



Izglītības un zinātnes ministrija



Studiju un zinātnes
administrācija

Valsts pētījumu programmas 'Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides
drošumam (IMATEH)'

6.projekta 'Metāla virsmas apstrāde berzes un nodiluma samazināšanai'

2.nodevums

**Rekomendāciju izstrāde par virsmas modifikācijām, kas visvairāk palielina
slīdamību metālam pa ledu**

Sagatavoja: Pētnieks Jānis Lungevičs

Pētniece Liene Plūduma

Zin. asistents Ernests Jansons

Projekta vadītājs: A/Prof. Kārlis Agris Gross

Rīga, 2017.gada 30.jūnijs

SATURA RĀDĪTĀJS

Ievads	3
1. Virsmas tekstūras ietekme uz slīdamību.....	4
1.1. Raupjumu raksturojošo parametru izvēle	4
1.2. Pētāmo virsmu sagatavošana	6
1.3. Slīdamības eksperimentu uzstādījumi laboratorijā	7
1.4. Eksperimentu rezultāti.....	8
2. Virsmas cietības ietekme uz slīdamību	14
2.1. Informācija par izmantoto materiālu	14
2.2. Paraugu termiskā apstrāde	17
2.3. Rūdīto paraugu slīdēšanas īpašību pārbaude	19
3. Hidrofobitātes ietekme uz slīdamību.....	22
3.1. Polimēri	22
3.2. Hidrofobie pārklājumi	26
Kopsavilkums	29
Literatūra	30

Ievads

Valsts pētījumu programmas “Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam (IMATEH)” ietvaros tika veikti laboratorijas līmeņa pētījumi tam kā dažāda veida virsmas modifikācijas ietekmē objektu un ledus savstarpējo slīdēšanu, ar mērķi novērtēt kāda veida modifikācijas ļauj veicināt slīdēšanas procesu un kādas to bremzē. Veicot šāda veida izpēti tika ievākta līdz šim maz apskatīta informācija par to kā dažādas virsmu modifikācijas ietekmē to mijiedarbību ar ledu. Projekta ietvaros uzsvars likts uz salīdzinoši vienkārši realizējamām virsmas modifikācijām (tekstūras izmainīšana ar smilšpapīru, rūdīšana, hidrofobi pārklājumi, polimēru virsmas), lai palielinātu iespējamību šīs metodes aprobēt reālām dzīves situācijām.

Virsmu modifikāciju ietekme apskatīta no diviem aspektiem – statiskā un dinamiskā. Dinamiskajā gadījumā tiek apskatīts cik strauji modificētās virsmas slīd pa vienāda slīpuma ledus plakni, kas veidota kā berzes pāra jumts-ledus apgrieztais modelis. Statiskajā gadījumā apskatīti parauga izslīdēšanas kritiskie leņķi, t.i. novērtēts pie cik liela plaknes (jumta) slīpuma notiek parauga miera stāvokļa berzes pārvarēšana. Jo mazāks šis leņķis, jo lielāka iespēja, ka sniega un ledus kārtā laicīgāk noslīdēs no jumta. Šo metožu principi sīkāk apskatīti nodevumā “Metode slīdamības mērīšanai laboratorijas apstākļos”, kurš iesniegts projekta vidus posmā.

Lai raksturotu modificētās virsmas, tām veikti tekstūras pētījumi ar kontakttipa profilometru, veikta apskate ar optisko mikroskopu, noteikti virsmas slapināšanas kontakt leņķi.

Šī nodevuma ietvaros apkopota nozīmīgākā informācija par apskatītajām virsmas modifikācijām un to iespaidu uz slīdēšanas procesu, kas novērtēts salīdzinot gan dinamisko, gan statisko mērījumu rezultātus.

1. Virsmas tekstūras ietekme uz slīdamību

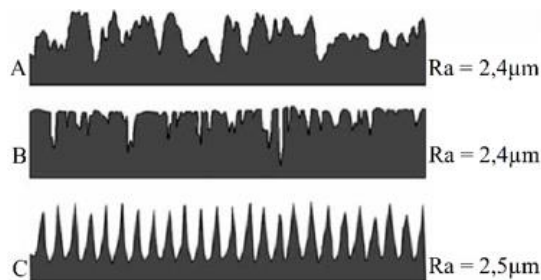
Līdzšinējos zinātniskajos pētījumos tiek minēts, ka virsmas tekstūrai ir jūtama ietekme uz tās spēju slīdēt pa ledu, taču iegūtie rezultāti nav viennozīmīgi un tajos parasti salīdzinātas ļoti kardināli atšķirīgu raupjumu virsmas, t.i. daļa virsmu ir ievērojami gludākas (vidējā aritmētiskā novirze no vidus plaknes $S_a \sim 0,1 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$) par salīdzināmajām virsmām, kuras ir saskrāpētas, apstrādātas ar ložu strūklu vai lāzeri ($S_a \sim 0,6 \mu\text{m} - 2,6 \mu\text{m}$), taču tik raupjām virsmām nav praktiska pielietojuma, ja mērķis ir uzlabot virsmas slīdamību. Šī projekta ietvaros bija uzstādīts mērķis daudz smalkāk kā līdz šim pārbaudīt raupjuma ietekmi, salīdzinot virsmas, kuras sākas ar “spoguļgludu” un beidzas ar 320. markas smilšpapīra apstrādi. Pētījumā apskatīto paraugu raupjums atrodas diapazonā $S_a \sim 0,007 \mu\text{m} - 0,169 \mu\text{m}$, kas ir vairāk kā 5x mazāks kā līdz šim veiktajos pētījumos un no praktiskā pielietojuma viedokļa daudz pietuvinātāks reālām dzīves situācijām, kā piemēram, ēku fasāžu elementi, ziemas sporta aprīkojums, transportēšanas iekārtas.

Šis pētījums izskatīs raupjuma ietekmi uz slīdamību ar lielāku precizitāti raupjuma mērījumos pie daudz gludākām virsmām. Šādi apstākļi var veicināt ledus noslīdēšanu no jumtiem kā arī kustamību pa ledu.

Šajā apakšnodaļā apkopota būtiskākā informācija par virsmu raupjuma raksturošanu, kā arī laboratorijā iegūtajiem slīdēšanas eksperimentu rezultātiem.

1.1. Raupjuma raksturojošo parametru izvēle

Lai pilnvērtīgi varētu runāt par virsmas raupjuma ietekmi uz slīdēšanu, sākotnēji ir jāsaprot kā adekvāti raksturot šo virsmu tekstūru. Lielākā daļa pētnieku raupjumu nosaka izmantojot kontakta vai bezkontakta tipa profilometrus, kuri skenē pētāmās virsmas fragmentu un tam aprēķina standartizētos raupjuma parametrus, kuru skaits šobrīd ir vairāk kā 30. No literatūras apskates redzams, ka raupjuma raksturošanai ledus berzes pētījumos tiek izmantota raupjuma vidējā aritmētiskā vērtība individuālam virsmas profilam R_a vai virsmai S_a , taču var ļoti uzskatāmi pierādīts, ka šie parametri, ņemti individuāli, nedod precīzu virsmas raksturojumu (skat. 1.1.att.). 1.1. attēlā redzams, ka parametrs R_a visos gadījumos ir praktiski vienāds, bet ir skaidri saprotams, ka virsmas topogrāfija ievērojami atšķiras, līdz ar to atšķiras arī to slīdēšanas īpašības kontaktā ar ledu. No iepriekš minētā var secināt, ka izmantot vienu raupjuma negludumu augstumu raksturojošu parametru ir ļoti riskanti, jo tas nepauž pietiekami daudz informāciju.



1.1.att. Dažādi apstrādātu virsmu profili un to raupjuma parametrs R_a : A – Slīpēta virsma, B – Honēta virsma, C – Virpota virsma. [1]

Pēc padziļinātas analīzes, raupjuma raksturošanai tika izvēlēta divu raupjuma parametru (R_{Sm} – nelīdzenumu vidējais solis; S_a – vidējā aritmētiskā novirze no vidus plaknes) attiecība, jo tā definē gan raupjuma negludumu augstumu (parametrs S_a), gan garumu (parametrs R_{Sm}) un to attiecība raksturo raupjuma negludumu slīpumu. Par raupjuma parametru izvēli virsmu raksturošanai, projekta ietvaros tika izveidota zinātniskā publikācija (indeksēta SCOPUS datubāzē) – “A Surface Roughness Measure That Best Correlates to the Ease of Sliding” [5]. Uzskatāmības nolūkos šajā nodevumā atspoguļots būtiskākais izvilkums no minētās publikācijas, lai nodrošinātu ērtāku nodevuma uztveršanu.

Par pamatu izvēlēto parametru attiecībai ir ņemta RTU izstrādāta kontakt kritērija teorija [1], kura raksturo divu virsmu kontakta īpašības. Pilnais kontakt kritērija (KK) aprēķināšanas vienādojums ir sekojošs:

$$KK = \frac{R_{Sm} H_{\mu}}{S_a E} \quad (1)$$

Kur: Materiālu raksturojošie parametri:

H_{μ} – virsmas mikrocietība, HB;

E – Junga modulis, N/m².

Raupjumu raksturojošie parametri:

R_{Sm} – nelīdzenumu vidējais solis, mm;

S_a – vidējā aritmētiskā novirze no vidus plaknes, μm.

Ja savstarpēji tiek salīdzinātas virsmas no viena un tā paša materiāla, kā tas ir konkrētajā pētījumā, no oriģinālā vienādojuma (1) var atņemt materiālu raksturojošos parametrus, jo tie veido nemainīgu konstanti, un iegūt tikai virsmas tekstūru raksturojošo parametru attiecību:

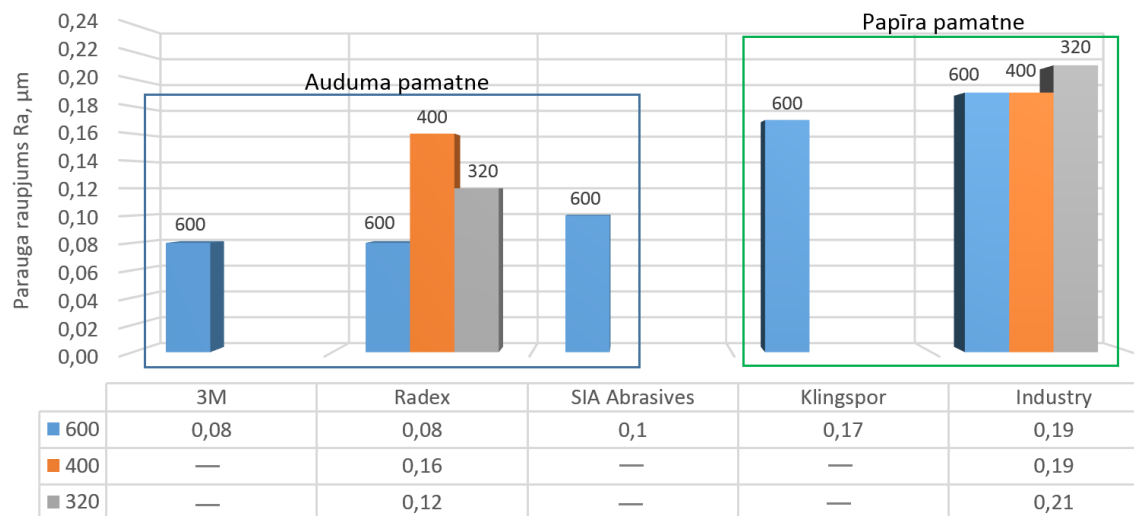
$$KK = \frac{R_{Sm}}{S_a} \quad (2)$$

Turpmākajā pētījumā virsmu raupjuma raksturošanai izmantota vienādojumā (2) redzamā parametru attiecība. Jo lielāka ir šī attiecības vērtība, jo virsma ir ar lēzenākiem negludumiem, citiem vārdiem, gludāka.

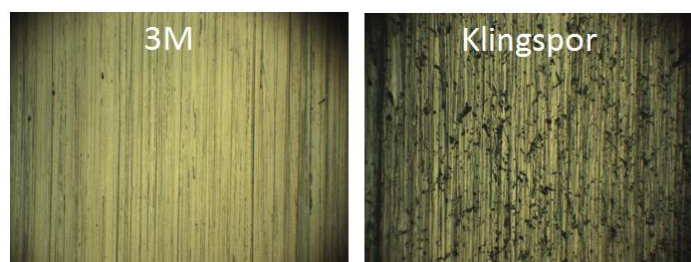
1.2. Pētāmo virsmu sagatavošana

Lai nodrošinātu pētāmās virsmas ar dažādas pakāpes raupjumu, tika izstrādāta apstrādes metodika, kura stingri ievērota visa projekta ietvaros. Metodikas pamatā ir vienādi sagatavotu paraugu (dimensijas: 35 x 18 x 14 mm), kuri primāri pulēti ar autopulētāju *Mecatech 334 TI 15* līdz spoguļgludai virsmai, skrāpēšana tos pārvietojot noteikta garuma distanci (2400 mm) pa smilšpapīru, pieliekot nemainīgu piespiešanas spēku (11 N).

Priekšizpētes ietvaros tika noskaidrots, ka ļoti liela nozīme virsmas tekstūras veidošanā ir ne tikai izmantotā smilšpapīra graudu izmēram, bet arī graudu pielīmēšanas metodei un pamatnei uz kādas veidots smilšpapīrs, t.i. papīra vai auduma pamatne. Noskaidrots, ka smilšpapīri uz papīra pamatnes, atstāj ~2x lielākas skrāpējumu pēdas (skat. 1.2.att.) un rada būtiskus materiāla izrāvumus (skat. 1.3.att. Klingspor) parauga virsmā, tādēļ tika pieņemts lēmums izmantot tikai smilšpapīrus uz auduma bāzes, jo to atstātās skrāpējumu pēdas uz paraugu virsmām ir prognozējamākas un bez materiāla izrāvumiem.



1.2.att. Dažādu ražotāju (3M, Radex, Abrasives, Klingspor, Industry) un graudu izmēru (600, 400, 320) smilšpapīru veidotā virsmas raupjuma salīdzinājums.



1.3.att. Optiskā mikroskopa attēli parauga virsmām (palielinājums 200x) pēc skrāpēšanas ar dažādu pamatņu 600. graudu izmēra smilšpapīriem. 3M – auduma pamatne; Klingspor – papīra pamatne.

Zemāk redzamajā tabulā apkopota informācija par smilšpapīriem, kuri izmantoti pētāmo paraugu virsmu sagatavošanai slīdamības eksperimentu vajadzībām.

1.1.tab. Virsmu skrāpēšanai izmantoto smilšpapīru pārskats.

Graudu izmērs	Ražotājs	Pamatne	Paraugu skaits
3000	3M	Auduma	4
2000	Klingspor		2
1500	3M		3
600	3M		4
400	Radex		2
320	Radex		2

Pētījuma ietvaros tika izstrādāta arī uzlabota metodika tam, kā mērīt virsmu raupjuma parametrus, izmantojot kontakttipa profilometru (*Taylor Hobson Form Talysurf Intra 50*). Šī metode kombinē 3D virsmas mērījumu, no kura tiek iegūta parauga vidējā aritmētiskā novirze no vidus plaknes S_a , un plašāk izplatīto metodi ar 2D profilogrammām, no kurām tiek noskaidrots raupjuma nelīdzenumu vidējais solis R_{Sm} . Ar metodiku sīkāk var iepazīties zinātniskajā publikācijā “A Surface Roughness Measure That Best Correlates to the Ease of Sliding” [5]. Eksperimentos izmantoto paraugu raupjuma mērījumu rezultāti apkopoti šīs nodaļas 1.3. tabulā.

1.3. Slīdamības eksperimentu uztādījumi laboratorijā

Eksperimenti ir veikti dažādās dienās, ievērojot nemainīgu metodiku, kura detalizēti apskatīta nodevumā “Metode slīdamības mērīšanai laboratorijas apstākļos”, lai pārbaudītu rezultātu atkārtojamību no dienas uz dienu. Lai gan faktiskais eksperimentu dienu skaits ir ievērojami lielāks, šajā nodevumā atspoguļota informācija par eksperimentu dienām, kuru ietvaros izdevies nodrošināt savstarpēji vislīdzīgākos klimatiskos apstākļus tādejādi ļaujot daudz objektīvāk raksturot raupjuma ietekmi uz slīdēšanu pa ledu, jo mainot klimatiskos apstākļus izmainās ledus un pētāmās virsmas mijiedarbība, t.i. klimatam kļūstot siltākam un mitrākam uz ledus virskārtas veidojas izteiktāka šķidrā slāņa kārtiņa, kura līdz noteiktai robežai veicina

slīdēšanas procesu, veidojot starp kontaktējošajām virsmām šķidrās berzes režīmu, taču, šim slānim kļūstot plānam (zemās temperatūrās un pie maza mitruma), vai tieši pretēji ļoti biežam (silts un mitrs klimats) paraugiem ir tendence kļūt lēnākiem. Tas, kādu iespaidu uz slīdēšanu rada apkārtējās vides temperatūra, tika papildus apskatīts šī projekta ietvaros un būtiskākā informācija atspoguļota 1.7. attēlā redzamajā grafikā.

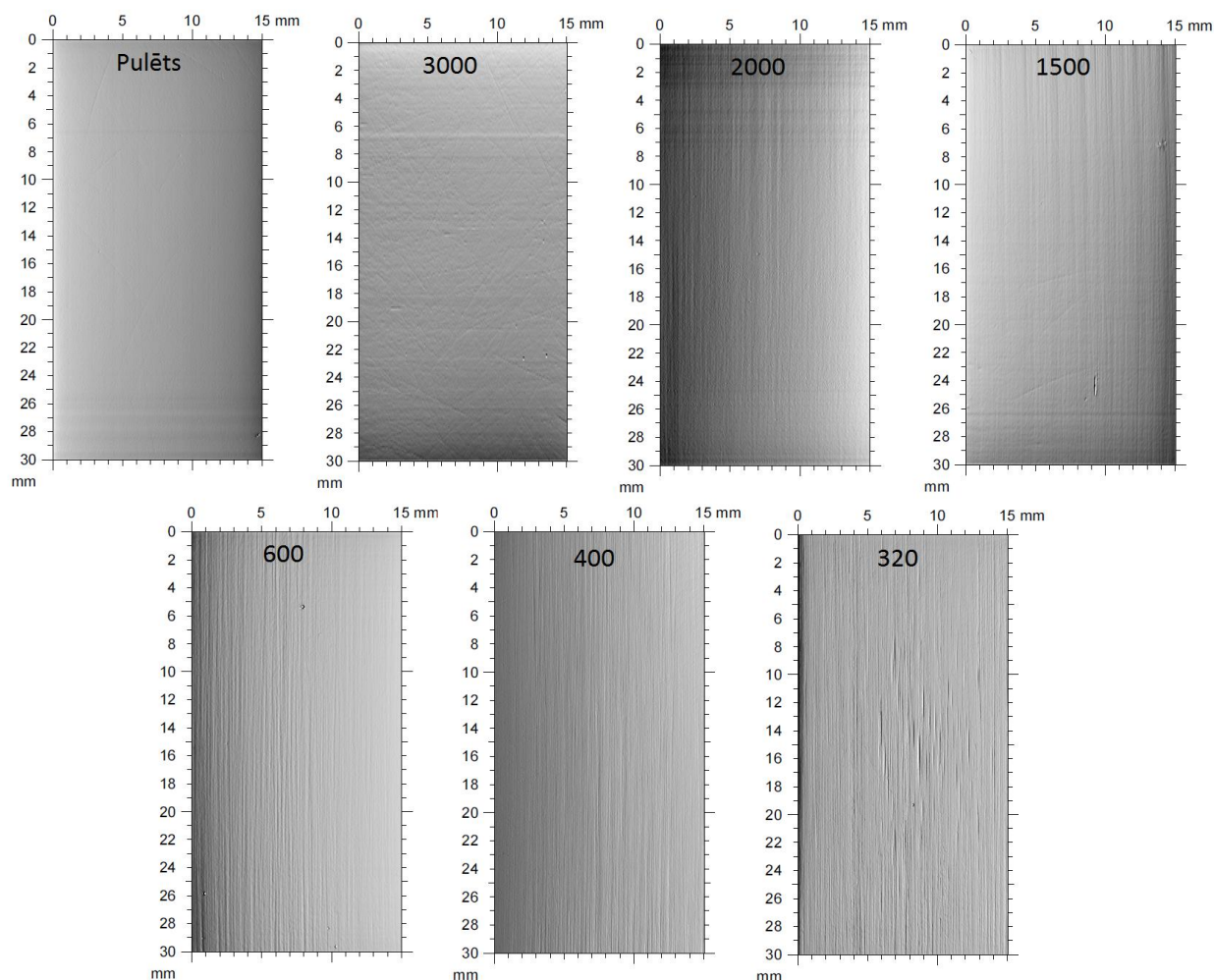
Eksperimenti iedalās divās daļās – statistiskajā, kuras laikā nosaka paraugu izslīdēšanas leņķi to lēnām palielinot no nulles pozīcijas (ledus horizontālā pozīcijā) līdz brīdim, kamēr paraugs sāk slīdēt un dinamiskajā, kura ietvaros nosaka cik lielu ātrumu paraugi spēj sasniegt braucot pa nemainīga slīpuma ledus plakni. Zemāk redzamajā tabulā apkopota informācija par raupjuma ietekmes izpēti dinamisko eksperimentu uzstādījumiem. Statistiskie eksperimenti izdarīti $-4 \pm 1^\circ\text{C}$ temperatūrā no katras apstrādes tipa izmantojot 2 paraugus.

1.2.tab. Raupjuma ietekmes uz slīdēšanas īpašībām eksperimentu uzstādījumi.

Plaknes leņķis	$16^\circ \pm 30'$
Distance starp pirmo un pēdējo sensoru	3300 mm $\pm$
Apkārtējās vides temperatūra	$-7,5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$
Mērījumu skaits vienam paraugam vienā eksperimentu dienā	~80
Paraugu skaits konkrētam raupjuma tipam	2 – 3
Eksperimentu dienu skaits (uzrādītas šajā nodevumā)	4

1.4. Eksperimentu rezultāti

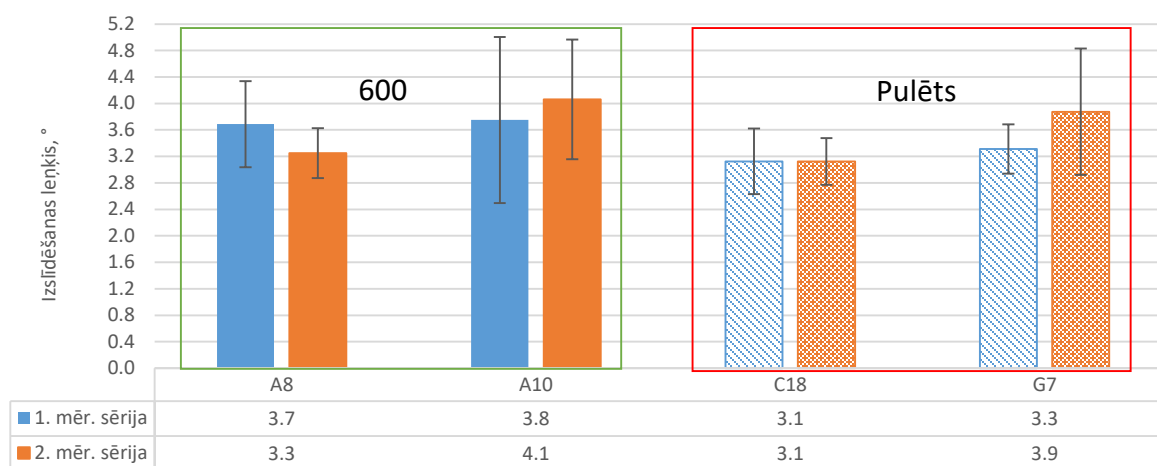
Zemāk redzamajā attēlā (skat. att. 1.4) izveidots apkopojums ar dažādiem smilšpapīriem apstrādāto paraugu virsmu tekstūrām, kuras iegūtas ar profilometra palīdzību. Uzskatāmības nolūkos parādīts tikai viens piemērs no katra apstrādes veida. 1.3. tabulā ir apskatāmi izmantoto paraugu virsmu raksturojošie raupjuma parametri – R_{Sm} , S_a un to attiecības skaitliskā vērtība.



1.4.att. Ar dažādu graudu izmēru (norādīts ar melniem burtiem uz katra parauga) smilšpapīriem apstrādāto paraugu virsmu tekstūru salīdzinājums.

No 1.4. attēla redzams, ka skrāpējumu intensitāte pieaug palielinoties smilšpapīra graudu izmēram. Redzams arī tas, ka lielāku graudu izmēru smilšpapīriem ir tendence starp skrāpējumiem veidot lielākas atstarpes, kā arī to skrāpējuma platums un dziļums ir lielāks, kas skaidrojams ar to, ka lielāka izmēra graudi nevar uz smilšpapīra pamatnes veidot tik blīvu struktūru kā smalko graudu gadījumā, taču to graudi spēj dziļāk iespiesties materiāla virsmā.

Sākotnēji virsmām tika veikta izslīdēšanas leņķa noteikšana, t.i. statistiskais tests, kura ietvaros vienādos klimatiskajos apstākļos ($-4 \pm 1^\circ\text{C}$) tika noskaidrots pie kāda slīpās plaknes leņķa notiek parauga izslīdēšana. Tika pārbaudīts, vai ir jūtama izslīdēšanas leņķa atšķirība starp būtiski atšķirīga raupjuma virsmām – pulētu un skrāpētu ar 600. markas smilšpapīru. Iegūtie izslīdēšanas leņķi, kuri katrā mērījumu sērijā aprēķināti kā vidējā vērtība no 10 mērījumiem apskatāmi zemāk redzamajā grafikā.

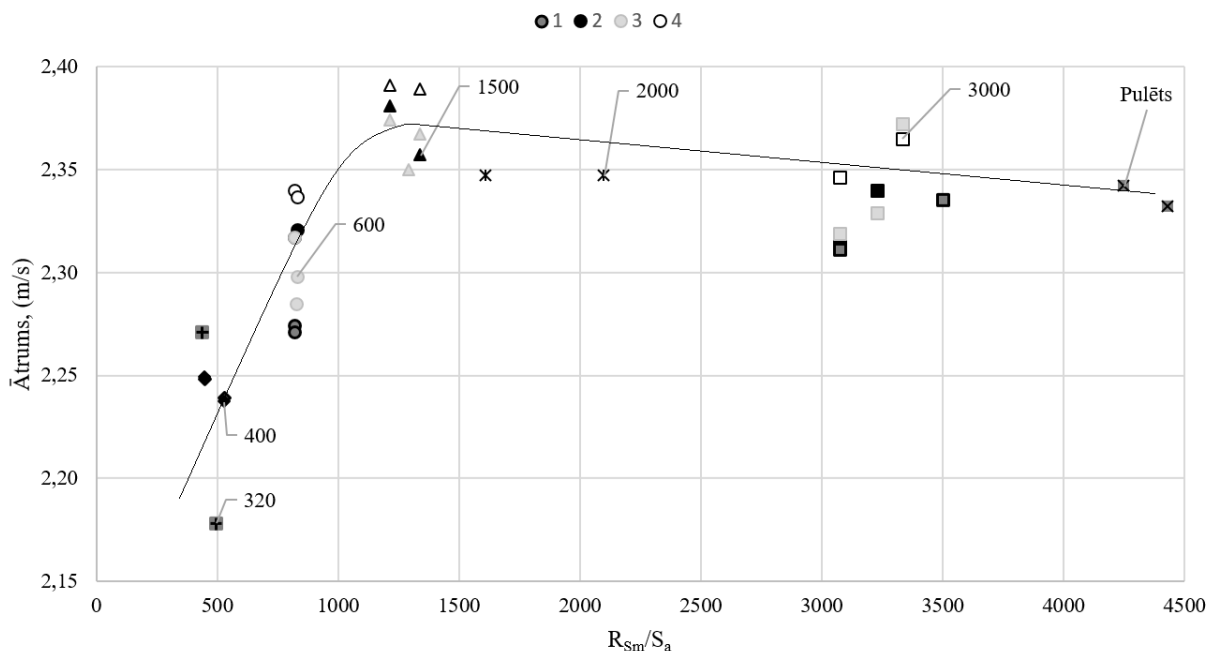


1.5.att. Pulētu (C18 un G7) un ar 600. grauda izmēru smilšpapīru skrāpētu (A8 un A10) virsmu izslīdēšanas leņķu noteikšanas eksperimenta rezultāti.

No 1.5. attēla grafika redzams, ka starp dažādajām apstrādes metodēm nav novērota vērā ņemama izslīdēšanas leņķu atšķirība, t.i. mērījumu vērtības kļūdu robežās sakrīt. Iegūtie dati neļauj īsti objektīvi novērtēt, vai raupjumam ir ietekmes uz virsmu spēju slīdēt pa ledu, taču, lai to pārbaudītu tika realizēti dinamiskie eksperimenti, kuru ietvaros noskaidrotais paraugu slīdēšanas ātrums, kurš aprēķināts, izmantojot eksperimentāli noteikto paraugu slīdēšanas laiku un slīdēšanas distanci (3300 mm), apskatāms zemāk redzamajā tabulā. Ērtākai datu uztverei ir izveidots pārskata grafiks, kas redzams 1.6. attēlā.

3.tab. tabula Virsmas raksturojošie 3D parametri, paraugu slīdēšanas ātrums

Parauga nr.	Izmantotais smilšpapīrs	Raupjuma parametri			Eksperimentu rezultāti			
		R _{Sm} (mm)	S _a (μm)	R _{Sm} /S _a	1. diena	2. diena	3. diena	4. diena
					V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
1	Pulēts	0,034	0,008	4250	2,342	-	-	-
2	Pulēts	0,031	0,007	4429	2,332	-	-	-
3	3000	0,040	0,013	3077	2,311	2,317	2,319	2,346
4	3000	0,042	0,013	3230	-	2,340	2,329	-
5	3000	0,042	0,012	3500	2,335	-	-	-
6	3000	0,040	0,012	3333	-	-	2,372	2,365
7	2000	0,042	0,020	2100	-	-	-	2,347
8	2000	0,037	0,023	1609	-	-	-	2,347
9	1500	0,045	0,037	1216	-	2,381	2,374	2,391
10	1500	0,055	0,041	1341	-	2,357	2,367	2,389
11	1500	0,053	0,038	1293	-	-	2,350	-
12	600	0,068	0,083	819	2,274	2,317	2,317	2,34
13	600	0,070	0,085	830		2,321	2,298	2,337
14	600	0,069	0,084	821	2,271	-	-	-
15	600	0,067	0,081	827	-	-	2,285	-
16	400	0,082	0,155	529	2,239	2,237	-	-
17	400	0,076	0,169	450	2,248	2,249	-	-
18	320	0,081	0,163	497	2,178	-	-	-
19	320	0,072	0,165	437	2,271	-	-	-



1.6.att. Raupjuma negludumu slīpuma ietekme uz slīdēšanas ātrumu. Dažādām virsmu apstrādēm izmantotas atšķirīgas ģeometrijas simboli un to aizpildījums norāda kurā dienā iegūti dati.

1.6. attēlā redzami tumši pelēkie apzīmējumi attiecas uz pirmo, melni uz otro, gaiši pelēki uz trešo un balti uz ceturto eksperimentu dienu. Grafikā papildus ir norādīts kāds apzīmējums atbilst izmantotajam smilšpapīram paraugu sagatavošanas procesā.

No iegūtajiem datiem ir redzams, ka četrās eksperimentu dienās, kurās nodrošināti līdzvērtīgi eksperimentu apstākļi iegūtās raupjuma ietekmes tendences saglabājas līdzīgas. Kā interesantu blakus novērojumu var minēt, ka veicot virsmu apstrādi, izmantojot sagatavoto metodiku, iegūto raupjuma negludumu slīpums, ko raksturo parametrus R_{Sm} un S_a attiecības vērtība, aptuveni atbilst izmantotā smilšpapīra graudu izmēram.

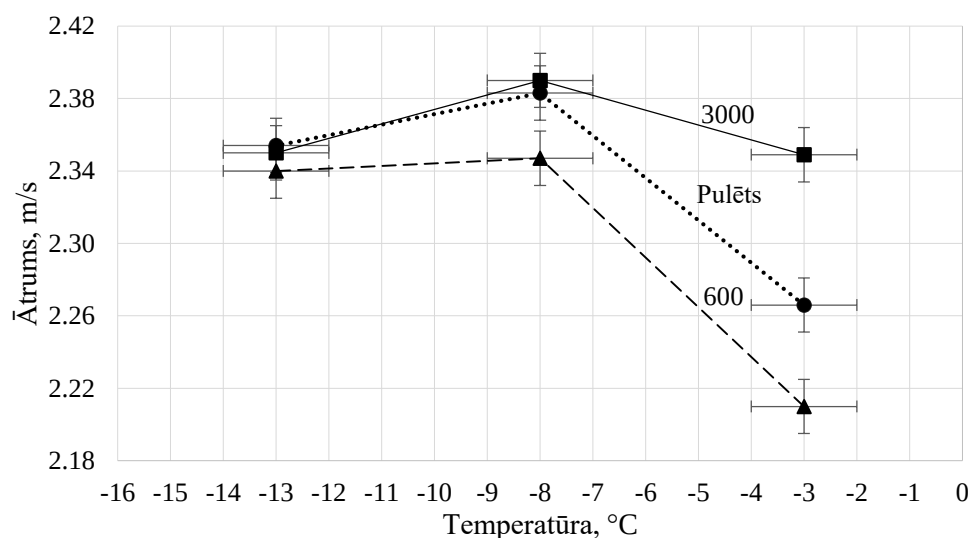
Iegūtajā grafikā var iezīmēt divas atšķirīgas zonas:

- 1) $R_{Sm}/S_a < 1200$ – lielas ietekmes zona;
- 2) $R_{Sm}/S_a > 1200$ – mazas ietekmes zona.

Lielās ietekmes zonā novērojama strauja slīdēšanas ātruma palielināšanās samazinoties paraugu raupjuma negludumu slīpumam (negludumi kļūst lēzenāki). Šajā zonā, R_{Sm}/S_a palielināšanās par ~400 vienībām par ~2% izmaina slīdēšanas ātrumu. Pie $R_{Sm}/S_a \sim 1200$ tiek novērots optimuma zona kurā visbiežāk novēroti lielākie slīdēšanas ātrumi, savukārt, turpinot samazināt negludumu slīpumu tiek sasniegta mazās ietekmes zona kurā novērojams minimāls

slīdēšanas ātruma kritums, taču, pēc savas vērtības šis kritums ir ar ievērojami zemāku intensitāti t.i. R_{Sm}/S_a palielināšanās par ~400 vienībām samazina slīdēšanas ātrumu par ~0,3% , kas ir ar sešas reizes mazāku intensitāti kā lielās ietekmes zonā. Paraugu slīdēšanas ātruma samazinājums, veicot apstrādi ar smalku graudu smilšpapīriem, skaidrojams ar to, ka gludākām virsmām ar lēzenākiem negludumiem parādās ievērojami lielāki adhēzijas spēki, kuri paraugu pievelk pie ledus virsmas, tādējādi bremsējot tā kustību. No šī novērojuma var secināt, ka nav īsta pamata veikt virsmu apstrādi ar ļoti smalku graudu smilšpapīriem, jo tas paildzina un sadārdzina apstrādes procesu, kā arī pasliktina slīdēšanas īpašības. Šajā mirklī gan ir būtiski piebilst, ka iegūtās līknes attiecināmas uz konkrēto eksperimentu uzstādījumu, t.i. līknes raksturs var atšķirties izmainot parauga piespiešanas spēku pie ledus. Pieaugot piespiešanas spēkam, virsmu negludumi tiek iespiesti ledus virskārtā, kā arī tie izspiežas caur ūdens slāni, kurš atrodas uz ledus virskārtas tādējādi kavējot parauga kustību.

Kā minēts iepriekš, temperatūras izmaiņas klimata simulācijas kamerā būtiski ietekmē iegūtos rezultātus. Lai noskaidrotu kāds ir šīs ietekmes raksturs, tika veikti eksperimenti, kuros pārbaudīts kā pie trīs dažādām temperatūrām mainās paraugu slīdēšanas īpašības. Eksperimenti veikti izmantojot divus paraugus no katra apstrādes veida (pulēts, skrāpēts ar 3000. graudu izmēru smilšpapīru, skrāpēts ar 600. graudu izmēru smilšpapīru). Iegūtās līknes apskatāmas sekojošajā attēlā un tajās redzami punkti aprēķināti kā vidējā vērtība no abu vienādā apstrādes tipa paraugu slīdēšanas ātrumiem, kuri, savukārt aprēķināti kā vidējā vērtībā no 80 individuāliem mērījumiem paraugam, t.i. katrs punkts veidojas no 160 mērījumu rezultātiem.



7.att. Apkārtējās vides temperatūras ietekme uz dažādi apstrādātu virsmu (pulēts, skrāpēts ar 3000. graudu izmēru smilšpapīru, skrāpēts ar 600. graudu izmēru smilšpapīru) slīdēšanas īpašībām.

No iegūtā grafika redzams, ka pie zemām gaisa temperatūrām raupjuma ietekme uz slīdēšanu būtiski mazinās, t.i. visu paraugu slīdēšanas ātrumi kļūst ļoti līdzīgi (diference starp ātrāko un lēnāko $\sim 0,6\%$) un praktiski nav iespējams viennozīmīgi norādīt uz virsmas apstrādi, kura visvairāk uzlabo slīdēšanu.

Ja gaisa temperatūra paaugstinās, slīdēšanas ātrums pieaug un redzams, ka starp dažādi apstrādātām virsmām sāk parādīties būtiskākas ātrumu atšķirības (diference starp ātrāko un lēnāko $\sim 1,8\%$). Jo sevišķi labi tas redzams paraugam, kurš skrāpēts ar 600. graudu izmēra smilšpapīru, savukārt pulētās virsmas joprojām slīd līdzīgi kā tās, kuras apstrādātas ar 3000. graudu izmēra smilšpapīru. Tas skaidrojams ar šo parauguniecīgajām virsmas tekstūras atšķirībām.

Turpinot paaugstināt temperatūru līdz $-3 \pm 1^\circ\text{C}$, uzrādās ievērojamas ($\sim 6\%$) slīdēšanas ātrumu atšķirības starp lēnāko un ātrāko paraugu. Kopumā visiem paraugiem slīdēšanas ātrums kļūst lēnāks, kā pie $-8 \pm 1^\circ\text{C}$. Līdzīgi kā iepriekš apskatītajos eksperimentos (skat. 1.6. att.) virsmas ar minimālu skrāpējumu intensitāti (apstrādātas ar 3000. graudu izmēra smilšpapīru) slīd labāk par “spoguļgludi” slīpētajām virsmām un pie $-3 \pm 1^\circ\text{C}$ šī atšķirība jūtama vislabāk, jo šādā temperatūrā uz ledus virskārtas veidojas ievērojama šķidrā slāņa plēvīte, kura veido spēcīgu adhēzijas saiti starp pulēto virsmu un ledu.

Rezumējot augstāk apskatītos datus var izvirzīt priekšlikumu, ka gadījumos, kad starp slīdošajām virsmām (ledus-tērauds) ir mazi kontakta spiedieni, vislabākās slīdēšanas īpašības dod virsmas ar minimāli “saskrāpētu” tekstūru, jo tādejādi tiek samazināti adhēzijas spēki starp ledu un virsmu, kas kavē slīdēšanas procesu. Visvairāk raupjuma izmaiņas ietekme jūtama pie augstām gaisa temperatūrām, t.i. tuvu ledus kušanas temperatūrai.

2. Virsmas cietības ietekme uz slīdamību

Pētījumu klāsts par virsmu slīdēšanu pa ledu vai sniegu kļūst arvien apjomīgāks un tajos apskatītie jautājumi nu jau aizņem plašu izpētes diapazonu. Pētījumos tiek apskatīti dažādi materiāli un to virsmas modifikācijas, kuras pamatā orientētas uz tekstūras izmaiņšanu. Viens no aspektiem ir veikt šīs virsmu modifikācijas, bet otrs ir panākt, lai šīs izmaiņas spēj ilgstoši saglabāties nemainīgas. Kā viens no vienkāršākajiem risinājumiem nerūsējošā tērauda virsmas tekstūras nostiprināšanā ir tā cietības palielināšana veicot termisko apstrādi. Apstrādes rezultātā virsmas kļūst noturīgākas pret jauniem skrāpējumiem un negludumu formas izmaiņām, taču, līdz šim nav veikti pētījumi vai termiskās apstrādes rezultātā materiālā notiekošās struktūras un virsmas enerģijas izmaiņas neietekmē to slīdēšanas spēju pa ledu. Lai to noskaidrotu, tika veikts izpētes process, kura gaita sīkāk apskatīta nodaļas turpinājumā.

2.1. Informācija par izmantoto materiālu

Projekta ietvaros izmantots Zviedru tērauda ražošanas koncerna *Uddeholm* nerūsējošais tērauds *Ramax HH* (atbilstoši EN: X12Cr Mn Mo Ni S Si V 13,4-1,3-0,5-1,6-0,1-0,2-0,2), kura struktūrā pēc ražotāja sniegtās informācijas atrodami ķīmiskie elementi uzrādīti 2.1. tabulas apakšējā rindā.

No 2.1. tabulā norādītā ķīmiskā sastāva redzams, ka šis ir legēts cementējamais konstrukciju tērauds (turpmāk –tērauds), kurā legējošais elements ar vislielāko procentuālo daudzumu ir hroms (Cr). Hroma, kā galvenā legējošā elementa, izvēle skaidrojama ar nepieciešamību pēc ļoti augstas korozijas noturības, jo materiālam paredzēts funkcionēt mitros apstākļos, kā arī labas nodilumizturības. Tērauda sastāvā bez hroma atrodama virkne citu legējošo elementu, kuru ietekme uz materiāla struktūru un rūdāmību sīkāk apskatīta nodaļas turpinājumā.

Lai salīdzinātu kā ražotāja sniegtie dati sakrīt ar reāli izmantoto materiālu, tika veikta divu materiāla paraugu ķīmiskā sastāva analīze. Ķīmiskā analīze veikta ar emisijas spektroskopu *PMI Master Pro*. Katram paraugam veikti mērījumi 3 dažādās vietās (katrā vietā veikti 3 atkārtoti mērījumi), no kuriem aprēķināta vidējā vērtība (skat. 2.1.tab.).

2.1.tab. Uddeholm Ramax HH ķīmiskās sastāva analīzes rezultāti.

Paraugs		Fe	Cr	C	Ni	Mn	Si	P	S	Mo	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
Paraugs 1	1	83,5	12,5	0,128	1,48	1,29	0,189	0,064	0,039	0,452	0,013	0,031	0,058	0,005	0,0039	0,159	0,025	0,01
	2	83,1	12,5	0,192	1,54	1,36	0,207	0,102	0,070	0,471	0,006	0,033	0,065	0,005	0,0037	0,168	0,032	0,01
	3	82,9	12,8	0,133	1,49	1,34	0,185	0,120	0,066	0,473	0,015	0,030	0,061	0,005	0,0041	0,164	0,025	0,01
	Vid.	83,2	12,6	0,151	1,50	1,33	0,194	0,095	0,058	0,465	0,011	0,031	0,061	0,005	0,0039	0,164	0,027	0,01
Paraugs 2	1	82,9	12,9	0,135	1,48	1,33	0,166	0,120	0,076	0,467	0,002	0,030	0,061	0,005	0,0038	0,166	0,025	0,01
	2	82,7	12,9	0,150	1,54	1,35	0,178	0,120	0,090	0,478	0,002	0,030	0,065	0,005	0,0039	0,172	0,034	0,01
	3	82,8	13,0	0,136	1,45	1,32	0,160	0,120	0,088	0,463	0,002	0,029	0,063	0,005	0,0042	0,166	0,025	0,01
	Vid.	82,8	12,9	0,140	1,49	1,33	0,168	0,120	0,085	0,469	0,002	0,030	0,063	0,005	0,0040	0,168	0,028	0,01
Ramax HH	-	82,6	13,4	0,12	1,6	1,3	0,2	-	0,1	0,5	-	-	-	-	-	0,2	-	-

Kā redzams no 2.1. tabulas datiem, galvenie slieces materiālu veidojošie elementi samērā precīzi (novirze mazāka par 10%) sakrīt ar ražotāja tehniskajā dokumentācijā norādīto. Tiek novērots, ka materiālā atrodama virkne citu elementu, kuru procentuālais daudzums ir zem 0,1%, kā arī tiek fiksēts ap 0,1-0,12% liels fosfora piemaisījums, kuru ražotājs savā specifikācijā nav norādījis. Materiāla sastāvā esošie legējošie elementi ietekmē tērauda pamatstruktūru, īpašības un termisko apstrādi, tāpēc sākotnēji apkopota informācija par to, kā katrs no legējošajiem elementiem ietekmē materiāla īpašības. [1,2]

- Hroms ir karbīdus veidojošs elements, kas palielina dziļrūdāmību, cietību un nodilumizturību. Tēraudiem ar hroma saturu virs 11 % (kā tas ir konkrētajā gadījumā) piemīt augsta korozijizturība un karstumizturība. Hroms tēraudam palielina atlaidināšanas trauslumu;
- Mangāns palielina tēraudu dziļrūdāmību, stiprību, elastību un nodilumizturību. Mangāns veicina graudu augšanu un atlaidināšanas trauslumu. Mangāns spēj veidot ķīmisko savienojumu ar sēru (MnS), kurš uzlabo materiāla apstrādājamību ar griezējinstrumentiem;
- Silīcijs palielina tēraudu stiprību, nodilumizturību, elastību, dziļrūdāmību un antifrikcijas īpašības, bet samazina plastiskumu, paaugstina rūdīšanas, normalizācijas un atkvēlināšanas temperatūras. Silīcija piemaisījumi ļauj iegūt struktūru ar mazāk mikrodefektiem;
- Niķelis palielina dziļrūdāmību (sevišķi kopā ar hromu), veicina stiprības un korozijizturības palielināšanos augstās temperatūrās. Rūdītām struktūrām nodrošina smalkgraudainu struktūru ar augstu stiprību, plastiskumu un stigrību. Niķelis uzlabo cementēta slāņa mehāniskās īpašības. Mazās devās niķelis uzlabo tērauda mehāniskās īpašības pie zemām temperatūrām;

- Molibdēns ir karbīdus veidojošs elements, kas palielina dziļrūdāmību, samazina tēraudu atlaidināšanas trauslumu, veicina smalkgraudainību, palielina stiprību, plastiskumu un stigrību. Uzlabo noturību pret oksidēšanos, kā arī hlora un sēra savienojumiem;
- Vanādijs ir karbīdus veidojošs elements, nelielos daudzumos veicina smalkgraudainību, cietības saglabāšanos pēc atlaidināšanas un tēraudu stigrības pieaugumu;
- Sērs uzlabo materiāla apstrādājamību ar griezējinstrumentiem, palielina materiāla elastību šķērsvirzienā, bet minimāli ietekmē materiāla mehāniskās īpašības garenvirzienā.

No apkopotās informācijas var secināt, ka materiāla sastāvā esošie legējošie elementi izvēlēti ar mērķi iegūt korozijnoturīgu, stigru un nodilumizturīgu tēraudu ar smalkgraudainu struktūru, kura salīdzinoši labi pakļaujas mehāniskajai apstrādei.

Pēc ražotāja sniegtās informācijas [3], tērauds tiek piegādāts jau termiski apstrādāts (rūdīts un atlaidināts), kas nodrošina cietību robežās no 320 – 350 HB. Šādi sagatavotam tēraudam pie istabas temperatūras (+20°C) ražotājs norāda sekojošas mehāniskās īpašības:

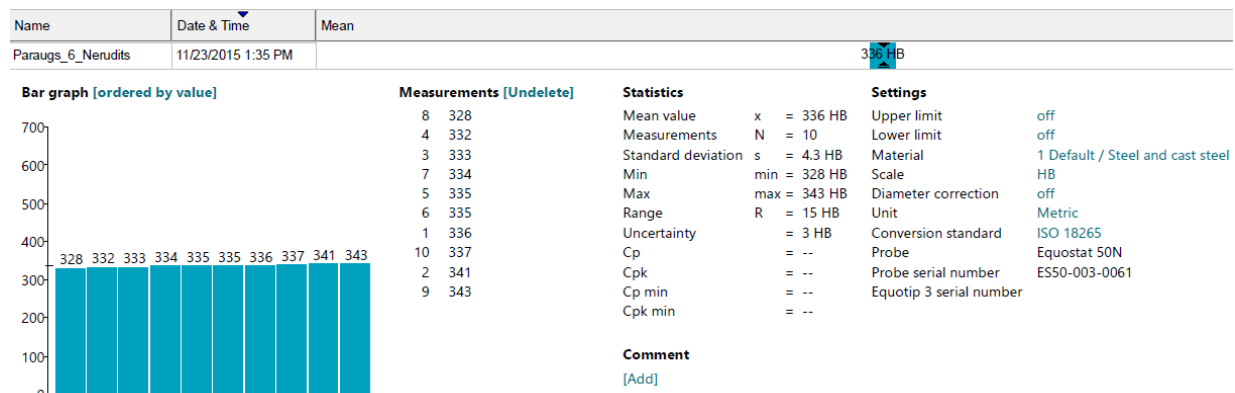
- Maksimālā stiprība (R_m) – 1140 MPa;
- Tecēšanas robeža ($R_{0,2}$) – 990 MPa;
- Plastiskums ($A\%$) – 12%.

Lai noskaidrotu reālo izejmateriāla cietību, tika veikti materiāla cietības mērījumi četriem eksperimentālajiem paraugiem, izmantojot pārnēsājamo cietības mērītāju *Equostat 3* (Proceq, Šveice) kas darbojas pēc pārnēsājamā Rokvela (Portable Rockwell) principa (skatīt 2.1. attēlu).



2.1.att. Proceq Equostat 3 cietības mērītāja komplekts.

Katram paraugam tika veikti 10 cietības mērījumi (izkliedēti pa visu virsmu) no kuriem aprēķināta vidējā vērtība. Mērījumu protokola piemērs apskatāms 2.2. attēlā.



2.2.att. Cietības mērījuma protokola piemērs.

Iegūtie vidējo cietības rādījumu rezultāti apkopoti sekojošajā pārskata tabulā:

2.2.tab. Materiāla cietības mērījumi pirms papildus termiskās apstrādes.

Parauga Nr.	Cietība, HB	Standartnovirze, HB
R1	324	4,4
R2	353	4,1
R3	338	2,3
R4	330	4,3
R5	323	4,2
R6	346	3,9

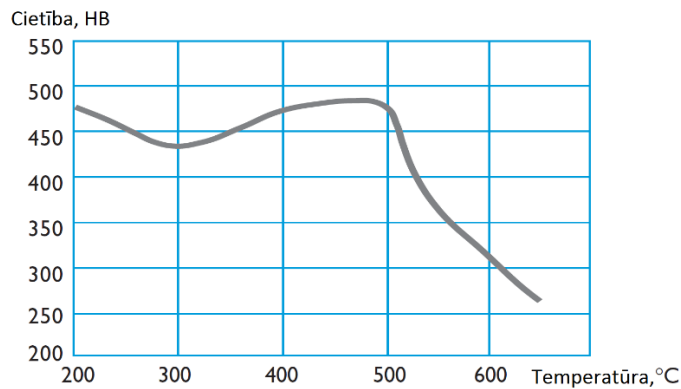
No iegūtajiem mērījumu rezultātiem redzams, ka faktiskās paraugu cietības pilnībā iekļaujas ražotāja noteiktajā diapazonā un mērījumu rezultātu standartnovirze nepārsniedz 5HB vienības, kas norāda ka materiāla cietība ir homogēna pa visu parauga virsmu.

2.2. Paraugu termiskā apstrāde

Lai variētu paraugu virsmas cietību tiem tika veikta termiskā apstrāde. Zemāk norādīti ražotāja ierosinātie materiāla termiskās apstrādes procesi un to parametru diapazoni: [3]

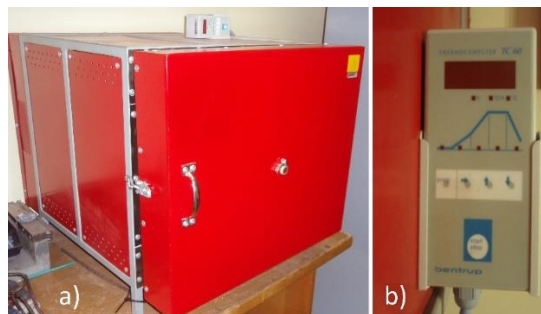
- Atkvēlināšana – veic pēc mehāniskās apstrādes (paraugu izfrēzēšanas), lai samazinātu radušos iekšējos spriegumus. Materiālu sakarsē līdz 530°C, iztur 2h un dzesē gaisā;
- Rūdīšana – veic, lai iegūtu lielāku materiāla cietību. Procesu vēlams realizēt aizsargvidē, lai samazinātu oglekļa izdalīšanos un virskārtas oksidēšanos. Materiālu karsē līdz 980 - 1020°C temperatūrai, iztur 30 min. un dzesē eļļā vai sāls vannā. Rezultātā iegūst materiāla cietību nedaudz virs 500 HB, bet iegūtā struktūra ir trausla;

- c) Atlaidināšana – veic, lai samazinātu rūdīšanas procesā radušos iekšējos spriegumus, kā arī, lai iegūtu vēlamo materiāla cietību. Atlaidināšanu izpilda uzreiz pēc rūdīšanās tūdaļ kā sliedes temperatūra samazinājusies zem 50°C . Procesu vēlams atkārtot divas reizes, atdzesējot detaļu līdz istabas temperatūrai. Sakarsēšanas temperatūra atkarīga no vēlamās cietības HB, kuru iespējams variēt diapazonā no 260HB līdz 480HB (izvēlētās temperatūras un cietības atkarības līkne apskatāma zemāk).



2.3.att. Materiāla atlaidināšanas temperatūras un tās veidotās cietības līkne.[3]

Pēc teorētisko līkņu analizēšanas tika veikta reāl eksperimentālo paraugu termiskā apstrāde, izmantojot rūdīšanas krāsni (skat. 2.4.att. a), kuras temperatūras kontrole tiek vadīta ar TC60 temperatūras kontroles moduli (Bentrup, Vācija) (skat. 2.4.att. b). Rūdīšanas process notiek bez aizsarggāzu vides, t.i. parastā atmosfērā.



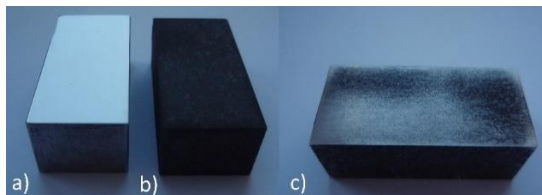
2.4.att. Termiskās apstrādes: a)Krāsns; b)Temperatūras kontroles modulis.

Termiskās apstrādes process tika realizēts pēc Uddeholm Ramax HH tehniskās dokumentācijas norādījumiem [3], izejot sekojošus etapus:

- Atkvēlināšana, kuras laikā paraugs no istabas temperatūras tiek uzkarsēts līdz 530°C un izturēts šādā temperatūrā 2h. Tam seko dzesēšana istabas atmosfērā;
- Rūdīšana 1000°C temperatūrā, izturēšanas periods 30 min. ar sekojošu dzesēšanu eļļā;

- c) Dubultā atlaidināšana, kam abās reizēs seko atdzesēšana istabas atmosfērā. Atlaidināšanas temperatūra atkarīga no vēlamās virsmas cietības, t.i. paraugiem R1, R2: 550°C, paraugiem R3, R4: 370°C, paraugiem R5, R6: 180°C.

Termiskās apstrādes procesā uz eksperimentālo paraugu virskārtas izveidojas liels oksīdu slānis (skat. 2.5.att. b), kurš ar smilšpapīra palīdzību tiek daļēji noberzts, tādējādi sagatavojot parauga darba virsmu ar raupjumu $R_a \leq 2 \mu\text{m}$, kas ir nepieciešams, lai veiktu korektus cietības mērījumus (skat. 2.5.att. c).



2.5.att. Eksperimentālais paraugs: a)Pirms termiskās apstrādes; b)Pēc termiskās apstrādes; c)Pēc oksīdu slāņa primārās noberšanas.

Visiem paraugiem pēc oksīdu slāņa noberšanas tika veikti atkārtoti cietības mērījumi un iegūtie rezultāti atspoguļoti sekojošā tabulā:

2.3.tab. Materiāla cietības izmaiņas pēc papildus termiskās apstrādes.

Parauga Nr.	Pirms rūdīšanas, HB	Pēc rūdīšanas, HB	Standartnovirze, HB
R1	324	373	5,3
R2	353	373	8,1
R3	338	441	4,6
R4	330	436	10,9
R5	323	487	6,7
R6	346	492	5,4

Paraugus var iedalīt trīs grupās, kur katrā atrodami divi paraugi:

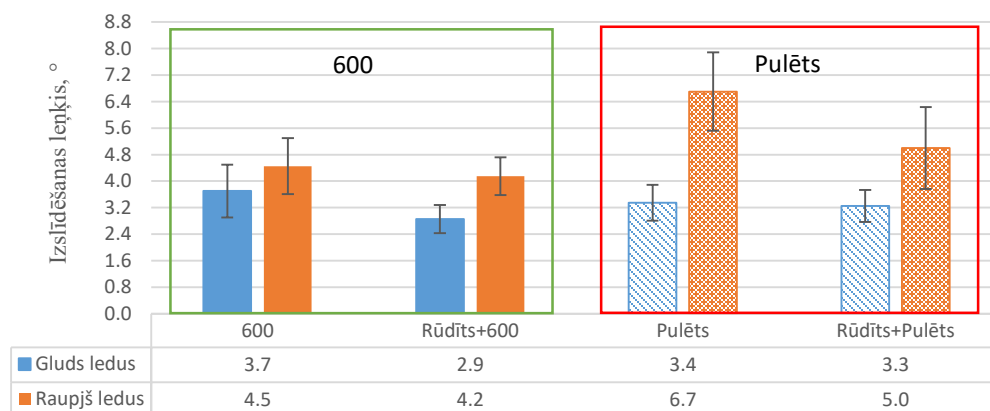
- Cietība ~ 370 HB (R1, R2);
- Cietība ~ 440 HB (R3, R4);
- Cietība ~ 490 HB (R5, R6).

Tiek novērots pēc termiskās apstrādes paraugu cietības mērījumiem ir lielāka standartnovirzes vērtība nekā sākotnēji, kas skaidrojams ar neviendabīga oksīdu slāņa veidošanos uz paraugu virsmas.

2.3. Rūdīto paraugu slīdēšanas īpašību pārbaude

Lai noskaidrotu kā atšķiras rūdītu un nerūdītu paraugu slīdēšanas īpašības tika veikti gan statiskie, gan dinamiskie testi. Statisko testu laikā salīdzināti izslīdēšanas leņķi gan rūdītiem, gan nerūdītiem paraugiem, kuru virsmas ir vai nu pulētas, vai skrāpētas ar 600. markas smilšpapīru. Pārbaude veikta pie -4°C ledus temperatūras gan pa gludu, gan nedaudz raupju ledu, lai

noskaidrotu vai vispārīgā izslīdēšanas tendence pa atšķirīgu ledu virsmām ir līdzīga. No vairāku dienu eksperimentu vidējiem datiem izveidots zemāk redzamais pārskata grafiks.

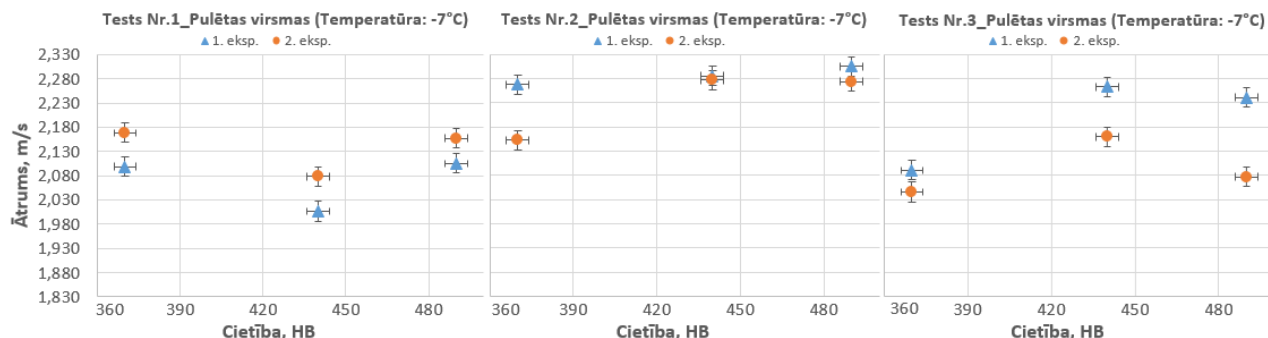


2.6.att. Rūdīto un nerūdīto paraugu izslīdēšanas leņķu salīdzinājum.

2.6. attēlā redzams, ka visos gadījumos rūdītajiem paraugiem ir nedaudz zemāki izslīdēšanas leņķi, t.i. mazāks miera stāvokļa berzes koeficients nekā analogiski apstrādātiem paraugiem bez termiskās apstrādes. Gluda ledus gadījumā rūdītiem skrāpētiem paraugiem ir par 20% mazāks miera stāvokļa berzes koeficients, bet pulētiem rūdītiem paraugiem šī atšķirība ir tikai par 3%, ko var uzskatīt par vērā neņemamu, t.i. ja ledu virsma ir gluda un cieta, pulētām virsmām nav nozīmes būt rūdītām, no berzes koeficienta viedokļa, bet termiskā apstrāde var sniegt papildus noturību pret skrāpējumiem, kuri bojā virsmu. Ja salīdzina datus, kas iegūti uz raupjākas virsmas ledu, redzams, ka tieši skrāpētajiem paraugiem ir līdzīgāki rezultāti, t.i. rūdītiem paraugiem par 6% mazāks miera stāvokļa berzes koeficients, savukārt pulētajām virsmām rūdītie paraugiem ir par 25% mazāks miera stāvokļa berzes koeficients. Uzskatāmi redzams, ka raupja ledu gadījumā mērījumiem ir būtiskāka rezultātu izkliede, kas pamatojama ar nevienmērīgu ledu tekstūru. Kā ļoti interesantu novērojumu jāmin to, ka pulētiem paraugiem raupja ledu gadījumā ir būtiski lielāks (~25%) miera stāvokļa berzes koeficients, kam viennozīmīgu skaidrojumu pagaidām nav izdevies rast.

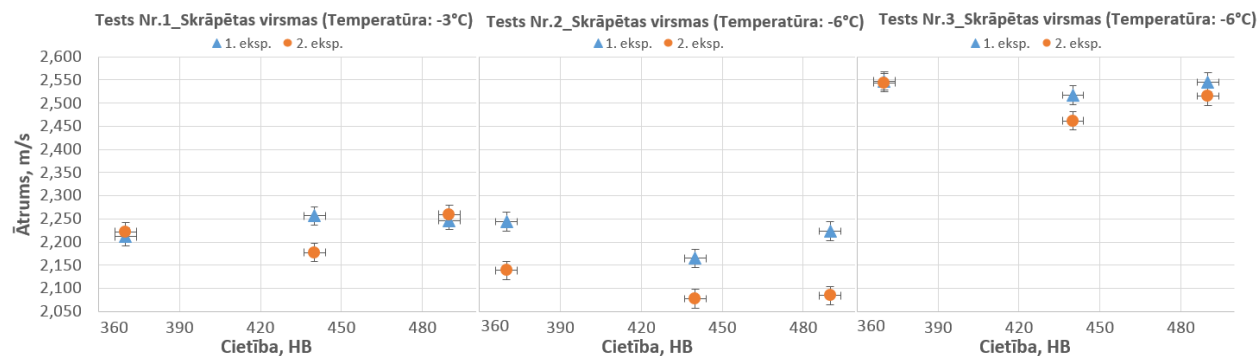
No apskatītajiem rezultātiem var izvirzīt rekomendāciju, ka ja nepieciešams mazināt virsmas, piemēram, ēkas jumta miera stāvokļa berzes koeficientu, lai veicinātu sniega un ledu slīdēšanu no tā, ir iespēja veikt virsmas rūdīšanu, taču, jāņem vērā, ka pēc termiskās apstrādes metāliskajām konstrukcijām būs jāveic ievērojams slīpēšanas process, lai tās iegūtu vizuāli estētisku veidolu, jo pēc termiskās apstrādes virsmas klāj oksīda kārtas (skat. 2.5. att.).

Pēc statisko testu veikšanas tika realizēti plaši dinamiskie testi ar pulētajiem paraugiem. Primāri tika pārbaudīta visu rūdīto paraugu slīdēšana ar pulētām virsmām. Iegūtie dati apskatāmi zemāk redzamajā attēlā.



2.7.att. Pulētu rūdīto paraugu slīdēšanas īpašības.

Eksperimentu grafikos salīdzināts kā mainās paraugu slīdēšanas īpašības mainot virsmas cietību. Iegūtie dati rāda līdz šim neredzēti nestabilus rezultātus, t.i. paraugiem vienas dienas ietvaros ir vienādas slīdēšanas tendences, taču to slīdēšanas tendences kardināli atšķiras no dienas uz dienu. Kā nestabilākie no paraugiem jāmin tie, kuri norūdīti līdz cietībai ~ 440HB, jo tie mēdz būt gan ātrākie, gan lēnākie paraugi, atkarībā no eksperimentu dienas. Nevienos citos dinamiskajos eksperimentos nav novērota tik dīvaina slīdēšanas tendences maiņa, lai gan tieši slīpētu virsmu gadījumā mērījumu rezultāti ir visgrūtāk prognozējami, tāpēc veikts papildus tests šīs virsmas skrāpējot ar 600. markas smilšpapīru. Iegūtie rezultāti apskatāmi zemāk redzamajā attēlā.



2.7.att. Pulētu rūdīto paraugu slīdēšanas īpašības.

Kā redzams, arī pēc virsmu skrāpēšanas paraugu dinamiskās slīdēšanas īpašības ir mainīgas no dienas uz dienu, tādejādi liedzot izdarīt ticamu slēdzienu par to kā virsmas rūdīšana ietekmē paraugu slīdēšanu. Svarīgi piebilst, ka trešā testa rezultātu augstās slīdēšanas ātruma

vērtības skaidrojamas ar to, ka šajā eksperimentu dienā tika sagatavota gludāka ledus virsma kā pirmajos divos testos.

No iegūtās eksperimentu informācijas var secināt, ka paraugiem, veicot termisko apstrādi, samazinās miera stāvokļa berzes koeficients, kas var dod pozitīvu rezultātu, lai veicinātu apledojuma un sniega slāņa slīdēšanu no ēku jumtiem, taču dinamisko mērījumu rezultāti rāda, ka šo virsmu uzvedība dinamiskā režīmā ir haotiska, kas liedz izdarīt adekvātus slēdzienus par to, vai pastāv likumsakarība starp virsmas nocietināšanas līmeni un slīdēšanas īpašībām pa ledu.

3. Hidrofobitātes ietekme uz slīdamību

3.1. Polimēri

Polimēri dod daudz plašākas iespējas izveidot atšķirīgas virsmas no slapjamības viedokļa, salīdzinot ar metāliem. Pirmais solis ir apskatīt kā polimēri iespaido slīdamību. Ja rodas labvēlīgi rezultāti, tad nākamais solis ir uzlikt polimēra virsmas funkcionalitāti uz metāla virsmas. Šī izpēte izskatīs, kā polimeri ietekmē slīdamību, tad kombinēs hidroforu virsmu ar tekstūras raupjumu, lai noteiktu kā hidroforitāte un raupjums kopīgi iespaido kustību pa ledu.

Eksperimentiem tika izvēlēti 4 dažādi polimēri: polietilēns (PE), politetrafluoretilēns (PTFE), polietilēna tereftalāts (PET) un polivinilhlorīds (PVC). Polimēri tika izfrēzēti taisnstūra formā ar izgriezumu, kurā būtu iespējams ievietot vēl vienu taisnstūra formas metāla gabalu, lai nodrošinātu tādu pašu parauga masu un izmērus kā iepriekš aprakstītajiem tērauda paraugiem. Paraugu izmēri: 40 x 18 x 14 mm ± 0.1 mm, to masa: 75 ± 3 g. Katram polimēru tipam tika sagatavoti 4 paralēlie paraugi, lai nodrošinātu maksimālu rezultātu atkārtojamību. Polimēru virsma tika apstrādāta tos pulējot. Šim nolūkam izmantota *BUEHLER Fine MicroCloth* virsma, uz kuras smidzināja *BUEHLER 0,06 μm MastetMt™ Colloidal silica polishing suspension*, tādējādi veicot polimēru virsmas smalko pēcapstrādi.

Polimēru īpašību noteikšanai tika izmantota diferenciālā skenējošā kalorimetrija. Mērījumi tika veikti inertā N₂ atmosfērā, karsējot 10 mg polimēra ar ātrumu 10 °C/min. Informācija par polimēru kušanas un stiklošanās temperatūru un entalpiju ir apkopota 2.2. tabulā. No apskatītajiem polimēriem PVC ir amorfs, savukārt pārējie ir kristāliski.

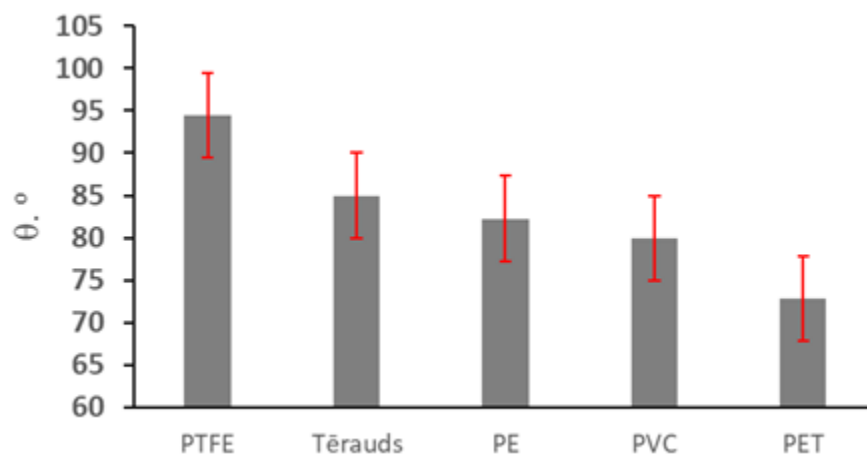
3.1. tab. Polimēru īpašības

Polimērs	$T_{\text{kušs}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{st}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{Eksp}}, \text{J/g}$	D Shore cietība
PE	115	-	135,64	66
PTFE	18	-	6,96	56
PET	210	-	37,46	83
PVC	-	74	-	87

Polimēra materiālu cietība tika pārbaudīta ar Shore D dūrometru. Mērījumi notiek, iespiežot konusveida prizmu polimērā, līdz pieliktais spēks ir vienāds ar materiāla pretestību. Katram paraugam tika veikti 10 mērījumi, vienmēr nodrošinot vienādu pielikto spēku. 3.1 tabulā apkopotie rezultāti rāda, ka polimēri ir cieti, jo to vērtība pārsniedz skaitli 30. PVC un PET pēc iegūtajiem datiem var uzskatīt par sevišķi cietiem polimēriem, jo to cietība ir ap 80 vienībām.

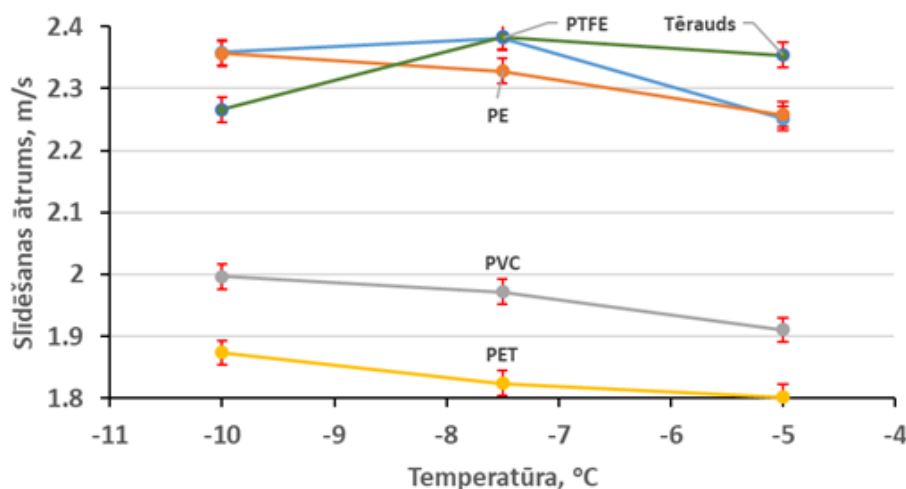
Kontaktleņķis θ norāda, cik labi virsmu slapē vai neslapē ūdens. Ja virsmu neslapē, tad materiāls ir hidrofobs, attiecīgi virsmas kontaktleņķis ir liels. Slapēšanas spēju materiālam nosaka tā ķīmiskais sastāvs, virsmas raupjums un virsmas tīrība.

Polimēru kontaktleņķis θ tika mērīts ar OCA 20 goniometru. Uz katra parauga tika pilināti seši 5 μL lieli dejonizēta ūdens pilieni. Ar goniometra digitālo kameru katrs piliens tika novērots 15 s, ik pa sekundi automātiski nolasot kontaktleņķa vērtību. Rezultāti rāda, ka visaugstākā θ vērtība ir PTFE ar 95° , bet viszemākā PET ar 73° (attēls 3.1). Hidrofobitātes vērtības ir apgriezti proporcionālas polimēru cietībai, respektīvi, PTFE ar augstāko hidrofobitāti ir vismīkstākais, savukārt, PET ar zemāko hidrofobitāti ir ar augstāko cietību. Polimēru kontaktleņķu vērtības tika salīdzinātas ar pulēta tērauda kontaktleņķa vērtībām. Rezultāti rāda, ka PTFE virsma ir par $\sim 10^\circ$ hidrofbāka, salīdzinot ar pulēta tērauda virsmu.



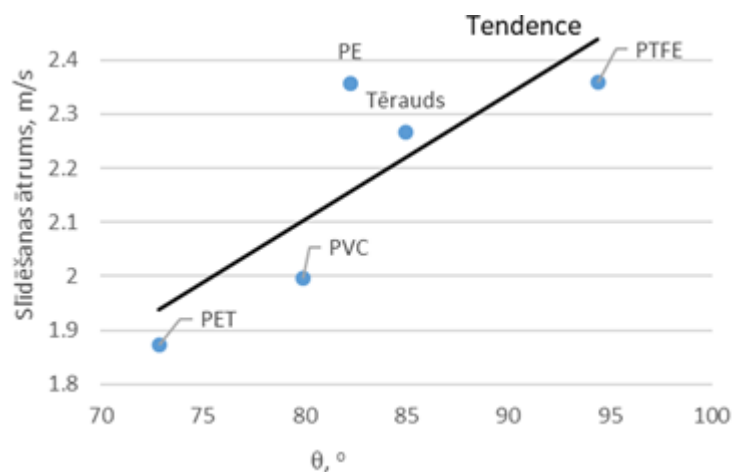
3.1. att. Polimēru un tērauda kontaktleņķa vērtības.

Lai novērtētu hidrofobitātes ietekmi uz paraugu slīdēšanas ātrumu, veikti slīdamības eksperimenti laboratorijas trasē. Rezultāti rāda, ka no apskatītajiem polimēriem vislielākais slīdēšanas ātrums (2,36 m/s) raksturīgs PTFE, savukārt vislēnākais materiāls ir PET ar slīdēšanas ātrumu 1,8 m/s (skat. 3.2. att.). Rezultāti arī uzrādīja atšķirīgas slīdēšanas ātruma tendences pie dažādām temperatūrām: pie $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ visātrākais slīdēšanas ātrums tika novērots pulētam tēraudam, pie $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – PTFE un pie $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ - PE. Samazinoties gaisa temperatūrai no $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, pulēta tērauda slīdēšanas ātrums samazinājās par aptuveni 0,1 m/s, savukārt polimērmateriāliem raksturīga pretēja tendence - samazinoties gaisa temperatūrai no $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, polimēru slīdēšanas ātrums palielinās par aptuveni 0,1 m/s.



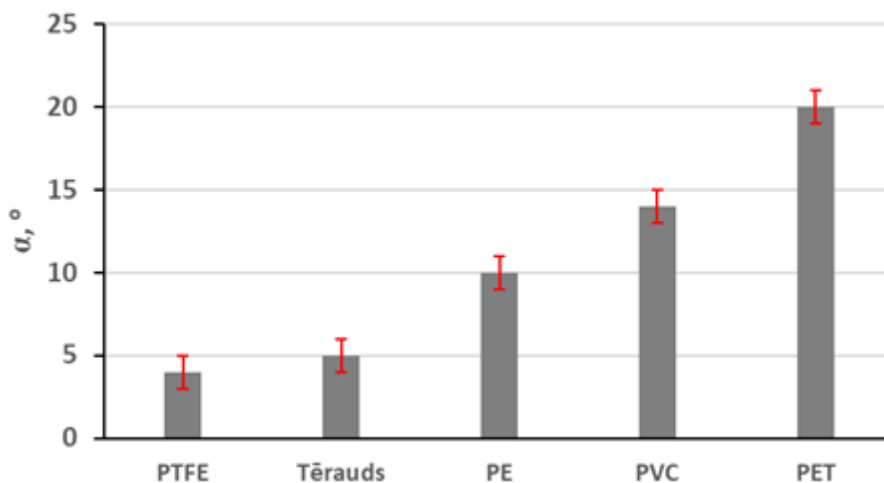
3.2. att. Polimēru un metāla ātruma atšķirība pie dažādām temperatūrām

Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka, paaugstinoties virsmas hidrofobitātei, pieaug materiāla slīdēšanas ātrums, jo polimēri ar zemāku kontaktleņķi θ slīd lēnāk nekā polimēri ar augstāku θ vērtību. Par aptuveni 20° lielāka PTFE kontaktleņķa vērtība nodrošināja par aptuveni 0,5 m/s lielāku slīdamības ātrumu, salīdzinot ar PET. Salīdzinot slīdēšanas ātrumu ar hidrofobitāti, var iegūt tendences līkni, kas aptuveni raksturo šo lielumu savstarpējo attiecību (skat. 3.3. att.). Līkne rāda, ka, pieaugot kontakta leņķa θ vērtībām, palielinās parauga slīdēšanas ātrums. Šī sakarība saglabājas pie visām trim apskatītajām temperatūrām.



3.3. att. Hidrofobitātes un slīdēšanas ātruma atkarība pie $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pēc norādītā līnijas, slīdēšanas ātrumu var izrēķināt reizinot slāpjamības leņķi ar 0.022 un tad pieliekot 0.36 m/s.

Bez slīdēšanas ātruma zināšanas, ir svarīgi saprast, cik viegli jeb pie kāda leņķa materiāls uzsāk kustību pa ledu. Sākuma slīdēšanas leņķis α noteikts, izmantojot mazāka mēroga slīpās plaknes mērierīci, kur, mainot leņķi, tiek fiksēts, kad materiāls uzsāk kustību pa ledu. Attiecīgais leņķis tiek reģistrēts manuāli. Kā sagaidāms, šīs vērtības ir tiešā veidā saistītas ar paraugu hidrofobitāti, resp., viszemākā α vērtība (4°) raksturīga PTFE, savukārt PET kustību pa ledu uzsāk tikai pie plaknes leņķa $\alpha = 20^{\circ}$ (skat. att. 3.4.).



3.4.att. Materiālu sākuma slīdēšanas leņķis

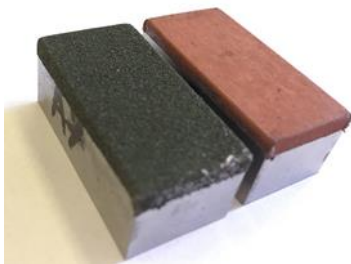
Zinot leņķi, pie kura materiāls sāk slīdēt, ir vieglāk izprast dažādu materiālu saskarsmi ar ledu. Jo zemāks sākuma slīdēšanas leņķis α , jo grūtāk materiālam ir uzsākt kustību un apstāties,

taču materiāliem ar augstu α vērtību palielinās berzes koeficients ar ledu, tādējādi palielinot drošību uz ledus.

3.2. Hidrofobie pārklājumi

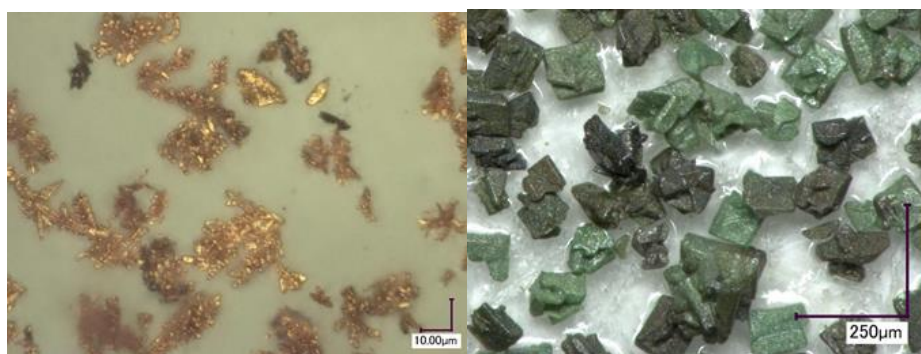
Iepriekšējā nodaļā norādīts ka hidrofbicitāte veicina kustību pa ledu. Cietām virsmām var palielināt hidrofbicitāti līdz aptuveni 105 grādiem, tālāk ir jāizmanto nano un mikrostrukturizēšanu kopā ar ūdens atgrūstošiem materiāliem, lai panāktu lielāku pretslapjamību. Šajā nolūkā apskatīja pretslapinošu pulveru uz virsmas, toties šajā gadījumā veidojās raupjums, noteikts netiešā veidā no pulvera grauda lielumu. Apskatīs kā grauda lielums un preslapināmība ietekmēs kustību pa ledu. Visbeidzot atgriezīsies pie cietām virsmām izskatot uz stikla pamata veidotu hidrofbisku virsmu, un tās ietekmi uz slidamību.

Sadarbībā ar University College London (UCL) tērauda paraugi tika pārklāti ar divu veidu komerciāliem hidrofbiem pulveriem. Tika izmantota sausā pulvera uzklāšanas metode - tērauda paraugi tika pārklāti ar speciāli veidotu raupju adhezīvu līmlentu, uz kuras tika uzklāti hidrofbie pulveri. Paraugi, ņemot vērā hidrofbu pārklājumu krāsu, tika apzīmēti "brūnais" un "zaļais" (3.5. att), un to vidējā kontaktenķa vērtība bija 144 °.



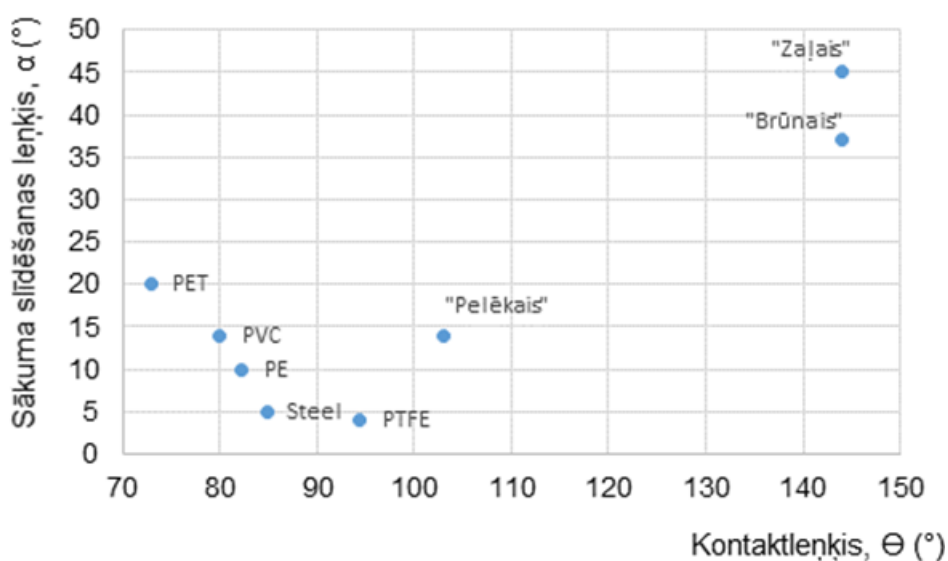
3.5. att. Tērauds ar "brūno" un "zaļo" hidrofbu pārklājumu

Hidrofbie pulveri, kas izmantoti pārklājuma iegūšanai, tika apskatīti ar optisko mikroskopu un tika novērota atšķirīga daļiņu forma un izmērs (skat. 3.6. att.). Tika novērots, ka "brūnā" pulvera daļiņas ir ļoti smalkas ar izstieptu dendrīta tipa struktūru. Garumā daļiņa ir aptuveni 40 μm liela, kur sāna atzarojumi ir 3-6 μm lieli. Daļiņām raksturīgs metālisks spīdums, kā arī novērojama tendence izkārtoties 2D plaknē. Savukārt "zaļā" pulvera daļiņas pēc izskata atgādina paralēlskaldņus, kas izvietoti 3D plaknē. Daļiņu izmērs svārstās ar vidējo vērtību ap 100 x 100 μm .



3.6. att. "Brūnā" un "zaļā" hidrofofā pulvera mikrofotogrāfijas.

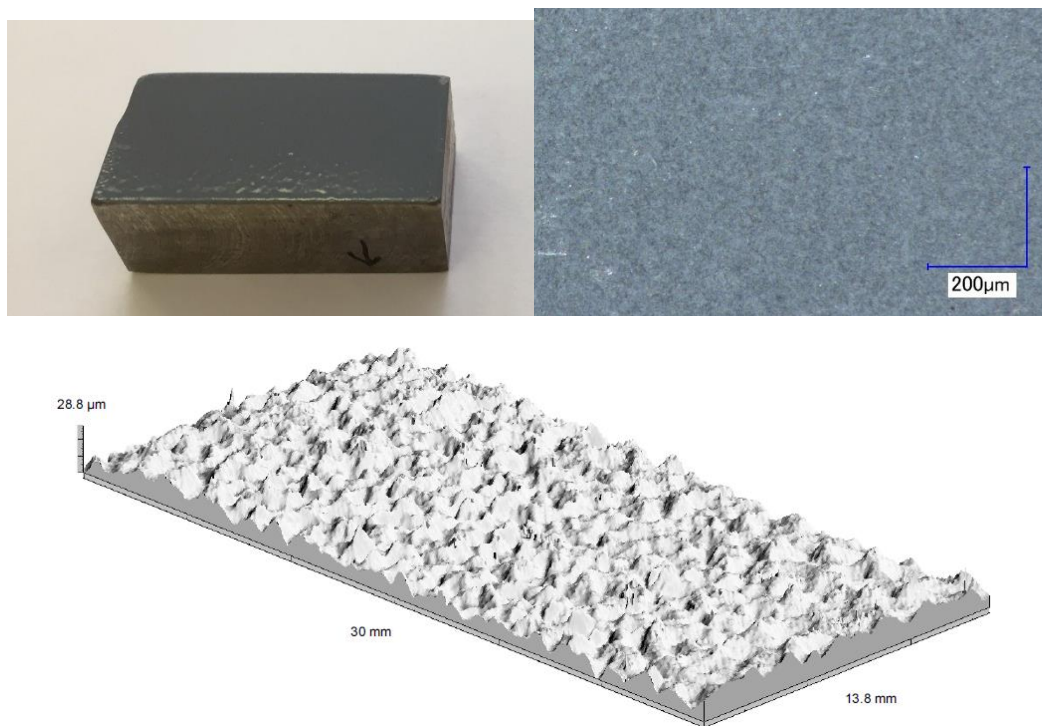
Veicot slīdamības eksperimentus, tika novērots, ka paraugi ar "brūno" un "zaļo" hidrofofo pārklājumu neslīd pa ledu. Sākuma slīdēšanas leņķis α "brūnajam" pārklājumam bija 35 – 40 °, bet "zaļajam" pārklājumam: 40 – 50 ° (skat 3.7. att.). Eksperimentu rezultāti rāda, ka veiktā metāla virsmas modifikācija nevis uzlaboja, bet pasliktināja metāla slīdamību. Iemesls tam bija paraugu lielais virsmas raupjums (40 – 100 μm), kas faktiski darbojās kā "smilšpapīrs" un ieķērās ledus struktūrā (salīdzināšanai - pulēta tērauda virsmas raupjums ir ap 20 nm).



3.7. att. Izslīdēšanas leņķis hidrofofiskiem paraugiem ar polimeriem kuriem ir līdzīgs raupjums, un ar zaļo un brūno virsmu kur slapjamības leņķis ir daudz augstāks, un virsma raupjāka.

Veiktā paraugu virsmas modifikācija rāda, ka hidrofobitāte vien nenosaka parauga kustības ātrumu pa ledu. Lai iegūtu materiālu ar labu slīdamību, nepietiek ar to, ka tas ir hidrofobs, būtiska nozīme ir arī virsmas topogrāfijai.

Lai izgatavotu hidroforu pārklājumu ar gludāku virsmu, tika izmantoti uzņēmuma "Fluorocarbon Surface Technologies" pakalpojumi. Trīs tērauda paraugi tika pārklāti ar komerciālu hidroforu slāni. Ņemot vērā pārklājuma krāsu, paraugi tika apzīmēti "pelēkais" (skat. 3.8. att.). Lai nodrošinātu pārklājuma adhēziju, tērauda virsma pirms pārklāšanas tika apstrādāta ar smilšu strūklu. Profilometrijas rezultāti rāda, ka parauga vidējais virsmas raupjums S_a ir $2,96\ \mu\text{m}$.

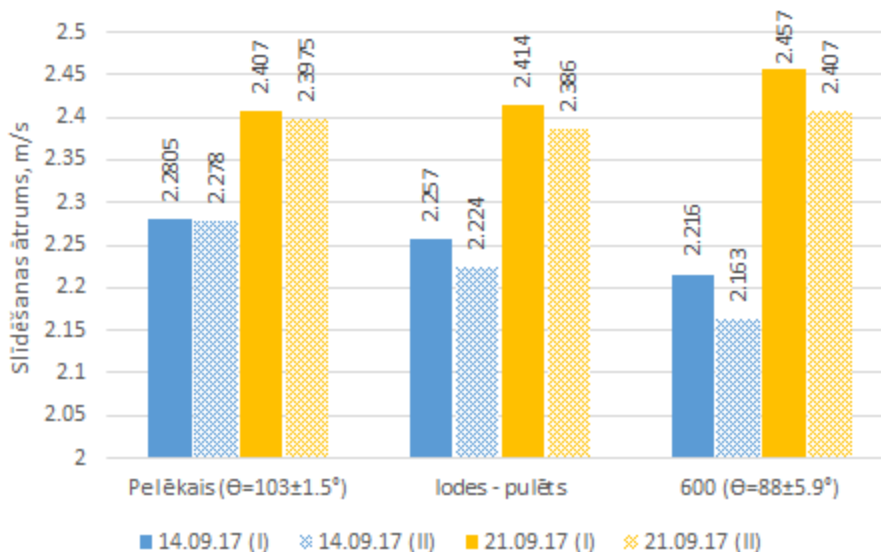


3.8. att. "Pelēkais" hidroforais pārklājums: (a) pilna parauga attēls; (b) virsmas optiskā mikrofotogrāfija; (c) virsmas ar atdalītu formas novirzi 3D foto simulācija.

Lai arī hidroforā pārklājuma pilnais ķīmiskais sastāvs nav zināms, veicot rentgenfluorescences analīzi, tika noskaidrots, ka galvenie elementi pārklājuma sastāvā ir Si (36%), O (36%) un Ti (8%). Kontaktleņķa mērījumi parādīja, ka pārklājumam raksturīga augsta hidrofobitāte: $\theta = 103 \pm 1,5^\circ$.

Slīdēšanas ātruma rezultāti ir attēloti 3.9. att., un "Pelēkais" hidroforais pārklājums ir salīdzināts ar paraugu, kas skrāpēts ar 600. raupjuma smilšpapīru ("600"). Eksperimenti atkārtoti divas dienas, katrā dienā veikti 2 mēģinājumi, nodrošinot jauktu paraugu secību. Temperatūra bija ap -6°C pirmajā dienā, bet -4°C otrajā dienā. Abās dienās gaisa mitrums ap 68 %. Slīdamības rezultāti rāda ka pirmajā dienā hidroforie pārklājumi rāda 4.6% labāku slīdamību salīdzinājumā

ar 600 papīra apskrāpētām virsmām, toties otrajā dienā nav redzamas nozīmīgas maiņas, tikai 0.8%.



3.9. att. Slīdēšanas ātruma salīdzinājums dažādiem paraugiem. Labāk izņemt datus par lodes apstrādi, jo nav pamats to uzrādīt. Ja kautkas būtu vērtīgs, tad paraugs ar līdzvērtīgu raupjumu, kā piemēram 600 apstrādātais paraugs. Lūdzu uzrādīt kļūdas.

Kopsavilkums

- Virsmas raupjums būtiski iespaido slīdēšanas ātrumu. Noskaidrots, ka vislabākos rezultātus uzrāda nevis pulētas virsmas, kā sākotnēji gaidīts, bet gan nedaudz skrāpētas (1500 grauda smilšpapīrs). Noskaidrots raupjuma diapazons kurā slīdēšanas izmaiņas ir minimālas, kā arī atrasts raupjuma sliekšnis, pēc kura notiek strauja slīdēšanas ātruma mazināšanās;
- Cietības maiņas virsmā neviennozīmīgi ietekmē slīdamību;
- Hidrofobitāte iespaido kustību, gan izslīdēšanas leņķi, gan slīdēšanas ātrumu. Salīdzinājums ar nerūsējošo tēraudu, izmaiņas ir mazas;
- Raupjums visvairāk ietekmē izslīdēšanas leņķi un slīdēšanas ātrumu, bet hidrofobitāte dod mazāku efektu.

Literatūra

Virsmas tekstūras ietekme uz slīdamību

1. Rudzītis J. Контактная механика поверхностей, 2- ая часть, Rīga: RTU, 2007 – 213lpp.
2. Kumermanis M. Cietu ķermeņu neregulāra rakstura virsmu 3D raupjuma parametru pētījumi. Rīga: RTU, 2012. – 116lpp.
3. Hainzmaier C. A new tribologically optimized bobsleigh runner. Minhene: Minhenes Tehniskā Universitāte, 2005. – 199lpp.

Virsmas cietības ietekme uz slīdamību

1. Ozoliņš J., Straume I. Muižnieks G., *Materiālzinības: laboratorijas darbu praktikums.* – Rīga: RTU, 2009. – 37 lpp.
2. Vērdiņš G., Dukulis I. *Materiālu mācība: mācību līdzeklis.* – Jelgava: LLU, 2008. – 240 lpp.
3. Uddeholm Ramax HH tehniskā specifikācija / Internets. – http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_ramax_hh_english.pdf