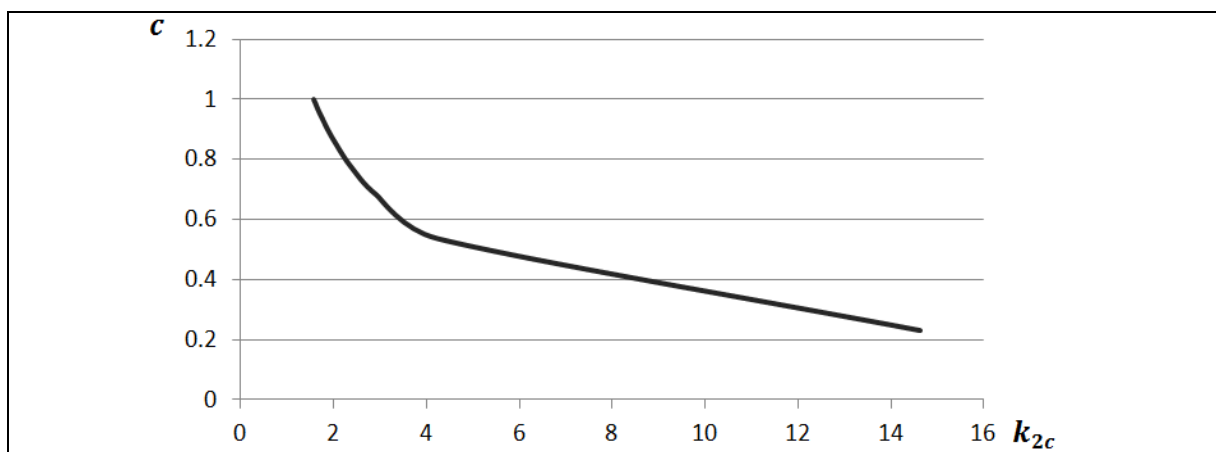
Ievietojot vienādojumu (4.5) sakarībā (5.7) iegūstam vienkāršu un inženieraprēķiniem piemērotu formulu nelīdzenu nosēšanās vērtības iegūšanai:

$$a_2 = \frac{q \cdot \theta \cdot RSm}{2\sqrt{2\pi}} \cdot k_{2c}, \quad (5.8)$$

kur

$k_{2c} = \frac{K(e)}{c}$ – koeficients, kas atkarīgs no virsmas izciļņu ekscentritātes.

Koeficienta k_{2c} vērtības pie dažādām anizotropijas koeficienta c vērtībām parādītas 5.4. att.



5.4. att. Koeficienta k_{2c} atkarības no virsmas anizotropijas c

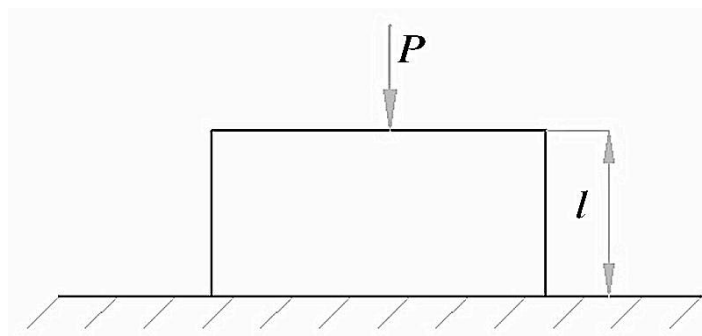
Šajā darbā aprakstītajam gadījumam – augsti elastīga materiāla detaļu mērīšanai, ir pieņemts, ka anizotropijas koeficients $c = 1$ un materiāla šķērsdeformācijas koeficients (Puasona koeficients) $\mu = 0$. Vienkāršojot šo formulu inženieruzdevumu risināšanai, vienādojumu (5.8) varam uzrakstīt sekojoši:

$$a_2 \approx 0.1 \cdot RSm \cdot \frac{q}{E}. \quad (5.9)$$

5.3. Pamatmateriāla deformācijas noteikšana

Detaļu lineāro izmēru mērīšanai ir raksturīgas nelielas slodzes, nelieli kontakta laukumi un pieļaujamas ir tikai elastīgās deformācijas, līdz ar to šajā darbā ir apskatīti tikai tādi gadījumi, kad kontakts ir elastīgs. Balstoties uz klasisko elastības teoriju, izveidotas sakarības,

kas saista mērišanas spēku un detaļas virsmas deformāciju.



5.5. att. Spiedes noslogojuma shēma

Pamatmateriāla deformāciju aprēķināšanai var izmantot klasiskās elastības teorijas formulas. Uzskatīsim, ka mūsu gadījumā darbojas tikai normālais spriegums (tangenciālais nedarbojas), tad deformācijas a_3 aprēķināšanai varam izmantot Huka likumu. Lai noteiktu pamatmateriāla deformāciju, ir lietderīgi pieņemt, ka pieliktais spēks ir sadalīts vienmērīgi pa kontakta laukumu, tad aprēķinu veikšanai ir ērtāk izmantot spiedienu uz kontakta laukumu q . Pašas vienkāršākas formas (5.5. att.) ķermenim Huka likumu varam uzrakstīt sekojošā veidā:

$$a_3 = \frac{q}{E} \cdot l, \quad (5.10)$$

kur

l – ķermeņa sākotnējais augstums;

E – elastības modulis jeb Junga modulis pamatmateriālam;

$q = \frac{P}{Aa}$ – spiediens uz laukuma vienību, Aa – nominālais kontakta laukums.

5.4. Augsti elastīgu materiālu detaļu raupjas virsmas deformācijas noteikšana

Ņemot vērā, ka raupjas virsmas deformācijas ir sadalīta trīs daļās (virsmas raupjuma izciļņu deformācija a_1 , šo izciļņu nosēšanās a_2 un pamatmateriāla deformācija a_3), kopējo raupjas virsmas deformāciju a aprēķina pēc sekojošas formulas:

$$a = a_1 + a_2 + a_3, \quad (5.11)$$

kur

a_1 – virsmas raupjuma izciļņu deformācija;

a_2 – virsmas raupjuma izciļņu nosēšanās;

a_3 – pamatmateriāla deformācija.

Līdz ar to varam izmantot iegūtos, inženieraprēķiniem piemērotos, šo atsevišķo kopējās deformācijas daļu aprēķina vienādojumus un veicot saīsināšanu, iegūstam vienādojumu virsmas kopējās deformācijas aprēķināšanai:

$$a \approx \frac{q}{E} \cdot \left[l + 1.1 \cdot RSm + \frac{E}{q} (St - 5 \cdot Sa) \right]. \quad (5.12)$$

Inženieraprēķinu veikšanai un praktiskam pielietojumam, ērtāk ir lietot normēto deformācijas lielumu ζ , ko normē virsmas deformāciju a ar mērāmās detaļas nominālizmēru l :

$$\zeta = \frac{a}{l}, \quad (5.13)$$

kur

a – virsmas deformācija (5.12);

l – mērāmās detaļas nominālizmērs.

Normētā deformācijas lieluma ζ skaitliskās vērtības dažādiem mērinstrumentiem un dažādiem detaļas materiāla elastības moduļiem E , dotas 7.4. tabulā.

6. nodaļa ANALĪTISKO FORMULU EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE

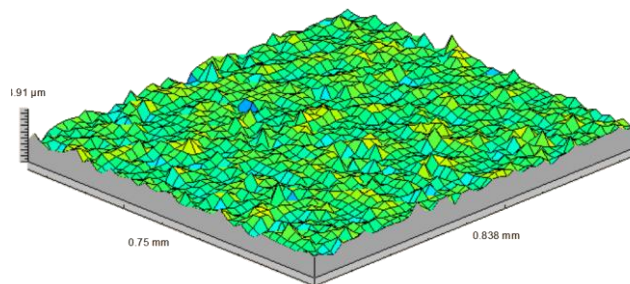
Pētījuma ietvaros veikti eksperimenti ar mērķi pārbaudīt iegūtās virsmas deformācijas aprēķina formulas derīgumu augsti elastīgu materiālu detaļu deformāciju novērtēšanai.

Eksperimentālai pārbaudei tika sagatavoti 10 gumijas paraugi ar elastības moduli $E = 5 \text{ N/mm}^2$. Paraugu nominālie izmēri: 28x20x9 mm.



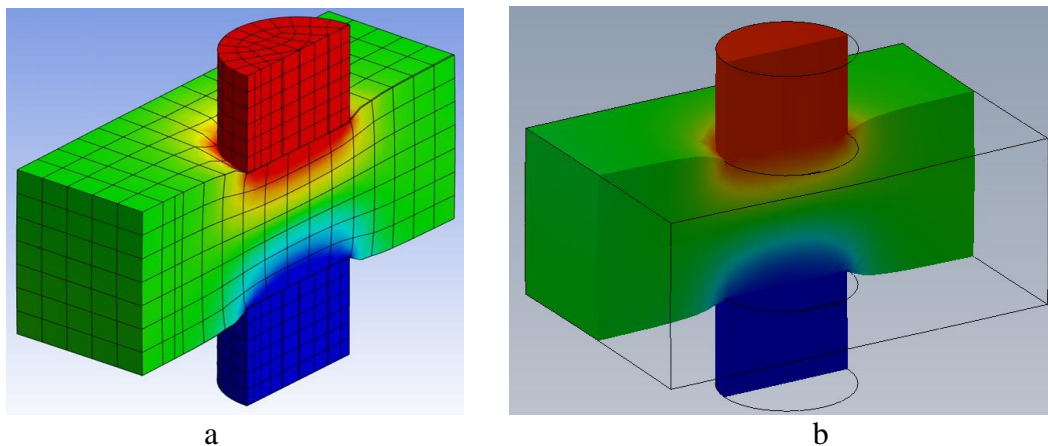
6.1. att. Sagatavotais paraugs

Pirms lineāro izmēru mērīšanas ar kontaktmērīšanas metodēm, paraugiem tika noteikta virsmas mikrotopogrāfija ar profilogrāfu – profilometru *Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50* un noteikti lineārie izmēri ar 3D koordinātu mērīšanas iekārtu *MahrVision MS222* (6.4. att.) ar bezkontakta mērīšanas metodi.



6.2. att. Eksperimentālā parauga mikrotopogrāfija

Virsmas deformāciju novērtēšanai paraugi tika mērīti ar trīs dažādiem mikrometriem, indikatoru skavu un digitālo garuma mērīšanas sistēmu TESA TG 30. Kā vēl viena eksperimentāla datu pārbaudes metode, tika izmantota datormodelēšana. Šim nolūkam tika izmantotas programmas ANSYS un SolidWorks.



6.3. att. Programmā ANSYS (a) un SolidWorks (b) veidots mērīšanas modelis

Datormodelēšana tika simulēts mērīšanas process ar digitālo mikrometru.

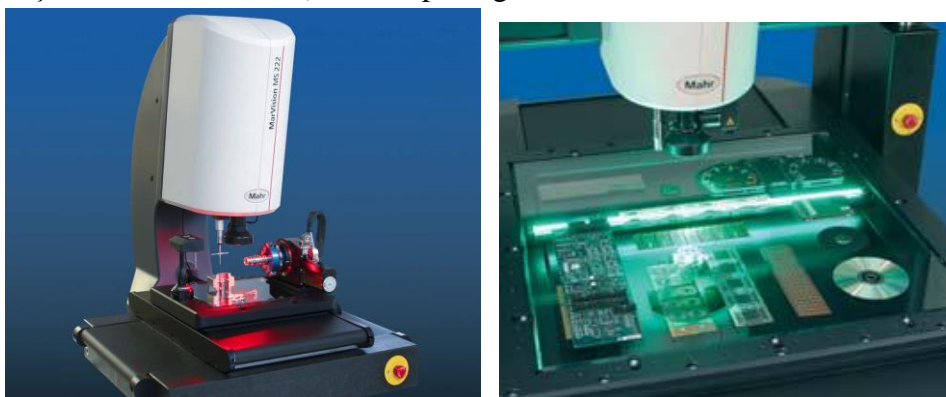
6.1. Eksperimentālo paraugu lineāro izmēru mērīšana

Eksperimentu veikšanai, tika izvēlēti desmit paraugi no gumijas ar elastības moduli $E = 5 \text{ N/mm}^2$. Pirms lineāro izmēru mērīšanas šiem paraugiem tikai iegūti virsmas raupjuma un profila parametri. Lai pēc iespējas precīzāk novērtētu deformācijas, kas rodas mērīšanas spēka ietekmē, paraugu lineāro izmēru mērīšanas notika sekojošā secībā:

- 1) visi paraugi tikai mērīti ar bezkontakta metodi,
- 2) paraugiem tika noteikti virsmas raupjuma parametri,
- 3) katrs paraugs tika mērīts ar trīs dažādām kontaktmērīšanas metodēm.

Starp katru no kontaktmērīšanas metodēm paraugi vēlreiz tika mērīti ar bezkontakta metodi un noteikts to virsmas raupjums, lai pārliecinātos, ka nav notikušas paraugu plastiskās deformācijas.

Eksperimentālo paraugu lineāro izmēru bezkontakta mērīšanai tika izmantots 3D koordinātu mērīšanas iekārta *MahrVision MS222* (6.4. att.). izmatotā mērīšanas metode ļauj precīzi (iedaļas vērtība 0.001 mm) noteikt parauga biezumu.



6.4. att. MahrVision MS222

Eksperimentu gaitā, katrs no paraugiem tika mērīts 10 reizes, nomērot paraugu visā to garumā 10 punktos.

6.1. tabula

Bezkontakta mērīšanas iekārtas mērījumu vidējās vērtības

Parauga Nr.	Gumijas paraugu biezums [mm]
1	8.861
2	9.009
3	8.852
4	8.876
5	8.679
6	8.911
7	9.460
8	8.647
9	8.885
10	8.454

Eksperimentālo mērījumi ar kontaktmērīšanas metodes, kā jau iepriekš minēts tika veikti ar gludo mikrometru (mērīšanas spēks 7N), digitālais mikrometrs (mērīšanas spēks 3 N),

digitālo mērīšanas sistēmu TESA TG 30 (mērīšanas spēks 2N) un indikatora skavu (mērīšanas spēks 9 N). Iegūtās vidējās vērtības apkopotas 6.2. tabulā.

6.2. tabula

Eksperimentālo paraugu mērījumu ar kontaktmērīšanas metodes rezultātu vidējās vērtības

Paraugs	MĒRINSTRUMENTI			
	Gludais mikrometrs	Digitālais mikrometrs	TESA TG-30	Indikatora skava
	iedaļas vērtība (mm)			
	0.01	0.001	0.0001	0.01
Nr.p.k.				
1	8.66	8.676	8.7722	8.62
2	8.84	8.845	8.9346	8.79
3	8.76	8.713	8.8033	8.71
4	8.61	8.646	8.6766	8.57
5	8.34	8.319	8.5085	8.30
6	8.67	8.751	8.7879	8.63
7	9.25	9.248	9.3922	9.21
8	8.40	8.484	8.5923	8.35
9	8.66	8.664	8.7792	8.61
10	8.25	8.215	8.3693	8.19

6.2. Mērīšanas procesa datormodelēšana

Kā jau iepriekš tika minēts, šajā dabā, deformācijas analītisko aprēķinu pārbaudei, tika izmantota arī datormodelēšana. Tika izvēlētas divas šobrīd pasaulē bieži izmantotās inženieraprēķinu veikšanai piemērotas programmas ANSYS un SolidWorks. Datorsimulācijas tika veiktas gadījumam (pēc shēmas, kas parādīta 6.3. att.), kad gumijas detaļa ar elastības moduli $E = 5 \text{ N/mm}^2$ un ar 3D koordinātu mērīšanas iekārtas *MahrVision MS222* iegūtajiem izmēriem tik spiesti ar tērauda cilindriskiem stieņiem, kas atbilst digitālā mikrometram parametriem. Iegūtie deformācijas lieluma rezultāti apkopoti 6.3. tabulā.

6.3. Analītisko un eksperimentālo rezultātu analīze

Veicot analītiskos aprēķinu tika izmantoti attiecīgo virsmu raupjuma vērtības, kas iegūtas pirms kontaktmērījumu veikšanas. Kā jau iepriekš tika rakstīts, tad, katram paraugam pirms un pēc kontaktmērījumu veikšanas, tika nomērīts virsmas raupjums. Apkopojot visus iegūtos eksperimentālos rezultātus un analītiski aprēķinātās deformācijas vienā tabulā (6.3. tabulā), ir aprēķināta arī novirze starp reālo (eksperimentāli iegūto) deformāciju un analītiski vai datormodelēšanā iegūto deformācijas vērtību procentos.

Analītisko aprēķinu un eksperimentālo mērījumu datu salīdzinājums

Nr. p.k.	MarVision MS 222	Digitālais mikrometrs	Deformācija	Aprēķinātā deformācija	Novirze	ANSYS	Novirze	Solid-Works	Novirze
1	8.861	8.656	0.205	0.202	1%	0.190	8%	0.187	9%
2	9.009	8.799	0.210	0.206	2%	0.192	8%	0.189	10%
3	8.852	8.646	0.206	0.202	2%	0.189	8%	0.186	10%
4	8.876	8.671	0.205	0.203	1%	0.188	8%	0.185	10%
5	8.679	8.476	0.203	0.199	2%	0.190	7%	0.187	8%
6	8.911	8.702	0.209	0.204	3%	0.190	9%	0.187	10%
7	9.46	9.240	0.220	0.215	2%	0.202	8%	0.199	10%
8	8.647	8.442	0.205	0.198	3%	0.193	6%	0.190	7%
9	8.885	8.678	0.207	0.203	2%	0.191	8%	0.188	9%
10	8.454	8.256	0.198	0.194	2%	0.181	8%	0.178	10%

6.4. Secinājumi

Veikto eksperimentālo, analītisko un datormodelēšanas pētījumu rezultātā, varam secināt:

- 1) Novirze starp eksperimentāli nomērīto paraugu reālo deformāciju un analītiski aprēķināto prognozējamo deformāciju ir 1% līdz 3% robežās, līdz ar to secināts, ka ir principiāla teorijas un eksperimentu sakritība.
- 2) Novirze starp eksperimentāli nomērīto paraugu reālo deformāciju un datormodelēšanas programmās ANSYS un SolidWorks izstrādāto galīgo elementu modeļu iegūto deformāciju ir 7% līdz 10% robežās, līdz ar to secināts, ka ir principiāla datormodelēšanas programmās ANSYS un SolidWorks izstrādāto galīgo elementu modeļu un eksperimentu sakritība.
- 3) Analītiskā deformācijas noteikšanas formula un eksperimentālie mērījumi salīdzināti ar datormodelēšanas programmās ANSYS un SolidWorks izstrādātiem galīgo elementu modeļiem. Iegūts, ka datormodelēšanas modeļu deformācijas vērtības ir mazākas par eksperimentāli un analītiski iegūtajām deformācijas vērtībām. Tas saistīts ar to, ka datormodelēšanā nav ievērotas virsmas raupjuma deformācijas. Analītiskiem aprēķiniem iegūtās formulas ir principiāli pareizas un tuvas datormodelēšanas programmās izstrādātiem galīgo elementu modeļiem.

7. nodaļa AUGSTI ELASTĪGU MATERIĀLU DETAĻU MĒRĪŠANAS UN MĒRINSTRUMENTU IZVĒLES METODIKA

Dotās metodikas uzdevums ir novērtēt augsti elastīgu materiālu detaļu mērījumu kļūdu, izmantojot trīs virsmas deformāciju aprēķina metodes.

Standartā (ГОСТ 8.051-1981) [12] ir 15 mērījuma maksimāli pieļaujamo kļūdu rindas, kas nav jāskaitļo. Mērīšanas kļūdas pieļaujamās vērtības ir pieņemtas no 20% līdz 35% no pielaišanas vērtības. Mērījumu kļūdu pieļaujamās vērtības dotas šīs metodikas 7.3. tabulā.

7.1. Vispārīgie noteikumi

1. Mērot detaļu izmērus ar universāliem mērīšanas līdzekļiem, nākas ievērot arī mērāmās detaļas virsmas raupjumu. Atsevišķos gadījumos mērījumu kļūda ir pielīdzināma raupjuma virsotņu deformācijai.
2. Precīzu detaļu mērīšanā, kuru izgatavošanas pielaišanas ir daži mikrometri, pieļaujamā mērījumu kļūda ir 20 – 35% no izgatavošanas pielaišanas. Šādos gadījumos ir jāreķinās ar novirzēm, kas rodas virsmas izciļņu deformācijas rezultātā.
3. Metodika paredzēta mērījumu kļūdas noteikšanai augsti elastīgu ($E = 200N/mm^2$) materiālu detaļu mērīšanā ražošanas uzņēmumos un mērīšanas laboratorijās.
4. Metodika nosaka augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērīšanas un mērījumu kļūdas noteikšanas secību.
5. Šī metodika var kalpot kā pamats atsevišķu augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanas vai mērījumu kļūdas noteikšanas metodikas izstrādei.
6. Šo metodiku ir iespējams papildināt ar citiem mērīšanas instrumentiem un materiāliem, atbilstoši ražošanas uzņēmuma specifikai un materiāli–tehniskajai bāzei.

7.2. Mērīšanas instrumentu izvēle

No pareizas mērīšanas instrumentu izvēles ir atkarīga tehniskās kontroles efektivitāte kā no metroloģiskā, tā arī no ekonomiskā viedokļa. Zinot detaļas nominālizmēru un izgatavošanas pielaišanu, mērīšanas instrumenta izvēles secība ir sekojoša:

- 1) Izmantojot 7.3. tabulu atrod pieļaujamo mērījumu robežkļūdu $[\Delta_{mēr}]$;
- 2) No 7.2. tabulas izvēlās mērīšanas instrumentus, kuru mērīšanas kļūda Δ_{instr} ietilpst pieļaujamās mērījumu kļūdas robežās:

$$\Delta_{instr} < [\Delta_{mēr}]. \quad (7.1)$$

Lai gan noteiktai mērīšanas robežkļūdai atbilst vairāki mērīšanas instrumenti, jāņem vērā, ka ir jāizvēlas tādu mērīšanas metodi un mērīšanas līdzekļus, kas nodrošina nepieciešamo kontroles precizitāti, būtiski nepalielinot produkcijas izmaksas, pārāk sarežģītas vai pārāk ilgstošas kontroles dēļ.

7.3. Mērījumu kļūdas noteikšana

Mērījumu kļūdas pilnais aprēķins

Lai noteiktu augsti elastīgu materiālu detaļu mērījumu kļūdu, izmantojot virsmas kontaktdeformācijas aprēķina formulu (7.2), pēc tam, kad ir noteikti aprēķiniem nepieciešamie virsmas raupjuma un mērāmās detaļas fizikāli – mehāniskie parametri, nepieciešams veikt sekojošus uzdevumus:

- 1) Izdara mērīšanas instrumentu izvēli, atbilstoši šīs metodikas 7.2. nodaļas norādījumiem un no 7.2. tabulas iegūstam spiedienu un virsmu (q);

2) Aprēķina kopējo virsmas deformāciju, mērīšanas spēka ietekmē, izmantojot izteiksmi:

$$a \approx \frac{q}{E} \cdot \left[l + 1.1 \cdot RSm + \frac{E}{q} (St - 5 \cdot Sa) \right]. \quad (7.2)$$

3) Iegūto deformācijas a vērtību summē ar mērīšanas kļūdu, izvēlētajam mērinstrumentam:

$$\Delta_{m\acute{e}r} = a + \Delta_{instr} \quad (7.3)$$

4) Pārbauda vai iegūtā vērtība nepārsniedz pieļaujamo mērījumu robežkļūdu $[\Delta_{m\acute{e}r}]$:

$$\Delta_{m\acute{e}r} \leq [\Delta_{m\acute{e}r}]$$

Ja iegūtā mērījumu kļūda $\Delta_{m\acute{e}r}$ pārsniedz pieļaujamo $[\Delta_{m\acute{e}r}]$, tad ir jāizvēlas cits mērinstruments ar mazāku spiedienu un virsmu (q). Gadījumos, kad aprēķinātā mērījuma kļūda instrumentam ar mazāko spiedienu uz virsmu pārsniedz pieļaujamo mērījumu kļūdu, esošās detaļas mērīšanai ir jāizvēlas bezkontakta mērīšanas metodes.

Mērījumu kļūdas grafiska noteikšana

Lai noteiktu augsti elastīgu materiālu detaļu mērījumu kļūdu, mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekmē, izmantojot grafiku (7.1. att.), nepieciešams veikt sekojošus uzdevumus:

- 1) Izdara mērinstrumentu izvēli, atbilstoši šīs metodikas 7.2. nodaļas norādījumiem;
- 2) Pēc grafika (7.1. att.) nosaka deformācijas, ko rada izvēlētais mērinstruments;
- 3) Iegūto deformācijas a vērtību summē ar mērīšanas kļūdu, izvēlētajam mērinstrumentam (7.3):

$$\Delta_{m\acute{e}r} = a + \Delta_{instr}$$

- 4) Pārbauda vai iegūtā mērījumu kļūdas vērtība nepārsniedz pieļaujamo mērījumu robežkļūdu $[\Delta_{m\acute{e}r}]$:

$$\Delta_{m\acute{e}r} \leq [\Delta_{m\acute{e}r}]$$

7.1. tabula

Augsti elastīgu materiālu elastības modulis (E)

Materiāls	Elastības modulis (E) [N/mm ²]
Mīksta gumija	1.1 – 1.5
Teflons	3
Vulkanizētā gumija	5 – 10
Politelēns	7
Kaučuks	7.9
Polipropilēns	13
Celulozes	14
Neilons	24
Akrils	30
PVC	34
Polistirols	34
Melamīns	70
Urīnvielas formaldehīda, celulozes piepildīts	70 – 170
Acetāls	70
Karbamīda formaldehīds	100
Epoksīda sveķi	200
Fenola formaldehīds	170 – 350

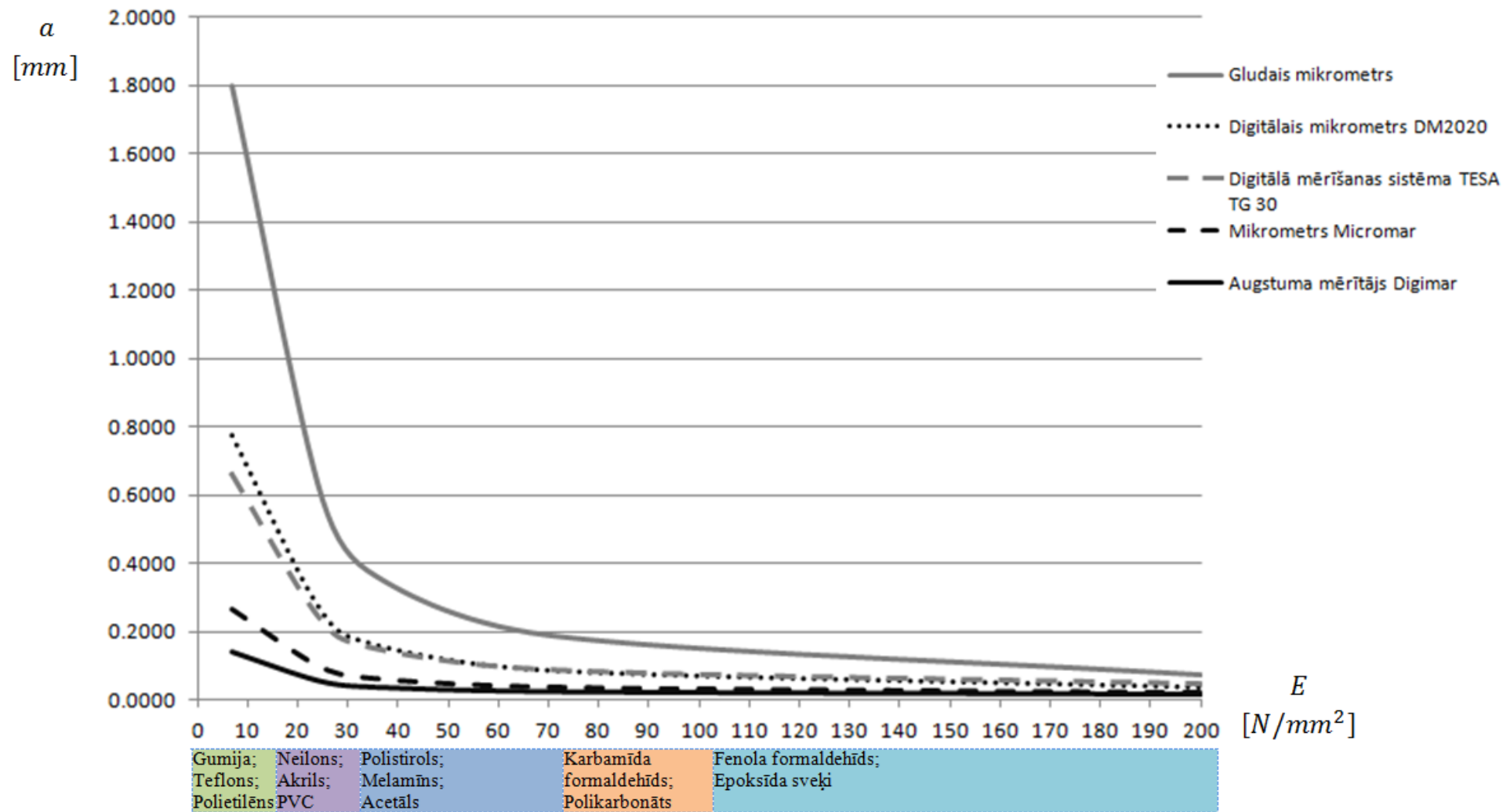
Mērinstrumentu parametri

Mērinstrumenta nosaukums	Mērīšanas robežklūda Δ_{instr} [μm]	Spiediens uz virsmu (q) [N/mm^2]
MH tipa minimetrs	0.5	0.14
ИЧМ tipa indikators	2	0.13
ИЧ tipa indikators	8	0.13
Indikatora skava	10	0.32
Indikatora iekšmērs	15	0.03
Sviru skava	2	0.35
Sviru mikrometrs	4	0.14
Elektrokontakta (luksafora) aparāti	1	0.06
Horizontālais un vertikālais optimetrs	0.3	0.13
Garuma mērītājs	1.4	0.20
Mikrometrs K - 6 tipa		
izmēriem <1 mm	0.5	0.02
parastu mērījumu veikšanai	7	0.07
Digitālais mikrometrs DM2020		
Izmēriem 0 – 25	4	0.11
25 – 50	10	0.11
125 – 150	20	0.11
Gludais mikrometrs		
Izmēriem 0 – 25	5	0.25
25 – 50	15	0.25
125 – 150	30	0.25
Sviru mikrometrs ЧМ		
Izmēriem 0 – 25	5	0.11
25 – 50	3	0.18
125 – 150	7	0.32
Vertikālais garuma mērītājs	1	0.31
Digitālā mērīšanas sistēma TESA TG 30	1	0.06
Diametra un riņķa līnijas garuma mērītājs Altia	1.5	0.01
Apaļuma mērītājs	3	0.04
Diametra un riņķa līnijas garuma mērītājs Z_CAL	3	0.05
Augstuma mērītājs Mestra	1.4	0.01
Augstuma mērītājs Digimar	1.8	0.02
Mikrometrs Micromar		
Izmēriem 0 – 25	3.5	0.02
25 – 50 ... 450 – 475	4	0.04
475 – 500	7	0.07

7.3. tabula

Pieļaujamās mērījumu robežklūdas $[\Delta_{mēr}]$ pēc ГOCT 8.051-1981 [12]

Izmēru intervāli [mm]													Kļūda % no pielaides	Kvalitāte
līdz 3	3 ... 6	6 ... 10	10 ... 18	18 ... 30	30 ... 50	50 ... 80	80 ... 120	120 ... 180	180 ... 250	250 ... 315	315 ... 400	400 ... 500		
Mērījuma robežklūda $[\mu\text{m}] (\pm)$														
Kontrolējamā pielaide $[\mu\text{m}]$														
2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	7.5	7.0	8.0	10.0	10.0	30	6
6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40		
3.0	3.5	4.0	5.5	6.0	7.5	9.0	10.0	12.0	12.0	14.0	16.0	18.0	30	7
9	12	14	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63		
3.5	4.5	5.0	7.0	8.0	10.0	11.0	14.0	16.0	18.0	20.0	24.0	26.0	25	8
14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97		
5.0	6.0	7.0	9.0	11.0	12.0	15.0	18.0	20.0	30.0	30.0	40.0	40.0	25	9
20	25	30	35	45	50	60	70	80	115	130	140	155		
7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	17.0	20.0	23.0	27.0	40.0	50.0	50.0	50.0	20	10
33	40	50	60	70	85	100	115	135	185	210	230	250		
8.0	10.0	12.0	14.0	17.0	20.0	24.0	28.0	32.0	60.0	70.0	80.0	80.0	20	11
40	48	58	70	84	100	120	140	160	290	320	360	400		
12.0	16.0	20.0	24.0	28.0	34.0	40.0	45.0	52.0	100.0	120.0	120.0	140.0	20	12
60	80	100	120	140	170	200	230	260	460	520	570	630		
24.0	32.0	40.0	48.0	55.0	70.0	80.0	90.0	105.0	160.0	180.0	190.0	200.0	20	13
120	160	200	240	280	340	400	460	530	720	810	890	970		
50.0	60.0	70.0	85.0	105.0	125.0	150.0	170.0	200.0	240.0	260.0	280.0	320.0	20	14
250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550		
80.0	95.0	120.0	140.0	160.0	200.0	240.0	280.0	320.0	380.0	440.0	450.0	500.0	20	15
400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850	2100	2300	2500		
120.0	150.0	180.0	220.0	260.0	320.0	380.0	420.0	500.0	600.0	700.0	800.0	800.0	20	16
600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900	3200	3600	4000		
200.0	240.0	300.0	380.0	440.0	500.0	600.0	700.0	800.0	1000.0	1100.0	1200.0	1400.0	20	17
1000	1200	1500	1800	2100	2500	3000	3500	4000	4600	5200	5700	6300		



7.1.att. Dažādu materiālu detaļu (ar nominālizmēru 50 mm) deformācijas, mērot ar dažādiem instrumentiem

Mērījumu kļūdas vienkāršots aprēķins

Par normēto deformācijas lielumu šajā metodikā pieņemts relatīvs lielums ζ , kas veidojas kopējo deformāciju a dalot ar mērāmās detaļas nominālizmēru l :

$$\zeta = \frac{a}{l}, \quad (7.4)$$

kur

l – mērāmās detaļas nominālizmērs;

ζ – normētais deformācijas lielums.

Līdz ar to, lai noteiktu augsti elastīgu materiālu detaļu mērījumu kļūdu, mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekmē, izmantojot mērījumu kļūdas vienkāršoto aprēķinu, nepieciešams veikt sekojošus uzdevumus:

- 1) Izdara mērinstrumentu izvēli, atbilstoši šīs metodikas 7.2. norādījumiem;
- 2) Atkarībā no mērāmās detaļas materiāla elastības moduļa (7.1. tabula), tabulā (7.2. tabula) atrod atbilstošam mērāmās detaļas nominālizmēram normēto deformācijas lielumu ζ .
- 3) Atrasto normēto deformācijas lielumu ζ ievieto vienādojumā (7.4) un aprēķina mērāmās detaļas deformāciju a .
- 4) Iegūto deformācijas a vērtību summē ar mērīšanas kļūdu, izvēlētajam mērinstrumentam:

$$\Delta_{m\acute{e}r} = a + \Delta_{instr}.$$

- 5) Pārbauda vai iegūtā vērtība nepārsniedz pieļaujamo mērījumu robežkļūdu $[\Delta_{m\acute{e}r}]$:

$$\Delta_{m\acute{e}r} \leq [\Delta_{m\acute{e}r}].$$

Mīkstas gumijas ($E=7 \text{ N/mm}^2$) detaļu maksimālais deformācijas normētais lielums ζ

Instrumenti	līdz 3	3-6	6-10	10-18	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180	180-250	250-315	315-400	400-500
ИЧ типа индикаторs	0.0260	0.0220	0.0204	0.0193	0.0188	0.0184	0.0183	0.0182	0.0181	0.0181	0.0180	0.0180	0.0180
Indikatora skava	0.0256	0.0216	0.0200	0.0189	0.0184	0.0181	0.0179	0.0178	0.0178	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177
Indikatora iekšmērs	0.0118	0.0091	0.0080	0.0072	0.0068	0.0066	0.0065	0.0064	0.0064	0.0064	0.0063	0.0063	0.0063
Sviru skava	0.0256	0.0216	0.0200	0.0189	0.0184	0.0181	0.0179	0.0178	0.0178	0.0177	0.0177	0.0177	0.0177
Elektrokontakta (luksafora) aparāti	0.0103	0.0077	0.0066	0.0059	0.0056	0.0054	0.0052	0.0052	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
Horizontālais un vertikālais optimetrs	0.0260	0.0220	0.0204	0.0193	0.0188	0.0184	0.0183	0.0182	0.0181	0.0181	0.0180	0.0180	0.0180
Digitālais mikrometrs DM2020													
Izmēriem 0-25	0.0042	0.0021	0.0013	0.0007	0.0004								
25-75					0.0158	0.0158	0.0158						
75-150							0.0155	0.0155	0.0155				
Gludais mikrometrs													
Izmēriem 0-25	0.0469	0.0411	0.0387	0.0372	0.0364								
25-50					0.0364	0.0359							
50-150							0.0354	0.0354	0.0354				
Vertikālais garuma mērītājs	0.0180	0.0147	0.0134	0.0125	0.0121	0.0118	0.0117	0.0116	0.0115	0.0115	0.0115	0.0115	0.0115
Digitālā mērīšanas sistēma TESA TG 30	0.0067	0.0052	0.0046	0.0045	0.0045	0.0039	0.0039	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
Diametra un riņķa līnijas garuma mērītājs Altia	0.0066	0.0043	0.0034	0.0028	0.0025	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020
Apaļuma mērītājs	0.0118	0.0090	0.0079	0.0072	0.0068	0.0066	0.0065	0.0064	0.0064	0.0064	0.0063	0.0063	0.0063
Diametra un riņķa līnijas garuma mērītājs Z_CAL	0.0130	0.0101	0.0090	0.0082	0.0078	0.0076	0.0075	0.0074	0.0074	0.0073	0.0073	0.0073	0.0073
Augstuma mērītājs Mestra	0.0057	0.0035	0.0026	0.0020	0.0017	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
Augstuma mērītājs Digimar	0.0072	0.0049	0.0039	0.0033	0.0030	0.0028	0.0027	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026	0.0025
Mikrometrs Micromar													
izmēriem no 0 -25	0.0164	0.0132	0.0120	0.0111									
25 - 50					0.0056	0.0054							
50 - 125							0.0052	0.0520					
125-500									0.0510	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051

NOSLĒGUMS

Pēc darba izpildes var izdarīt sekojošus secinājumus:

- 1) Veicot literatūras apskatu, konstatēts, ka darba izstrādes laikā pieejamos informācijas avotos nav pētīta mērīšanas spēka un virsmas raupjuma ietekme uz augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumu precizitāti.
- 2) Darbā pirmo reizi apskatīta virsmas raupjuma ietekme uz augsti elastīgu materiālu detaļu mērījumu precizitāti, izmantojot 3D virsmas pamatprincipus. Virsma tiek aprakstīta kā divmēru gadījuma lauks ar normālu augstumu sadalījuma funkciju un nepārtrauktu korelācijas funkciju.
- 3) Pamatota 3D virsmas parametru un virsmas modeļa izvēle elastīga kontakta aprēķina gadījumā. Virsmas modeļa veidošanai izmantoti divi raupjuma augstuma parametri (St – virsmas kopējais augstums, Sa – virsmas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes) un raupjuma soļa parametrs (RSm – raupjuma solis pa viduslīniju).
- 4) Darbā pierādīts, ka virsmas kopējā deformācija sastāv no virsmas raupjuma izciļņu deformācijas, to nosēšanās un pamatmateriāla deformācijas. Darbā atrastas formulas visām trijām deformācijas sastāvdaļām.
- 5) Darbā izpētītas iespējas, teorētiski precīzo virsmas raupjuma izciļņu augstuma parametru noteikšanas formulu (Naijaka formulu) aizstāt ar vienkāršākiem varbūtību sadalījuma likumiem. Izskatīti Gausa un Releja varbūtību sadalījuma likumi un pierādīts, ka tuvākais precīzās formulas analogs ir Releja sadalījuma likums. Iegūto virsmas raupjuma izciļņu augstuma matemātiskās sagaidāmas vērtības noteikšanas vienādojumu var izmantot arī citiem virsmas deformācijas veidiem, piemēram, dilumam, berzes koeficienta aprēķinam u.c.
- 6) Iegūta virsmas raupjuma izciļņu deformācijas a_1 noteikšanas sakarība, kas satur 3D virsmas parametrus (St – virsmas kopējais augstums, Sa – virsmas vidējā aritmētiskā novirze no vidusplaknes, RSm_1 – raupjuma solis pa viduslīniju un c – anizotropijas koeficients), mērāmās detaļas fizikāli mehānisko īpašību raksturlielumus (E – elastības modulis, μ – Puasona koeficients) un spiedienu uz kontaktaukumu.
- 7) Iegūta virsmas raupjuma izciļņu nosēšanās lieluma a_2 noteikšanas sakarība, kas satur 3D virsmas parametrus (RSm_1 – raupjuma solis pa viduslīniju un c – anizotropijas koeficients), mērāmās detaļas fizikāli – mehānisko īpašību raksturlielumus (E – elastības modulis, μ – Puasona koeficients) un spiedienu uz kontaktaukumu.
- 8) Iegūta kopējā virsmas deformācijas a noteikšanas sakarība, kas veidojās kā triju deformāciju summa (a_1 – virsmas raupjuma izciļņu deformācijas, a_2 – virsmas raupjuma izciļņu nosēšanās lieluma, a_3 – pamatmateriāla deformācija), kuras noteikšanai nepieciešams zināt 3D virsmas parametrus (St, Sa, RSm, c), detaļas fizikāli – mehāniskās īpašības (E, μ) un spiedienu uz kontaktaukumu.
- 9) Teorijas pārbaudei veikti augsti elastīgu materiālu detaļu lineāro izmēru mērījumi. Tika mērīti 10 paraugi, mērot tos ar kontakta un bezkontakta mērinstrumentiem. Bezkontakta mērījumiem tika izmantota 3D koordinātu mērīšanas iekārta MarVision MS222 (Mahrs, Germany). Kontaktmērījumiem tika izmantoti: digitālais

mikrometrs DM2020 (Digital Micrometers Ltd, UK) gludais mikrometrs MK (Калибр, Krievija), digitālā garuma mērīšanas sistēma TG30 (TESA COMPAC, Switzerland). Veiktajos eksperimentālajos mērījumos secināts, ka ir principiāla teorijas un eksperimentu sakritība. Analītiski aprēķināto deformāciju vērtību novirze no eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem nepārsniedz 5%.

- 10) Analītiskā deformācijas noteikšanas formula un eksperimentālie mērījumi salīdzināti ar datormodelēšanas programmās ANSYS un SolidWorks izstrādātiem galīgo elementu modeļiem, kur kontaktdeformācijas tiek noteikta neņemot vērā virsmas raupjuma ietekmi. Iegūts, ka datormodelēšanas modeļu rezultāti ir mazāki par eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem apmēram par 10%. Tas rāda analītiskiem aprēķiniem iegūto formulu principiālu pareizību.
- 11) Izstrādāta universālo mērinstrumentu izvēles metodika augsti elastīgu materiālu detaļu mērīšanai, kas ļauj prognozēt iespējamās detaļas deformācijas un mērījumu kļūdu.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Bronstein I., Semendjajew K. *Taschenbuch der Mathematik*. -Deutschland: Harri, 2008. -1216 p.
2. Nayak P. *Random Process Model of Rough Surface*// *Journal of Lubrication Technology*. - 1970. - Volume XI, - pp. 398 – 407.
3. Šīrons E. *Detaļu ģeometrisko parametru mērīšana*. - Rīga: RTU, 2008. - 332 lpp.
4. Беляев Н. *Труды по теории упругости и пластичности*. - Москва: Гостехтеориздат., 1957. - 632 с.
5. Галин Л. *Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости*. - Москва: Наука, 1980. - 304 с.
6. Марков Н., Сацердотов П. *Действительный размер при линейных измерениях, Измерительная техника*. 7 ред. - Москва: Наука, 1969. - 436 с.
7. Марков Н., Сацердотов П., Кайнер Г. *Методические указания по внедрению ГОСТ 8.051-81 "Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров от 1 до 500 мм"*. - Москва: Издательство стандартов., 1983. - 35 с.
8. Рабинович С. Г. *Погрешности измерений*. - Ленинград: Энергия, 1978. - 262 с.
9. Рудзитис Я. *Контактная механика поверхностей. 1-ая часть*. - Рига, РТУ, 2007. - 193 с.
10. Рудзитис Я. *Контактная механика поверхностей. 2 - ая часть*. - Рига: РТУ, 2007. -217 с.
11. ISO 25178:2012 – 2 *Ģeometrisko programproduktu specifikācijas (GPS). Virsmas īpašības: laukums*. 2012.
12. ГОСТ 8.051-81 "Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров от 1 до 500 мм". 1981.