

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Transporta institūts

Pāvels Stankēvičs

Doktora studiju programmas “Transports” doktorants

**RITOŠĀ SASTĀVA METĀLPULVERU
ANTIFRIKCIJAS DETALU RAŽOŠANAS
TEHNOLOĢIJA UN TRIBOTEHNISKO ĪPAŠĪBU
PAAUGSTINĀŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. habil. sc. ing.*
VIKTORS MIRONOVS

asoc. profesors *Dr. sc. ing.*

DIJS SERGEJEVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2020

Stankēvičs, P. Ritošā sastāva metālpulveru antifrikcijas detaļu ražošanas tehnoloģija un tribotehnisko īpašību paaugstināšana. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 60 lpp.

Iespiests saskaņā ar Būvniecības un transporta inženierzinātnes nozares promocijas padomes “RTU P-22” 2020. gada 22. janvāra lēmumu, protokols Nr. 01-1/2020.

<https://doi.org/10.7250/9789934225208>

ISBN 978-9934-22-521-5 (print)

ISBN 978-9934-22-520-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada __. _____ plkst. ____ Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, _____, _____. auditorijā.

OFICIĀLI RECENZENTI

Pētnieks *Ph. D.* Dmitrijs Goljandins,
Tallinas Tehnoloģijas universitāte, Igaunija

Direktora vietnieks zinātnes jautājumos *Ph. D.* Vadims Savičs,
Baltkrievijas Pulvermetalurģijas institūts, Baltkrievija

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Mārtiņš Kleinhofs,
Rīgas Tehniskā universitātē, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Pāvels Stankēvičs..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 69 attēli, 16 tabulu, astoņi pielikumi, kopā 151 lappuse. Literatūras sarakstā ir 101 informācijas avots.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	6
Tēmas aktualitāte.....	6
Pētāmā problēma	7
Darba mērķis un uzdevumi.....	7
Pētījuma metodes.....	8
Pētījuma iekārtas	8
Darba zinātniskā novitāte	8
Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti.....	9
Darba praktiskais lietojums	9
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS.....	10
AUTORA IEGULDĪJUMS PUBLIKĀCIJĀS	12
DARBA APROBĀCIJA	14
SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	15
1. METĀLPULVERU MATERIĀLU RAŽOŠANAS TEHNOLOĢIJA UN TĀS IZMANTOŠANA DZELZCEĻA TRANSPORTĀ	16
1.1. Metālpulveru materiālu īpašības.....	16
1.2. Pulveru veidi un to īpašības.....	17
1.3. Legējošo elementu ietekme uz detaļu īpašībām	17
1.4. Metālpulveru detaļu izmantošanas novērtējums ritošā sastāva mezglos.....	19
1.5. Metālpulveru detaļu izgatavošanas procesi	23
1.5.1. Metālpulveru detaļu presēšanas procesu analīze.....	23
1.5.2. Metālpulveru sagataves saķepināšana	26
2. EKSPERIMENTĀLO METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS PROCESU PĒTĪJUMI	29
2.1. Eksperimentālo detaļu no mazlegētiem komponentiem tribotehniskie raksturojumi.....	29
2.1.1. Eksperimentālo detaļu mehāniskās īpašības.....	29
2.1.2. Eksperimentālo detaļu triboloģiskie un virsmas kvalitātes mērījumi.....	32
2.2. Presēšanas pētījumi ar impulsveida magnētisko lauku	35

3. METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS BRĀĶIS UN KVALITĀTES KONTROLES PAŅĒMIENI	38
3.1. Saķepināšanas brāķis un pasākumi tā samazināšanai	38
3.2. MP detaļu kvalitātes kontrole ar ultraskaņu	38
3.3. MP detaļu savienojumu kontrole ar ultraskaņas un radiogrāfijas metodēm.....	40
4. SEKUNDĀRO OPERĀCIJU PĒTĪJUMI.....	45
4.1. Poraino metālpulvera detaļu mehāniskās apstrādes optimālo parametru noteikšana.....	45
4.2. Metālpulvera detaļu antifrikcijas īpašību paaugstināšana	50
4.2.1. Poraino pulvera detaļu piesūcināšana.....	50
4.2.2. Dispersā vide un dispersie komponenti	50
4.2.3. Berzes koeficienta samazināšanas pētījumi.....	51
SECINĀJUMI	54
KOPSAVILKUMA LITERATŪRAS SARAKSTS	56

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Paaugstinoties dzelzceļa ritošā sastāva kustības ātrumam, kā arī palielinoties vagonu kravnesībai, palielinās bremžu darba intensitāte, līdz ar to pieaug nodilums bremžu sviru pārvada berzes mezglos. Kā sekas nodilumam bremžu sviru pārvada šarnīros var būt spraugas, kas būtiski pārsniedz pieļaujamās normas, un tā rezultātā savukārt samazinās bremžu kluča piespiešanas spēks un samazinās vilciena bremzēšanas spēks.

Lai uzlabotu vagonu bremžu sviru pārvada darbu un samazinātu izdevumus tā kārtējai uzturēšanai un remontam, pārvada šarnīra mezglos uzstāda antifrikcijas bukses.

Detaļu nodiluma intensitāte sviru pārvada šarnīra savienojumos pasliktina tā darba apstākļus un izraisa biežas regulēšanas un remonta nepieciešamību, kas savukārt var izraisīt gan priekšlaicīgu konstrukcijas elementu nolietošanos, gan visas konstrukcijas iekļīlēšanos. Agrāk veikto pētījumu rezultātā tika konstatēts, ka bremžu sviru pārvada šarnīra mezglu detaļu nodiluma iemesls ir vertikālie dinamiskie triecienspēki [46].

Kopš 2012. gada pulvermetallurģijas (PM) nozare sasniegusi nozīmīgus panākumus melno metālu, alumīnija, titāna, magnija un metālu matricu kompozītu sakausējumu apstrādē. Komponentu blīvums turpina pieaugt, uzlabojoties pulveriem, eļļošanas materiāliem, aprīkojumam, siltajam blīvējumam, lieltonnāžas presēm un saķepināšanas tehnoloģijai [25]. PM strauji attīstījusies pēdējo gadu laikā, pateicoties izgatavojamo detaļu drošības, izturības un cietības paaugstināšanai, kā arī lielgabarīta izstrādājumu ražošanas iespējām un aditīvo tehnoloģiju plašai ieviešanai PM. Unikālo īpašību dēļ PM tehnoloģiju bieži izmanto antifrikcijas izstrādājumu izgatavošanā, tādu kā slīdgultņi, slīdņi, bukses un citi. Tiek izmantotas nanotehnoloģijas un meklēti jauni risinājumi metālpulveru detaļu antifrikcijas īpašību uzlabošanai [11], līdz ar to ir aktuāli pētījumi par metālpulveru antifrikcijas detaļu tribotehnisko īpašību paaugstināšanu.

Antifrikcijas detaļu tālāko ekspluatācijas gaitu lielā mērā noteiks to izturība un tribotehniskie raksturojumi. Metālpulveru antifrikcijas detaļām, to izmantošanai ritošā sastāva bremžu sviru pārvada mezglos jāatbilst paaugstinātām prasībām, tādām kā: dilumizturība, ilgmūžība un drošība, nodrošinot detaļu antifrikcijas īpašības plašā temperatūras diapazonā. Berzes samazināšana antifrikcijas mezglos ir aktuāls uzdevums [25].

PM process ir atzīta metode, ko mūsdienās izmanto dažādu detaļu liela mēroga ražošanai ar ekonomiski izdevīgo paņēmienu. Pastāvīgās prasības izgatavojamo konstrukciju detaļu mehānisko un triboloģisko īpašību uzlabošanai tiek pretnostatītas dažādiem PM ražošanas virzieniem, piemēram, rūpīgas pieejas veidā leģējošo elementu saturam.

Tradicionāli tērauds PM tiek leģēts Ni, Mo un Cu, taču augstās cenas, īpaši pirmajiem diviem, kombinācijā ar bīstamību veselībai, kas saistīta ar Ni [1], izraisa to, ka PM industrija pēta šo leģējošo elementu [5] daļas samazināšanas iespējas, kā arī iespējas izmantot citus leģējošos elementus. Tātad ir nepieciešami jauni risinājumi, kas ļautu veidot drošus, ekonomiski izdevīgus metālpulveru materiālus ar atbilstošām tribotehniskajām īpašībām.

Pētāmā problēma

Promocijas darbā ir izpētītas metālpulveru antifrikcijas detaļas ar zemu leģējošo elementu saturu nolūkā izvērtēt to piemērotību izmantošanai vagonu bremžu sviru pārvadā. Leģējošo elementu saturs lielā mērā nosaka metālpulvera cenu, līdz ar to tiks panākta šo detaļu konkurētspēja. No otras puses, samazinot leģējošo elementu saturu pulveru maisījumā, var samazināties arī detaļu stiprības un izturības parametri, tātad ir nepieciešami pētījumi par šo detaļu piemērotību izmantošanai ritošā sastāva bremžu sviru pārvadā.

Izmantojot pulvera detaļas svarīgākajos mezglos, nepieciešams pārliecināties par detaļu kvalitāti. Nesagraujošās kontroles pārbaudes veidi pārsvarā orientēti un aprobežoti uz detaļām, kas ražotas, izmantojot citas metodes (liešana, kalšana) [31], līdz ar to darbā veikti pētījumi, lai pārbaudītu šo metožu piemērotību porainām metālpulveru detaļām. Neskatoties uz to, ka PM pozicionē sevi kā ražotne, kurai nav nepieciešamas papildu operācijas pēc detaļu izgatavošanas, tomēr atsevišķos gadījumos [4] ir nepieciešamas sekundāras operācijas, piemēram, mehāniska apstrāde. Izmantojot mehānisko apstrādi metālpulveru detaļām, svarīgi paredzēt detaļas virsmas raupjuma izmaiņas.

Aktuāla ir problēma par antifrikcijas īpašību paaugstināšanu, jo, samazinot berzes koeficientu, antifrikcijas detaļām tiks panākti labvēlīgāki darba apstākļi, kas savukārt nodrošinās detaļu ar zemu leģējošo elementu saturu drošāku ekspluatāciju antifrikcijas mezglos.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis: metālpulveru antifrikcijas materiālu ražošanas tehnoloģijas izpēte un mazleģēto antifrikcijas detaļu tribotehnisko īpašību paaugstināšana izmantošanai ritošā sastāva mezglos.

Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- 1) izpētīt metālpulveru detaļu ražošanas tehnoloģisko procesu;
- 2) izanalizēt metālpulveru materiālu īpašības un to priekšrocības izmantošanai dzelzceļa transportā;
- 3) izvērtēt metālpulveru antifrikcijas detaļu piemērotību uz Fe-C-Cu bāzes ar zemu leģējošo elementu saturu izmantošanai ritošā sastāva bremžu sviru pārvada mezglos;
- 4) veikt metālpulveru materiāla presēšanas pētījumus ar impulsveida magnētisko lauku;
- 5) izvērtēt nesagraujošās kontroles piemērotību antifrikcijas detaļu kvalitātes kontrolei;
- 6) noteikt poraino metālpulveru slīdbukses mehāniskās apstrādes optimālus parametrus;
- 7) izstrādāt metodi antifrikcijas metālpulveru detaļu berzes koeficienta samazināšanai, izmantojot WS_2 WSe_2 nanodaļiņas.

Pētījuma metodes

- Literatūras, zinātnisko rakstu un citas informācijas analīze dažādās starptautiskajās izdevumos un zinātniskajos žurnālos.
- Sistēmiskās analīzes metodes, lai pētītu cēloņsakarības starp dažādām pulvera kompozīciju sastāvdaļām un atklātu ietekmējošos faktorus uz materiāla tribotehniskajām īpašībām.
- Empīriski eksperimentālie pētījumi ar metālpulveru materiāliem un antifrikcijas detaļām.
- Salīdzinošā metode pētāmo detaļu īpašību analīzei dažādos pētījuma posmos un apstākļos.
- Matemātiskās skaitliskās analīzes metodes. Galīgo elementu metode, veicot mazlēģētu metālpulvera bukšu mehāniskās apstrādes pētījumus.
- Datu apstrādes statistiskās metodes iegūto rezultātu analīzei. Teorētisko un eksperimentālo pētījumu analīze secinājumu un rekomendāciju sastādīšanai.

Pētījuma iekārtas

Metālpulveru antifrikcijas materiālu īpašību novērtēšanai tika izmantotas vairākas iekārtas.

- Tribotehniskajiem pētījumiem – *Taylor Hobson Ltd.* trīsdimensiju mērīšanas sistēma un *CSM Instrument* iekārta *Ball-on-disk tribometer*.
- Metalogrāfijai – *PRESI* iekārtas: *Mecatome 255/300*; *Mecapress II*; *Mecatech 334*. un mikroskops *Keyence VHX-2000*.
- Kombinētās (magnēta-impulsa) tehnoloģijas pētījumiem – RTU MTAF Pulvermateriālu zinātniskās laboratorijas eksperimentālā magnēta-impulsa presēšanas iekārta un *Impulse magnetizer U-series*.
- Nesagraujošās kontroles pētījumiem – *USM 25 of Krautkramer GE Inspection Technologies GmbH* un *X-ray SMART EVO 200D of YXLON* iekārtas.
- Mehāniskās apstrādes pētījumiem – *Okuma L200 E-M*.
- Eksperimentāla laboratorijas iekārta materiālu testēšanai uz berzi un nodilumu.
- Eksperimentālajos pētījumos iegūtie rezultāti tika grafiski attēloti, izmantojot *Microsoft Excel*, *Microsoft Word* un *SolidWorks* programmatūru.
- Pētījumā iegūto rezultātu un faktoru statistiskais nozīmīgums tika novērtēts, izmantojot *Excel Data Analysis* un *Minitab* lietojumprogrammas.

Darba zinātniskā novitāte

1. Paradīts, ka, izgatavojot antifrikcijas metālpulveru detaļas, Ni un Mo leģējošo elementu satura pazemināšanu var kompensēt, uzlabojot triboloģiskās īpašības, piesātinot tās ar WS₂ un WSe₂ nanodaļiņām.
2. Noskaidrotas porainu pulvera detaļu griešanas režīmu ietekmes likumsakarības uz apstrādātās virsmas raupjuma īpašībām.

3. Pirmo reizi eksperimentāli apstiprināts berzes koeficienta samazināšanas paņēmieni mazlēģētām metālpulveru slīdbuksēm, kas tiek izmantotas vagona bremžu sviru pārvadā, piesātinot tās ar WS_2 un WSe_2 nanodaļiņām (LV Patents Nr. 15433).

Aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti

1. Porainais antifrikcijas metālpulvera materiāls ar zemu leģējošo elementu saturu vagona bremžu sviru pārvadā antifrikcijas slīdbukšu ražošanai.
2. Poraina antifrikcijas metālpulvera materiāla mehāniskās apstrādes metodoloģija.
3. Metālpulvera antifrikcijas materiāla tribotehnisko īpašību paaugstināšanas paņēmieni, izmantojot WS_2 WSe_2 nanodaļiņas.

Darba praktiskais lietojums

Tika izgatavotas un izpētītas antifrikcijas metālpulvera bukšu ar samazināto leģējošo elementu saturu izmēģinājuma paraugi. Pulvera maisījumi ar samazināto leģējošo elementu saturu ļauj samazināt izdevumus antifrikcijas bukšu ražošanai. Parādīts, ka izmēģinājuma paraugu tribotehniskās īpašības atbilst prasībām, lai izmantotu vagona bremžu sviru sistēmas šarnīra mezglos.

Pēc poraino metālpulvera detaļu izpētes rezultātiem ar nesagraujošās kontroles palīdzību eksperimentāli apstiprināts, ka ultraskaņas un rentgenogrāfiskās mikroskopijas metodes ļauj kvalitatīvi noteikt defektus saķepinātās pulvera detaļās, kā arī metālpulvera ieliktnu savienojuma nepārtrauktību pēc saspiešanas ar impulsveida magnētisko lauku.

Iegūtas praktiskas zināšanas, noteikti raksturojumi un perspektīvas pulvera detaļu presēšanai ar impulsveida magnētisko lauku.

Izstrādātā poraino pulvera detaļu mehāniskās apstrādes metodoloģija. Eksperimentālie pētījumi ļāvuši noteikt optimālus apstrādes griešanas režīmus un konstatēt, ka apstrādātās virsmas raupjums lielākā mērā atkarīgs no griešanas ātruma nekā no padeves ātruma.

Tribotehnisko īpašību uzlabošanai un antifrikcijas pulvera detaļu berzes koeficienta samazināšanai veikti pētījumi, kā arī piedāvāta metode vagona sviru bremzēšanas sistēmā lietoto metālpulvera bukšu piesātināšanai ar eļļu, kas satur volframa disulfīda un volframa diselenīda nanodaļiņas (WS_2 un WSe_2).

Uzprojektēta un izgatavota eksperimentāla iekārta materiālu testēšanai uz berzi un nodilumu plašā temperatūras diapazonā, ka arī piedāvāts paņēmieni un iekārta poraino izstrādājumu piesūcināšanai ar nanodaļiņām, par ko saņemti LV patenti.

Darba rezultāti atklāj jaunas iespējas daudzpusīgai metālpulveru tehnoloģijas izmantošanai, antifrikcijas materiālu īpašību uzlabošanai un kvalitātes kontrolei.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Promocijas darbs balstās uz zemāk norādītajiem zinātniskajiem rakstiem, kā arī pētījumiem, kas veikti, lai sagatavotu šos rakstus, kas publicēti zinātniskajā periodikā, ir starptautiski pieejami zinātniskās informācijas krātuvēs, kas citēti starptautiski pieejamās datubāzēs.

1. Mironovs, V., **Stankevich, P.**, Eiduks, J. *Tendencies in the field of application of metal-powder materials for repair and maintenance of railway equipment*. ICTE in Transportation and Logistics 2019. Procedia Computer Science, 2019, vol. 149, pp. 344–348. ISSN 1877-0509. Available from: doi:10.1016/j.procs.2019.01.146.
2. Mironov, V., **Stankevich, P.**, Tatarinov, A., Zemchenkov, V., Boiko, I. *Mechanical and Acoustical Properties of Bushings Made of Low-Alloyed Materials and Used in Brake Systems of Transport Vehicles*. Materials Science and Engineering, 2015, vol. 96, Iss. 1, pp. 1–9. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Available from: doi:10.1088/1757-899X/96/1/012016.
3. Tatarinov A., Mironov, V., Rybak, D., **Stankevich, P.** *Non-Destructive Testing of Joints of Antifriction Parts Crimped by Pulsed Magnetic Deformation*. Solid State Phenomena, 2017, vol. 267, pp. 248–252. ISSN 1662-9779. Available from: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.267.248.
4. Mironov, V., **Stankevich, P.**, Beljaeva, I., Glushenkov, V. *Static-Dynamic Powder Material Compaction Methods*. In: 15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. vol. 15, Latvia, Jelgava, 25–27 May, 2016. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2016, pp. 1128–1132. ISSN 1691-5976.
5. Mironovs, V., **Stankevics, P.**, Kromanis, A., Lungevics, J. *Influence of Machining Parameters on 3D Surface Roughness of Powder Bushings*. Key Engineering Materials, 2017, vol. 721, pp. 378–382. ISSN 1013-9826. e-ISSN 1662-9795. Available from: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.721.378.
6. **Stankevich P.**, Mironovs, V., Vasilyeva, E., Breki, A., Tolochko, O. *The Possibility of Modifying the Elements of the Bearing Assembly with Nanoparticles in Order to Reduce the Friction Coefficient*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 251, pp. 1–5. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Available from: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012084.

Izgudrojumi

LV Patenti

1. Rīgas Tehniskā Universitāte. *Iekārta materiālu triboloģisko īpašību novērtēšanai*. Viktors Mironovs, **Pāvels Stankēvičs**, Jānis Rudzītis, Int. Cl.:G01N3/56. Iesniegšanas datums 29.12.2016. Patenti un Preču Zīmes. LV15225. 20.12.2017.
2. Rīgas Tehniskā Universitāte. *Paņēmiens un iekārta poraino izstrādājumu piesūcināšanai ar nanodaļiņām*. Viktors Mironovs, Aleksandrs Polakovs, **Pāvels Stankēvičs**, Aleksandrs Korjamins. Iesniegšanas datums 28.12.2018. Patenti un Preču Zīmes. LV15433. 20.02.2020.

AUTORA IEGULDĪJUMS PUBLIKĀCIJĀS

Visus pievienotos zinātniskos rakstus autors uzrakstījis sadarbībā ar promocijas darba vadītāju profesoru V. Mironovu un citiem līdzautoriem, kuri uzrādīti rakstos. Katrā rakstā izpildītais darbs ir autoru kopīgi izplānots.

Pievienotajos rakstos parādītajā pētniecības darbā autora ieguldījums sastāv no:

- visu izmēģinājumiem un mērījumiem izmantoto paraugu visi grafiskie atainojumi, analīze un sagatavošana;
- pētāmo materiālu raksturojums, visi metalogrāfijas pētījumi ar atbilstošu iepriekšējo sagatavošanos;
- pētāmo materiālu visu analīžu veikšana ar tai sekojošu datu izvērtējumu.

Turpinājumā seko autora ieguldījuma kopsavilkums katrā rakstā:

1. raksts

Rakstā minētas galvenās tendences mūsdienu metālkeramisko materiālu izmantošanas jomā. Autors uzrakstījis un sagatavojis galveno raksta daļu un veicis metālpulvera materiālu izmantojuma analīzi ritošā sastāva mezglos. Parādītas pulvera detaļu priekšrocības, dotas rekomendācijas antifrikcijas detaļu berzes koeficienta samazināšanai.

2. raksts

Autors izpētījis galvenos raksturlielumus un prasības antifrikcijas bukses ražošanai ar pulvermetallurģijas PM metodi. Noteikta leģējošo elementu ietekme uz detaļas tribotekniskajiem rādītājiem, autors piedalījies pulvera detaļas pārbaudes modeļa realizācijā ar negsagraujošās kontroles *TOF* metodi un eksperimentālās detaļas virsmas kvalitātes pētījumos. Autors pamatojis mazleģētu pulvera kompozīciju izmantojuma priekšrocības bremžu sviru pārvados.

3. raksts

Konkrētajā rakstā kopā ar līdzautoriem tika veikti mērījumi un pārbaude ar negsagraujošās kontroles *UT*, *RT* metožu palīdzību. Autors izpildīja skaitliski - analītisko darbu, noteica bukšu savienojuma kvalitāti pēc saspiešanas ar impulsa magnētisko lauku un veica kontroles metožu salīdzinājumu, sagatavoja un noformēja rakstu.

4. raksts

Autors sagatavoja eksperimentālo aprīkojumu uz RTU MTAF Pulvermateriālu zinātniskās laboratorijas bāzes, lai veiktu eksperimentu pulvera materiālu presēšanā ar impulsa magnētisko lauku. Tika noteikti galvenie presēšanas režīmi, veikti nepieciešamie mērījumi, autors piedalījās eksperimenta veikšanā, sagatavoja un noformēja rakstu.

5. raksts

Kopā ar līdzautoriem tika veikti pētījumi par pulvera detaļu mehānisko apstrādi. Autors noteica mehāniskās apstrādes diapazonus un izpildīja daļu eksperimentu. Veikti nepieciešamie teorētiskie un praktiskie pētījumi, kā arī daļa mērījumu, lai noteiktu pulvera detaļas apstrādātās virsmas raupjumu. Autors analizējis skaidas morfoloģiju, pamatojis griešanas režīmus. Autors sagatavoja un noformēja rakstu.

6. raksts

Autors izstrādājis teorētisko modeli un veicis pētījumus par antifrikcijas bukses izmēģinājumu paraugu piesātinājumu ar nanodaļiņas WS_2 un WSe_2 saturošām eļļas emulsijām. Veikti triboloģiskie mērījumi, kopā ar līdzautoriem uzrakstīti secinājumi un rekomendācijas. Autors uzrakstījis galveno raksta daļu.

DARBA APROBĀCIJA

Visi šī pētījuma rezultāti ir prezentēti un publicēti doktorantu semināros un starptautiskās zinātniskajās konferencēs.

- I. 1. rakstā *“Tendencies in the field of application of metal-powder materials for repair and maintenance of railway equipment”* pētījuma rezultāti tika publicēti 2018. gadā, zinātniskajā žurnālā *“ICTE in Transportation and Logistics 2018”* (ICTE 2018).
- II. 2. rakstā *“Mechanical and Acoustical Properties of Bushings Made of Low-Alloyed Materials and Used in Brake Systems of Transport Vehicles.”* pētījuma rezultāti tika prezentēti zinātniskajā konferencē *“2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies”*. 2015. gadā, 30.09.–2.10. Rīgā, un publicēti *IOP Conf. Series: “Materials Science and Engineering”* (vol. 96).
- III. 3. rakstā *“Non-Destructive Testing of Joints of Antifriction Parts Crimped by Pulsed Magnetic Deformation”* pētījuma rezultāti tika prezentēti zinātniskajā konferencē *“26th International Baltic Conference Materials Engineering”* 26.–27.10.2017. Kauņa, Lietuva, un publicēti zinātniskajā žurnālā *“Solid State Phenomena”* (vol. 267).
- IV. 4. rakstā *“Static-Dynamic Powder Material Compaction Methods”* pētījuma rezultāti tika prezentēti starptautiskā zinātniskajā konferencē *“15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development”* 25.–27.05., Jelgava, 2016., un publicēti zinātniskajā žurnālā *“Agronomy Research”* (vol. 14).
- V. 5. rakstā *“Influence of Machining Parameters on 3D Surface Roughness of Powder Bushings”* pētījuma rezultāti tika publicēti zinātniskajā žurnālā *“Key Engineering Materials” December 2016* (vol. 721).
- VI. 6. rakstā *“The Possibility of Modifying the Elements of the Bearing Assembly with Nanoparticles in Order to Reduce the Friction Coefficient”* pētījuma rezultāti tika prezentēti zinātniskajā konferencē *“3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies”* 2017. gadā, 27.–29.09. Rīgā, un publicēti *IOP Conf. Series: “Materials Science and Engineering”* (vol. 251).

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

ANOVA – dispersijas analīze (*Analysis of Variance*)

BC – bremžu cilindrs

BSP – bremžu sviru pārvads

GEM – galīgo elementu metode

MIP – magnēta-impulsa presēšana

MT – magnētisko ferodaļiņu pārbaude (*magnetic ferro-particle test*)

PM – pulvermetallurģija

PT – penetrācijas pārbaude (*penetration test*)

SPM – saķepinātie pulvera materiāli

TEM – transmisijas elektronmikroskops

tf – spēka tonna (*tonne of force*)

TOF – “*time of flight*” metode

UT – ultraskaņas pārbaude (*ultrasound test*)

VT – vizuālā pārbaude (*visual test*)

1. METĀLPULVERU MATERIĀLU RAŽOŠANAS TEHNOLOĢIJA UN TĀS IZMANTOŠANA DZELZCEĻA TRANSPORTĀ

1.1. Metālpulveru materiālu īpašības

PM tehnoloģija iekļauj pulveru ražošanu, pulverdetāļu formēšanu, saķepināšanu un pēc nepieciešamības finiša operāciju – mehānisko apstrādi. Detaļu ražošanas pamatparametri: presēšanas spiediens un tā īstenošanas veidi, saķepināšanas temperatūras režīms, vide un procesa ātrums. Metālpulveru izstrādājumu ražošanas tehnoloģija pastāvīgi uzlabojas, pilnveidojas un attīstās.

Izšķir porainos materiālus, kuros pēc galīgās apstrādes saglabājas 10–30 % atliku porainības un kompakto pulvermateriālus, kuru porainība ir ne vairāk par 3–5 % [14], [23].

Antifrikcijas materiāli – tie ir materiāli ar zemu berzes koeficientu vai materiāli, kas spēj samazināt citu materiālu berzes koeficientu. Cietajiem antifrikcijas materiāliem piemīt paaugstināta noturība pret nodilumu ilgstošas berzes gadījumā [19].

Tiek izgatavotas dažādu veidu metālpulveru slīdgultņu un slīdbukšu detaļas (1.1. att.), ko nosacīti var iedalīt divās grupās:

- eļļas impregnētais gultnis, kas satur smērvielu, pateicoties metālpulveru detaļu porainības īpašībām;
- sausais gultnis, kas sastāv no cietas smērvielas (grafīts), kas samazina berzi bez eļļas piegādes.



1.1. att. Pulvermateriālu slīdbukses [54].

No pulversakausējumiem izgatavotie gultņi pēc piesūcināšanas ar eļļu var darboties bez piespiedu eļļošanas, pateicoties eļļas “izsvīšanai” no porām [8], [50].

Frikciju materiāli – tie ir materiāli, kam kontaktā ar metālisku virsmu ir augsts berzes koeficients. Tiek lietoti bremzēs un vārpstu berzes sajūgos.

1.2. Pulveru veidi un to īpašības

Detaļu izgatavošanā izmantojamajiem pulveriem jāatbilst specifiskām īpašībām un prasībām, kas ietekmē to tehnoloģisko piemērotību. Šīs īpašības un prasības ir:

- augsts uzbēruma blīvums (ķermeņa paaugstinātas masas un blīvuma nodrošināšanai);
- laba plūstamība (presēšanas formas ātras aizpildīšanas nodrošināšanai);
- augsts plastiskums (maksimāla blīvuma nodrošināšanai) [15].

Rūpniecība saražo dažādus metāla pulverus: dzelzs, vara, niķeļa, hroma, kobalta, volframa, molibdēna, titāna u. c. Pulveru iegūšanas paņēmienus nosacīti iedala mehāniskajos un fizikāli ķīmiskajos [9].

1.3. Leģējošo elementu ietekme uz detaļu īpašībām

Tīra dzelzs pulvera kā izejmateriāla izmantošana pulvera detaļu izgatavošanā ir ierobežota, jo saķepinātās dzelzs stiprības īpašības ir zemas [9]. Kā leģējošos elementus izmanto niķeli, varu, hromu, molibdēnu u. c. Katra leģējoša elementa lomu nosaka tas kvantitatīvā attiecība pret dzelzi un citiem leģējošiem elementiem, kā arī attiecība pret oksīdiem, kas vairumā gadījumu attēlo robežas starp daļiņām.

Pēc attiecības pret tēraudā esošo oglekli leģējošie elementi iedalās:

- karbīdu veidojošajos;
- grafītu veidojošajos.

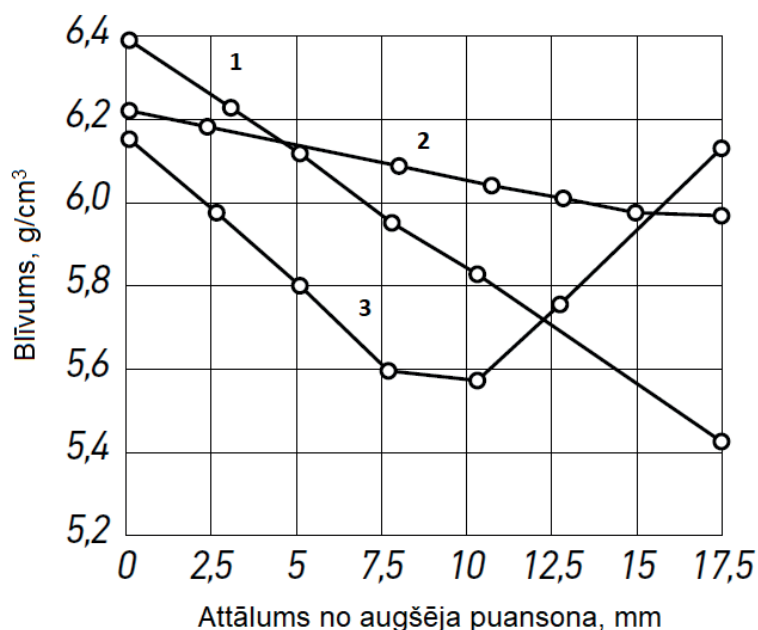
Svarīga nozīme ir leģējošo elementu ietekmei uz poru sadzīšanas kinētiku un citiem kristāla struktūras defektiem, kā arī uz pulvera tērauda saraūšanos.

Lai palielinātu saraūšanos un paaugstinātu pulvera izstrādājumu mehāniskās īpašības, lietderīgi ievadīt pulvera maisījumā elementus, kas saķepināšanas laikā ar dzelzi veido vieglkūstošas eitektikas, šķidrus šķīdumus utt., kas aktivizē saķepināšanas procesu. Vislabākie rezultāti tiek sasniegti, leģējot kompleksi ar oglekli, varu, niķeli, molibdēnu un citiem elementiem [36].

Konstatēts [48], ka niķelis, kā arī virkne citu elementu – jo īpaši varš (šķidrā stāvoklī) – veicina robežu “uzsūkšanos” starp daļiņām, metāla kontakta veidošanos starp daļiņām, savācošās starpdaļu pārkristalizācijas pārvirzīšanos, kas, no vienas puses, paaugstina saķepināto izstrādājumu mehāniskās īpašības, no otras – pazemina austenīta noturību pret tā graudu augšanu gan saķepināšanas procesā, gan arī izotermiskās izturēšanas laikā, sildot rūdīšanai. Tieši pretēji, tādi elementi kā hroms, silīcijs, mangāns, kam ir grūti reducēt oksīdus uz daļu virsmas, novērš daļu saplūšanu un, lai veiktu starpdaļu pārkristalizāciju, ir jāizmanto saķepināšanas līdzekļi, kas ir izžuvuši un labi attīrīti no skābekļa un mitruma. Sakarā ar to lietderīga ir pulvermateriālu leģēšana vienlaikus ar karbīdu veidojošiem un karbīdu neveidojošiem elementiem, ievadot tos pulvera maisījumā kā CuSi, CuMn, MnNi tipa ligatūru pulverus.

No vienas puses, grafīta ievadīšana ievērojami samazina materiāla mehānisko izturību, no otras – grafīta klātbūtne šīhtā ļauj sasniegt vienmērīgāku izstrādājumu blīvumu, pateicoties

labākai pulvera plūstamībai un sablīvējamībai (1.2. att.). Grafīts novērš sauso berzi, veicina vibrāciju absorbciju [43].



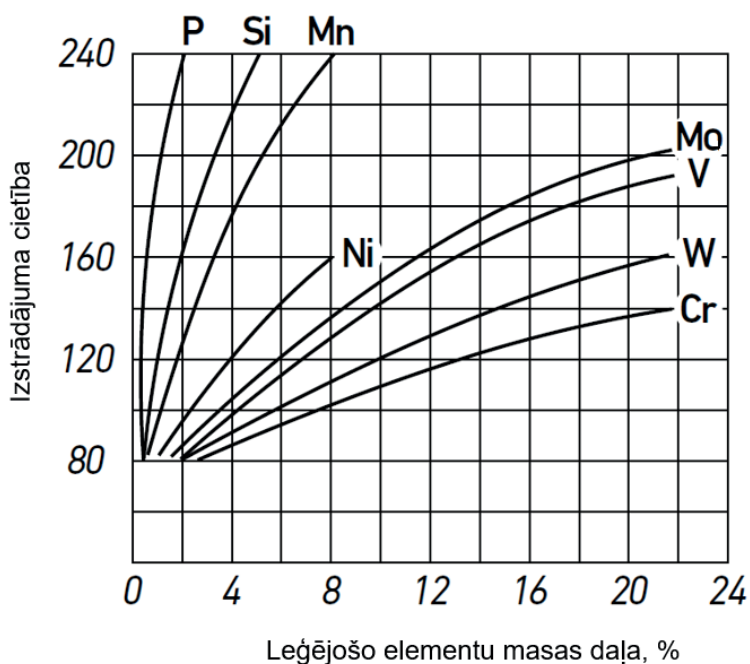
1.2. att. Blīvums presēšanas zonās, attālumā no augšējā puansona.

- 1 – varš pie vienaspusējas presēšanas;
 2 – varš ar 4 % grafīta pie vienaspusējas presēšanas;
 3 – varš pie divpusējas presēšanas bez grafīta piedevas.

Grafīta kristālisko režģi veido paralēli divdimensiju slāņi, kas izvietoti 0,34 nm attālumā cits no cita. Katrs no šiem slāņiem veidots no oglekļa atomiem, kas izvietoti pareizu sešstūru virsotnēs (sešstūra kristāla režģis) [37].

Metālpulvera materiāla mehāniskās īpašības lielā mērā ir atkarīgas no materiāla mikrostruktūras, kas savukārt ir atkarīga no pulveru maisījuma ķīmiskā sastāva, it īpaši no legējošo elementu satura [24], 1.3. attēlā parādīts, kādā mērā legējošo elementu saturs ietekmē dzelzs cietību.

Pulvera dzelzs legēšana tikai ar niķeli notiek reti, turklāt būtiska īpašību paaugstināšanās novērojama vienīgi augstā saķepināšanās temperatūrā, kas savukārt izraisa apjomīgāku energoresursu patēriņu saķepināšanas procesā. Niķeļa satura palielināšana tēraudā pazemina optimālo oglekļa saturu, pazemina tērauda cietību (1.3. att.). Lai iegūtu izstrādājumus ar augstām mehāniskajām īpašībām, paralēli niķelim pulvera tēraudu legē ar varu un citiem legējošiem elementiem.



1.3. att. Legējošo elementu ietekme uz dzelzs cietību (HB).

1.4. Metālpulveru detaļu izmantošanas novērtējums ritošā sastāva mezglos

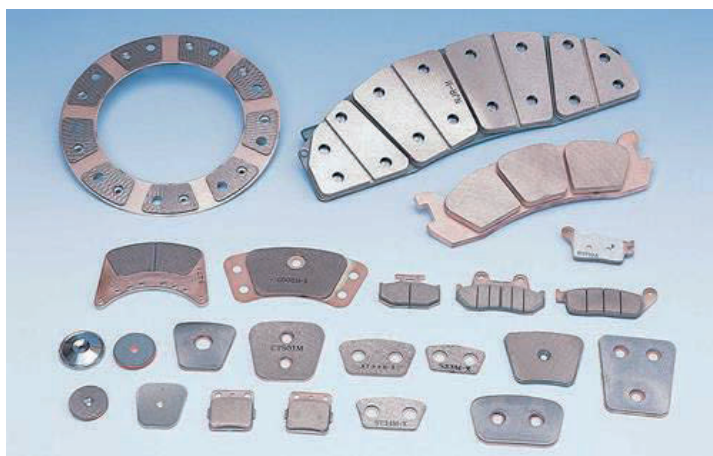
Metālpulvera detaļām, kas tiek izmantotas dzelzceļa transportā, parasti ir ievērojami lielāka masa un izmērs, salīdzinot ar detaļām, kas tiek izmantotas citās nozarēs. Tās var iedalīt dažādās grupās: konstrukciju, antifrikcijas, frikcijas un elektrotehniskas. Pie konstrukciju detaļām var attiecināt ūdens un eļļas sūkņu zobratus, slīdbukses (1.4. att.) [19].



1.4. att. Bremžu sviru pārvada slīdbukses [19].

No antifrikcijas detaļām dzelzceļa transportā visplašāk izmanto slīdbukses. Tām ir virkne priekšrocību: ekspluatācijas ekonomiskums, jo šāda tipa slīdbukšu izmantošana ļauj samazināt eļļas patēriņu; ražošanas izdevumu samazināšanās un materiāla ekonomija, jo ir iespēja dārgās bronzas un babīta vietā izmantot dzelzs-vara pulvera materiālu; augsta nodilumizturība, ko nodrošina pašēļļošanas efekts.

Plašāko grupu sastāda vagonu un lokomotīvu frikcijas detaļas (1.5. att.). Tās izgatavo disku, sektoru un kļuču veidā uz dzelzs un vara pamata, un tās paredzētas darbam bremžu mezglos, frikcijas sajūgos un citās iekārtās, kas strādā sausās un šķidrās berzes apstākļos.



1.5. att. Frikcijas detaļas uz vara un dzelzs bāzes [19].

Visizplatītākās PM detaļas, ko izmanto dzelzceļa ritošajā sastāvā, ir bremžu kluči un antifrikcijas slīdbukses. Metālpulveru bukses tiek lietotas vagonu bremžu sviru sistēmas šarnīra mezglos. Kravas vagonos uzstāda bremžu sistēmas, ko izvieto uz vagona ratiņiem un rāmja. Šim izkārtojumam ir gan savas priekšrocības, gan trūkumi.

Priekšrocības – visi bremzes pneimatiskās daļas elementi savā starpā savienoti ar drošām metāla caurulēm un nostiprināti pie vagona rāmja.

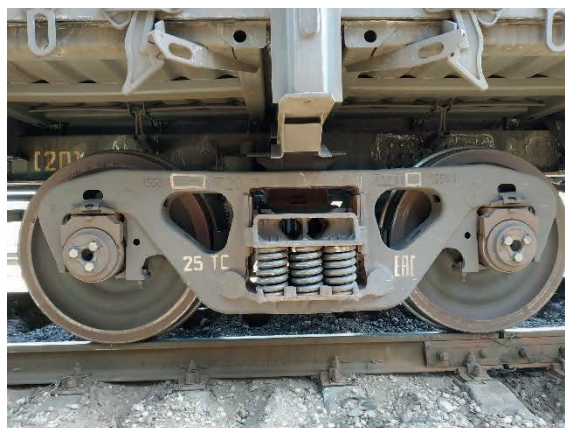
Trūkumi – mehāniskās daļas lielais apjoms, liels daudzums kustīgu elementu, no kuriem katrs var būt jānomaina vai jāremontē, samazināts kopējais pārvada lietderības koeficients, palielinoties antifrikcijas mezglu nolietojumam.

Vagona bremžu sviru pārvada uzbūve

Bremžu darba drošumu nodrošina pneimatiskā un mehāniskā bremžu daļa. Vagona bremžu pneimatiskā daļa nodrošina savlaicīgu spēka radīšanu bremžu cilindrā stienī bremzēšanas procesā. Bremžu mehāniskā daļa nodrošina bremžu kļuču piespiešanu pie riteņpāru velšanās virsmas un to atlaišanu. Daudzos gadījumos konstrukcijas iemeslu dēļ nav iespējams nodrošināt tiešu bremžu cilindra stienņa nospiešanu uz frikcijas elementiem. Tādējādi nepieciešamību ieviest bremžu sviru pārvadu diktē funkcionālas un konstruktīvas bremžu sistēmas īpatnības.

Kā izpētāmā konstrukcija, kurā izmantotas antifrikcijas metālpulvera bukses, tika apskatīts pusvagona bremžu sviru pārvads (BSP), modelis *12-132-03*, konkrētais modelis tiek izmantots Latvijas dzelzceļā [55].

BSP kalpo spēka padevei no bremžu cilindra (BC) stienņa uz bremžu klučiem ar noteiktu ieguvumu spēkā un vienmērīgu šī spēka sadalījumu pa riteņpāriem (1.6. att.).



1.6. att. Vienpusējas darbības BSP – skats uz vagona ratiņiem.

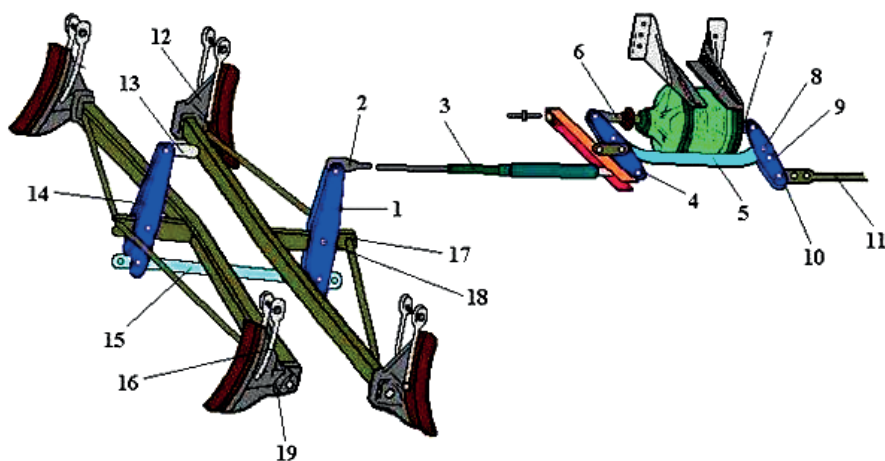
BSP raksturo pārnēsūmskaitlis, ko nosaka visu bremžu kļuču kopējā spiediena spēka un gaisa spiediena attiecība BC. Pārnēsūmskaitlis raksturo, cik reizes bremžu kļuču spiediena spēks lielāks par gaisa spiediena spēku BC [40].

Bremžu sviru pārvada šarnīra savienojumi remonta vienkāršošanai un kalpošanas laika pagarināšanai tiek aprīkoti ar nodilumizturīgām buksēm, kas izgatavotas ar PM metodi [47].

Antifrikcijas materiāla lietošana mezglā veltnītis – buksē ļauj [53]:

- paaugstināt bremžu sviru pārvada šarnīra mezglu buksu ekspluatācijas termiņu;
- samazināt pretķermeņa (veltnīša) nolietojumu;
- saglabāt pastāvīgu bremžu kļuču spiedes spēku ekspluatācijas procesā;
- saglabāt materiālos tēriņus apkalpošanai.

Četrusu kravu vagona bremžu sviru pārvada ietaise parādīta 1.7. attēlā [55].



1.7. att. Kravu vagona bremžu sviru pārvads [55].

Bremžu sviru pārvada darbības princips

Bremžu cilindra virzuļa kāts (6) un sastinguma punkta kronšteins (7) ar veltnīšiem savienoti ar horizontālām svirām (10 un 4), kas vidusdaļā savā starpā saistīti ar savilktni (5). Savilktni (5) tiek uzstādīta atverē (8), ja kompozīciju bremžu kļuči, bet ja čuguna bremžu

kluči, tad atverē (9). No pretējiem galiem sviras (4 un 10) ar veltnīšiem sasaistīti ar vilci (11) un autoregulatoru (3). Apakšējie vertikālo sviru gali (1 un 14) sasaistīti savā starpā ar spraisli (15), augšējie sviru gali (1) savienoti ar vilcēm (2), augšējie malējo vertikālo sviru gali (14) piestiprināti ratiņu rāmjiem ar saisteņu (13) un kronšteinu palīdzību. Trīsstūrvārpstas (17), uz kurām uzstādītas kurpes (12) ar bremžu klučiem, ar veltnīšiem (18) savienoti ar vertikālām svirām (1 un 14). Lai izsargātos no trīsstūrvārpstu un spraišļu nokrišanas uz ceļa to atvienošanās vai pārrāvuma gadījumā, ir paredzēti drošības stūreņi (19) un skavas. Bremžu kurpes un trīsstūrvārpstas (17) piekarinātas pie ratiņu rāmja uz pakarēm (16). Regulatora vilces stienis (3) savienots ar kreisās horizontālās sviras (4) apakšējo galu, regulējošā skrūve – ar vilci (2). Bremzēšanas laikā regulatora korpuss (3) atbalstās pret sviru, kas savienota ar horizontālo sviru (4) ar savilktni. Antifrikcijas metālkeramiskās bukses izmanto vertikālo sviru šarnīra savienojumos (1.7. att. 1 un 14). Bukses tiek uzstādītas vertikālajās svirās un vertikālo sviru savilktnē (1.8. att.).



1.8. att. Kravas vagona bremžu sviru pārvada vertikālā svira (ar bultām atzīmētas slīdbukses uzstādīšanas vietas).

Izpētot mūsdienu tendences metālpulvera materiālu izmantošanā ritošā sastāva detaļās, autors nonācis pie secinājuma, ka metālpulvera materiālu īpašību un iespēju daudzveidība ļauj tos izmantot dažādos ritošā sastāva mezglos. Dzelzceļa transportā visplašāk PM tiek izmantota antifrikcijas slīdgultņu, bukšu, slīdņu un kontaktplāksņu, kā arī frikciju kluču izgatavošanā.

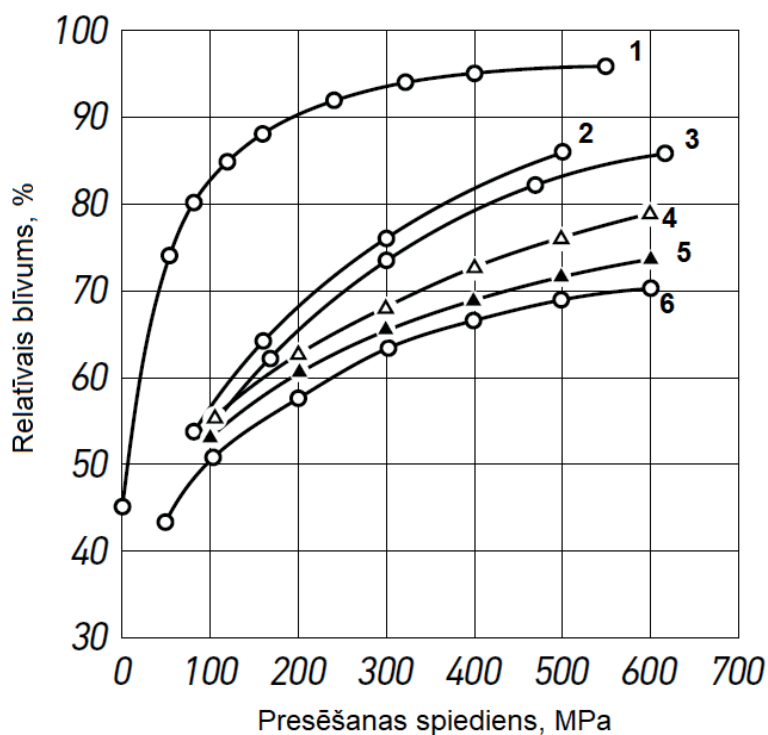
Latvijas dzelzceļā visbiežāk tiek lietotas metālpulvera antifrikcijas bukses, ko uzstāda kravas vagona bremžu sviru sistēmas vertikālajās svirās.

1.5. Metālpulveru detaļu izgatavošanas procesi

1.5.1. Metālpulveru detaļu presēšanas procesu analīze

Presēšanas mērķis ir sagataves veidošana no pulvera šihtas ar noteiktu formu, izmēru un stiprību. Presēšanas procesā palielinās kontakts starp pulvera daļiņām, porainība samazinās, atsevišķas daļiņas tiek deformētas vai sabrūk.

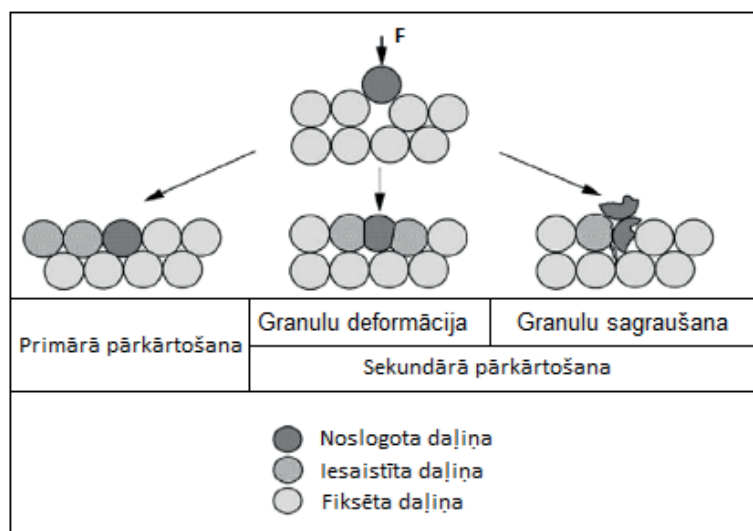
Veidotās sagataves stiprība tiek nodrošināta ar pulvera daļiņu mehāniskās sakabināšanas (kohēzijas), elektrostatisko berzes un pievilkšanās spēku palīdzību. Pieaugot presēšanas spiedienam, palielinās relatīvais blīvums, kā rezultātā arī sagataves cietība un izturība (1.9. att.).



1.9. att. Metālpulveru presēšanas spiediena un relatīvā blīvuma sakarība: 1 – Al, 2 – elektrolītiskais Cu, 3 – porainais Fe, 4 – elektrolītiskais Fe, 5 – karbonils Fe, 6 – H₂ reducēts W [29].

Blīvumu palielinot (ar porainības samazināšanu) par 1 %, presēšanas spiediens parasti pieaug par 3–4 %. Vienpusējā presēšana ir izplatītākā PM presēšanas metode. Pulveris, kas samaisīts ar smērvielām un grafitu, piepilda matricē dobumu un tiek presēts ar puansona ass pārvietošanu, presēšanas spiediens parasti ir 400–1200 MPa. Dažkārt augstā presēšanas spiedienā notiek arī daļiņu aukstā sametināšana, tas nodrošina pietiekamu stiprību tālākai apstrādei [64].

Pulvera ķermeņa apjoma izmaiņas presēšanas laikā notiek sablīvēšanas procesu rezultātā. Sagataves blīvums ir atkarīgs no presēšanas spiediena. Pārkārtošanās procesi pulveru presēšanas laikā parādīti 1.10. attēlā [24], [57].



1.10. att. Daļiņu pārkārtošanās procesi presēšanas laikā.

Cietās granulas grūti deformēt, un tas izraisa blīvuma pazemināšanos uzdotajā blīvuma spiedienā. Tomēr, ja granulas ir pārlietu mīkstas, tās spiediena rezultātā viegli deformēsies, taču nepārkārtosies vajadzīgajā pakāpē zemā spiedienā. Daži sablīvējuma defekti, kas deformācijas stadijā nav pilnībā aizpildīti, paliek, un vienpusējā presēšanā veidosies lieli blīvuma gradienti [10]. Ideālā variantā granulas tiek pakļautas pārgrupēšanai, kā arī deformācijai blīvēšanas laikā [26].

Presēšanas laikā pulvera ķermenis tiek vispusīgi saspīests. Sānu spiediens ir 25–40 % no presēšanas spiediena, un to var noteikt ar 1.1. vienādojumu [44]:

$$P^r = \xi p, \quad (1.1.)$$

kur P^r – īpatnējais sānu spiediens, kg/cm^2 ; p – īpatnējais presēšanas spiediens, kg/cm^2 ; ξ – sānu spiediena koeficients.

Sānu spiediena koeficients ir atkarīgs no pulvera fiziskajiem raksturojumiem: plastiskuma, dispersitātes un daļiņu formas. Sānu spiediens tiek mērīts pēc presējamās sagataves augstuma, un tas pazeminās aksiālā spiediena samazināšanās dēļ.

Kopējo spiedienu uz pulvera sagatavi P , kas atrodas cilindriskā presformā, ar relatīvo blīvumu θ , zināmo aukstumu h un relatīvo presēšanas spiedienu p var noteikt ar 1.2. vienādojumu:

$$P = \frac{\pi D^2}{4} p, \quad (1.2.)$$

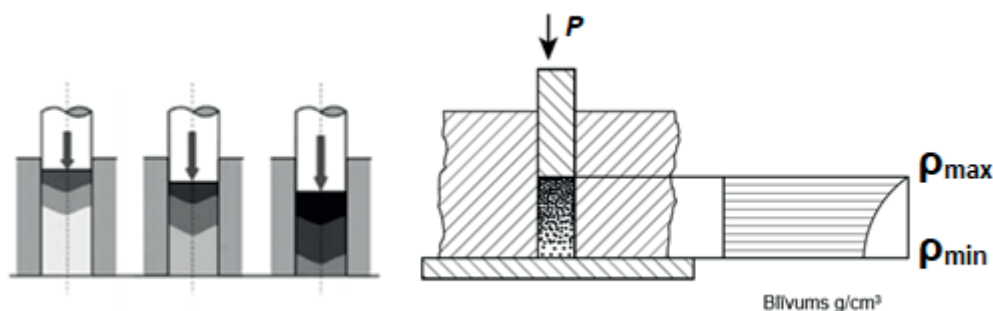
sānu virsmas spiediens uz 1 cm^2 $P^r = \xi p$, sānu virsmas laukums ir πDh , tad summārais spiediens uz to būs:

$$P^r = \xi \pi Dh p = \xi \pi D h_r p, \quad (1.3.)$$

kur h_r – sagataves reducētais augstums, mm.

Tātad summārais sānu spiediens ir atkarīgs tikai no vertikālā īpatnējā spiediena lieluma, savukārt visi pārējie lielumi ir konstanti esošam pulvera svaram.

Pie viļņpusējās presēšanas (1.11. att.) sagataves blīvums ρ samazinās presēšanas virzienā.



1.11. att. Sagataves blīvuma izvietojums augstumā pie viļņpusējās presēšanas.

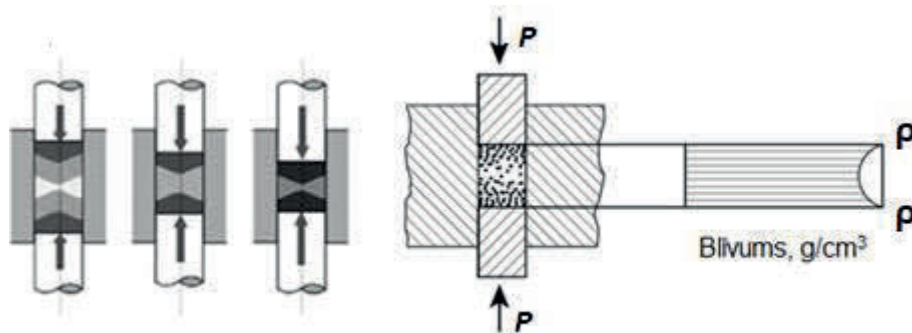
Divpusējo presēšanu (1.12. att.) izmanto, ja izgatavojamās detaļas izmēri atbilst 1.4. vai 1.5. formulas prasībām.

$$1 < \frac{h}{d} < 5, \quad (1.4.)$$

$$3 < \frac{h}{s} < 17, \quad (1.5.)$$

kur h – izstrādājuma augstums; d – diametrs; s – sienas biezums.

Pie divpusējās presēšanas, kas nodrošina vienmērīgāku materiāla blīvuma sadalījumu, lieto divus puansonus, kas presēšanas laikā virzās viens otram pretī, un materiāla blīvuma samazināšana ir novērojama centrālajā sagataves daļā (1.12. att.).



1.12. att. Sagataves blīvuma izvietojums pie divpusējās presēšanas.

Iekšējo atvērumu formēšanai lieto presformas, kas pēc konstrukcijas ir līdzīgas 1.11. un 1.12. attēlā redzamajām, papildinot tās ar stieņiem.

1.1. tabulā parādītas spiedienu vērtības pie viļņpusējās presēšanas un galvenie tehnoloģisko operāciju režīmi prasītā izstrādājuma blīvuma iegūšanai.

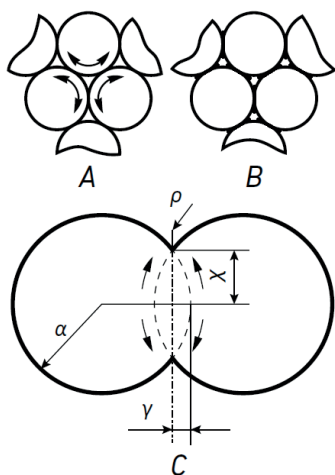
Galvenie tehnoloģisko operāciju režīmi izstrādājumu iegūšanai ar prasīto blīvumu [3], [52]

Blīvums, g/cm ³	Tehnoloģisko operāciju režīmi
6,0–6,6	Presēšanas spiediens – 500–700 MPa, saķepināšana temperatūrā 1150–200 °C, laiks – 2 stundas
6,7–7,1	Presēšanas spiediens – 400–600 MPa; I saķepināšana: temperatūra – 800–850 °C, laiks – 1 stunda; papildpresēšana spiedienā 600–1000 MPa; II saķepināšana: temperatūra – 1150–1200 °C, laiks – 2 stundas
7,2–7,5	Presēšanas spiediens 400–600 MPa, saķepināšana temperatūrā 1150–1200 °C, laiks – 2 stundas; sildīšana līdz 1100 °C un štancēšana spiedienā 800–1000 MPa
7,6–7,8	Presēšanas spiediens 600–700 MPa, saķepināšana temperatūrā 1100–1200 °C, laiks – 2 stundas kopā ar piesūcināšanu ar varu vai misiņu

1.5.2. Metālpulveru sagataves saķepināšana

Aukstā presēšana nenodrošina sagataves mehānisko cietību. Fizikāli tehnisko īpašību paaugstināšanai un detaļu fizikāli ķīmisko īpašību nodrošināšanai sagataves pakļauj saķepināšanai. Saķepināšanu veic temperatūrā, kas ir 0,7–0,8 no pamata komponenta absolūtās kausēšanas temperatūras [3]. Saķepināšanas procesā paaugstinās izstrādājuma blīvums un cietība, tiek panāktas nepieciešamās fizikālās un ķīmiskās īpašības [22].

Saķepināmajam pulvera ķermenim raksturīgi daži ģeometriskie elementi (1.13. att.), ko var definēt ar jēdzieniem “kakliņš”, “starpdaļiņu kontakts”, “pora” u. c.



1.13. att. Pulvera ķermeņa fragments pirms (A) un pēc (B) saķepināšanas un divdaļīgs saķepināšanas modelis (C): α – daļiņas rādiuss; ρ – “kakliņa” rādiuss; χ – izveidotā kontakta šķērsriezuma rādiuss; γ – daļiņu centru tuvināšanās lieluma puse.

J. Geguzin [41] izdalīja trīs principiāli atšķirīgus pulvera ķermeņa stāvokļus tā sildīšanas procesā, no kuriem katrs atbilst noteiktai stadijai.

- **Pirmajā** (sākuma) stadijā notiek pulvera daļiņu piecepinašana citai pie citas, ko pavada kontakta laukuma palielināšanās starp tām; katra daļiņa saglabā struktūras individualitāti, t. i., robeža starp tām saglabājas, līdz ar to saglabājas jēdziens “kontakts starp daļiņām”.
- **Otrajā** stadijā poraino ķermeni var attēlot kā divu nekārtīgi mainīgu fāžu kopumu – vielas (daļiņas) fāzes un “tukšuma” (poras) fāzes, šajā stadijā noslēgtu poru formēšanās vēl nebeidzas, bet kontakti starp daļiņām jau pazūd, un robežas starp tām izrādās izvietotas patvaļīgi, bez sakara ar sākotnējo robežu izvietojumu starp sākuma daļiņām.
- **Trešajā** stadijā pulvera ķermenī galvenokārt ir tikai noslēgtas, izolētas poras, kuru skaits un kopējais apjoms var samazināties. Jāatzīmē, ka pat šīm trim stipri apvienotajām stadijām nevar būt skaidri norobežota atšķirība: noslēgtās (izolētās) poras satiekas reālā pulvera ķermenī agrīnajā sildīšanas stadijā (piemēram, vēl sagataves veidošanas laikā), bet daži sākotnējie kontakti starp daļiņām saglabājas teju līdz trešajai saķepināšanas stadijai.

Pulvera konglomerāta pārvērtības procesu blīvā ķermenī var apskatīt kā analoģu ķīmiskajai reakcijai un raksturot ar brīvās enerģijas pazemināšanas termodinamikas vienādojumu [41]:

$$\Delta F = \Delta H - T\Delta S, \quad (1.6.)$$

kur ΔH un ΔS – attiecīgi siltuma satura un sistēmas entropijas izmaiņas.

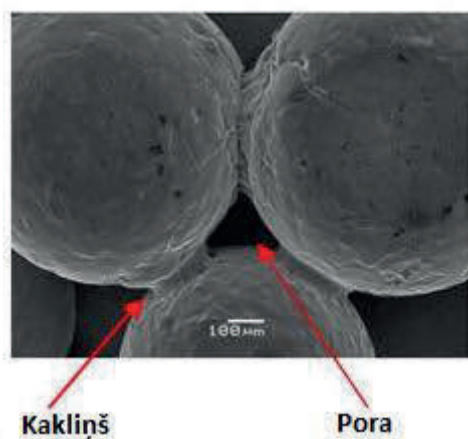
Pulvera antifrikcijas materiālu presēšanas un saķepināšanas orientējošie režīmi ir norādīti 1.2. tabulā.

1.2. tabula

Pulvera antifrikcijas materiālu presēšanas un saķepināšanas režīmi [9]

Pulvera materiāls	Presēšanas spiediens, MPa	Saķepināšanas režīms		
		Temperatūra, °C	Izturēšanas ilgums, min	Aizsargvide
Dzelzs grafitis	400–800	1050–1150	60–180	Endogāze
Bronzas grafitis	200–400	720–850	30–120	Ūdenradis

Saķepināšanas sākuma etapos nepieciešamas arī savstarpēji saistītas poras, kas atvērtas virsmai. Atvērtās poras vajadzīgas, lai efektīvi noņemtu smērvielas, kā arī lai nodrošinātu gāzveidīgo produktu (piemēram, ūdens tvaiki) izeju pie agras dzelzs oksīda atjaunošanas, kas svarīgi starpdaļiņu kakliņu veidošanai (1.14. att.).



1.14. att. Kakliņu un poru veidošanās [56].

Kakliņa veidošana sākas ar starpdaļiņu kontaktu un, paaugstinoties temperatūrai, pieaug, veidojot nepārtrauktu tīklu. Pateicoties difūzijai, veidojas stabili starpdaļiņu kakliņi, kas nepieciešami labu materiāla mehānisko īpašību nodrošināšanai.

2. EKSPERIMENTĀLO METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS PROCESU PĒTĪJUMI

2.1. Eksperimentālo detaļu no mazlēģētiem komponentiem tribotehniskie raksturojumi

2.1.1. Eksperimentālo detaļu mehāniskās īpašības

Detalizētai antifrikcijas detaļu tribotehnisko īpašību izpētei tika izgatavoti vagona bremžu sviru sistēmas bukšu eksperimentālie paraugi no mazlēģēta pulvera maisījumiem uz Fe-C bāzes. Detaļas tika izgatavotas ar vienpusēju statisku presēšanu, kam sekoja saķepināšana.

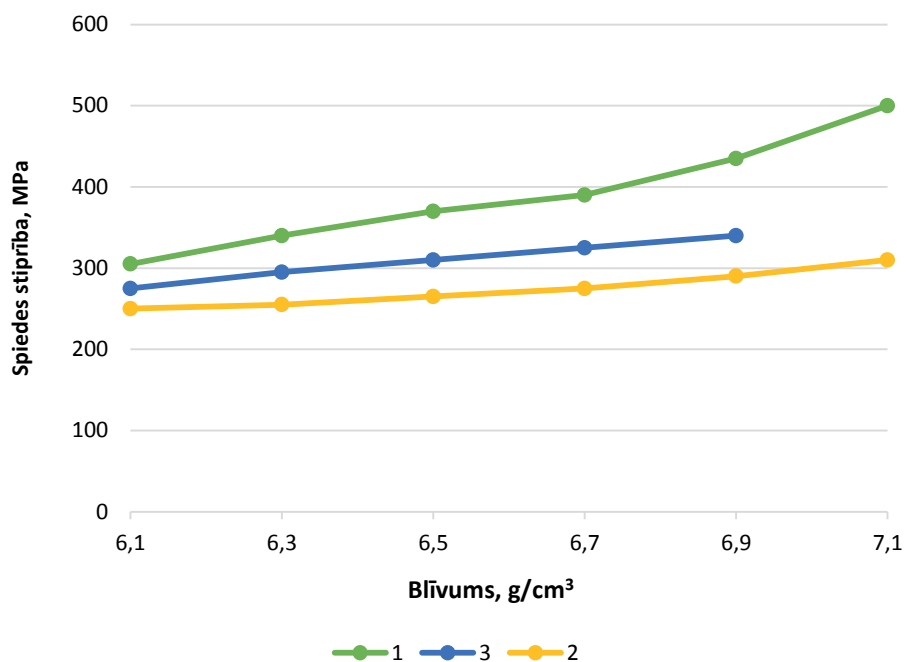
Paraugu izgatavošanai tika izmantoti pulveru maisījumi, kas satur leģējošus elementus Ni, Cu, Mo (2.1. tab.). Kā bāzes materiāls tika pieņemts kompānijas *Hoganas AB* ražotais maisījums AHC100.29 + Cu + Ni + C (1. maisījums) un maisījums ar Ni un Mo saturu, kas mazāks par 0,3 %, un paaugstinātu Cu saturu (2. maisījums) un 3. maisījums ar Ni saturu virs 2 % [57].

2.1. tabula

Materiālu raksturojums paraugu izgatavošanai

Maisījums	Komponenti, % (masas)								Pulvera raksturojums		
									Plūsta- mība, s uz 50 g	Uzbēruma blīvums, g/cm ³	Sablīvējums, g/cm ³
1. maisījums	Fe, %	Ni, %	Cu, %	Mo, %	S, %	P, %	C, %	Kenno- lube	38	3,18	7,05
2. maisījums	94	2,0	2,0	0,5	0,2	0,1	1,2	1,0	40	3,15	6,85
3. maisījums	94	2,5	2,0	0,5	0,2	0,1	0,7	1,0	40	3,05	6,90

Paraugu presēšana tika veikta cietā presformā uz hidrauliskās preses 600 MPa spiedienā. Saķepināšana tika īstenota aizsargatmosfērā 60 minūšu garumā 1120 °C temperatūrā [12]. Paraugu spiedes stiprības robežas tika pārbaudītas atbilstoši standartam *ISO 2739:2012* [61].

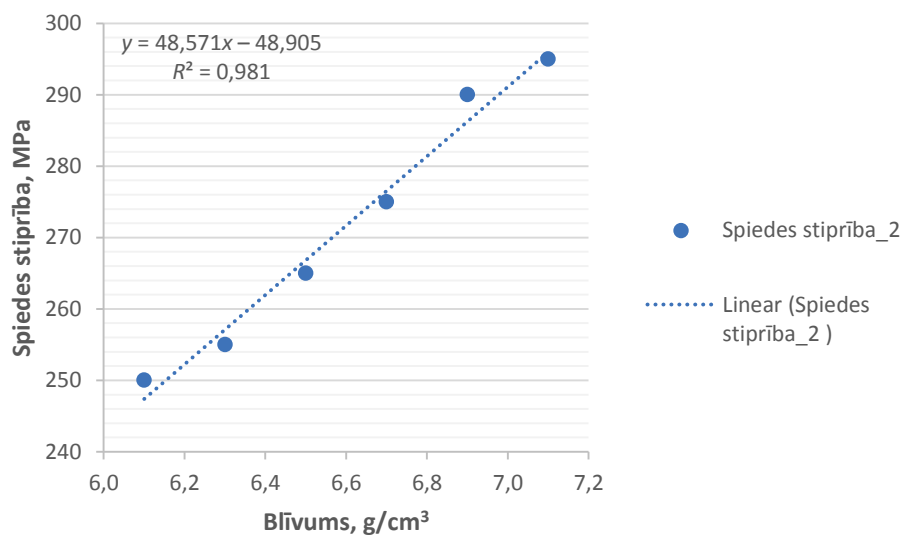


2.1. att. Spiedes stiprība un materiāla blīvuma atkarība [12].

Materiālam no mazlēģēta pulvera (2.1. att.) (2. maisījums) stiprība ir nedaudz zemāka par kontroles materiālu (1. maisījums). Ņemot vērā ievērojami zemāko 2. maisījuma dārgo leģējošo komponentu saturu, kā arī atbilstību prasībām, kas noteiktas [31], [54], [55], to var rekomendēt metālpulveru slīdbukšu ražošanai.

Eksperimentāla materiāla blīvuma un spiedes stiprības atkarības prognozēšanai, kā arī raksturlielumu kopsakarības rakstura izmeklēšanai tika veikta regresijas analīze.

Materiāla no mazlēģēta pulvera (2. maisījums) regresijas grafiskais attēlojums redzams 2.2. attēlā.



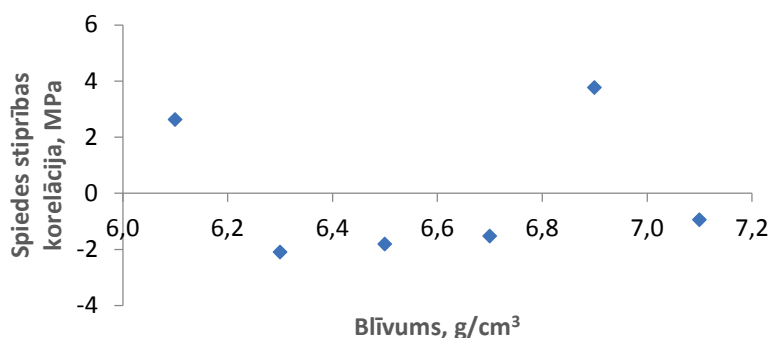
2.2. att. Mazlēģētā kompozīcijas materiāla (2. maisījums) spiedes stiprības un blīvuma regresijas grafisks.

Ar regresijas metodi izveidoto prognozēšanas modeļa un to faktoru statistiskais nozīmīgums tika novērtēts ar dispersijas analīzes metodi *ANOVA* (*Analysis of Variance*).

Tika aprēķināti sakarību ciešuma rādītāji:

- korelācijas koeficients (R) bija 0,99 %, kas norāda uz ciešam spiedes stiprības un blīvuma sakarībām.
- determinācijas koeficients (R^2) kas raksturo modeļa precizitāti, pēc aprēķiniem $R^2 = 0,981$ jeb 98,1 %. Tas nozīmē, ka 98,1 % materiāla stiprības variācijas ir atkarīgas no materiāla blīvuma.

Ar modeļa palīdzību materiāla stiprības aprēķinātās svārstības parādītas 2.3. attēlā.



2.3. att. Aprēķinātās spiedes stiprības korelācija.

No aprēķinu rezultātiem var secināt, ka materiāla stiprība, ņemot vērā ar matemātisko modeli aprēķinātās iespējamās svārstības, atbilst prasībām metālpulveru slīdbukšu ražošanai un izmantošanai dzelzceļa vagonu bremžu svīru pārvada šarnīra mezglos.

Tālākai mazlēģētās kompozīcijas apgūšanai ir veikta metalogrāfijas izpēte, lai izzinātu materiāla mikrostruktūru.

Mazlēģēta materiāla mikrostruktūras analīzei tika izgatavoti slīpējumi ar metalogrāfijas aprīkojuma *PRESI* palīdzību [63]. *Mecatome 255/300* – paraugu griešanai; *Mecapress II* – slīpējuma iepresēšanai; *Mecatech 334* – slīpējumu pulēšanai (2.4. att.).



a) *Mecatome 255/300*



b) *Mecapress II*



c) *Mecatech 334*

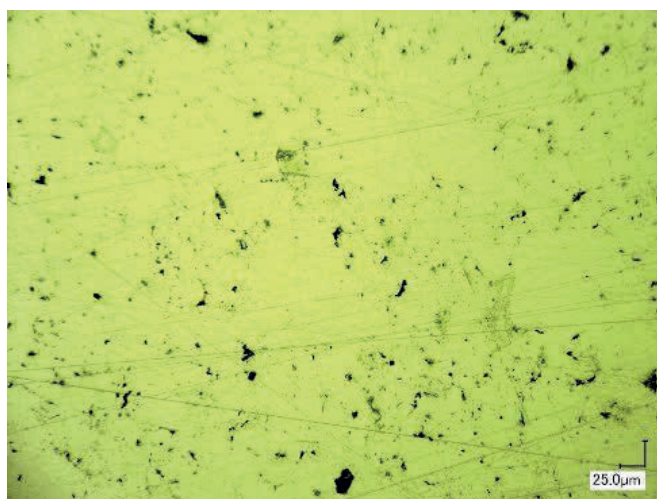
2.4. att. Aprīkojums *PRESI* metalogrāfijai.

Materiāla mikrostruktūras novērtēšanai tiek izmantots optiskais mikroskops *Keyence VHX-2000* (2.5. att.) [62].



2.5. att. *Keyence VHX-2000*.

2. parauga mikrostruktūra atspoguļo vienmērīgi sadalīto porainību (2.6. att.).



2.6. att. Mazlēģēta metālpulvera materiāla mikrostruktūra [12].

Pētījumi parādīja, ka, slīdbukšu izgatavošanai izmantojot metālpulveru 1. un 3. maisījumu, rodas problēmas iegūt pēc ķīmiskā sastāva un struktūras viendabīgus izstrādājumus, jo tie tiek radīti, maisot sākotnējos pulverus, savukārt 2. maisījumu izgatavo, izsmidzinot dotā ķīmiskā sastāvā kausētu tēraudu, kam seko cietas smērvielas pievienošana [20]. Tādēļ, lai iegūtu bremžu sviru sistēmu metālpulveru slīdbukses, kas paredzēti darbam triecieniedarbības apstākļos un sarežģīti saspringtā stāvoklī, lietderīgi izmantot mazlēģētu pulveru kompozīciju – 2. maisījumu.

2.1.2. Eksperimentālo detaļu triboloģiskie un virsmas kvalitātes mērījumi

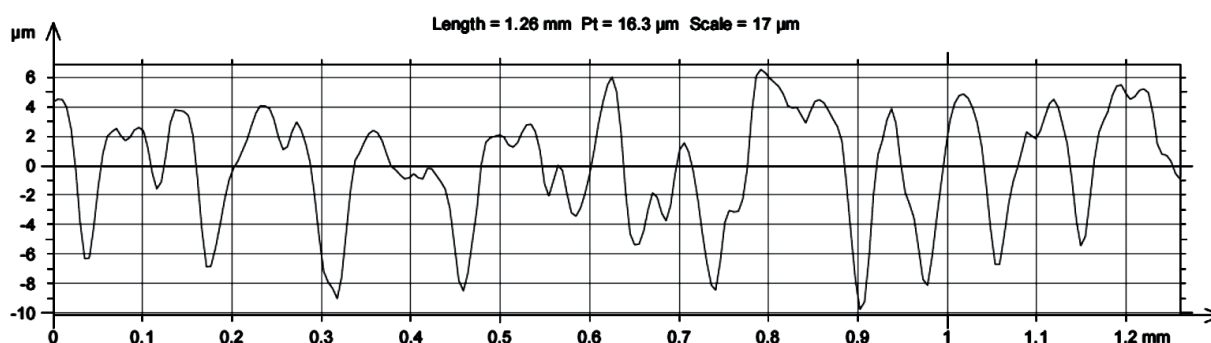
Lai novērtētu mazlēģētu bukšu un pētāmās detaļas virsmas stāvokļa metroloģiskās izpētes kvalitāti, tika izmantota *Taylor Hobson Ltd.* trīsdimensiju mērīšanas sistēma.

Raupjuma mērīšana tika veikta, izmantojot profilometru, ar kuru iespējams noteikt gan vidējo profila augstumu R_z , gan vidējo aritmētisko profila novirzi R_a .

Signāli no devēja caur elektronisko pastiprinātāju nonāk elektroniskajā blokā, kas pārrēķina nolasītās pārvietojuma vērtības un atspoguļo tās displejā kā mērījumu rezultātu (2.7. att.).

Tika izmērīti divdimensiju raupjuma parametri (atbilstoši *ISO 4287 "Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters"*);

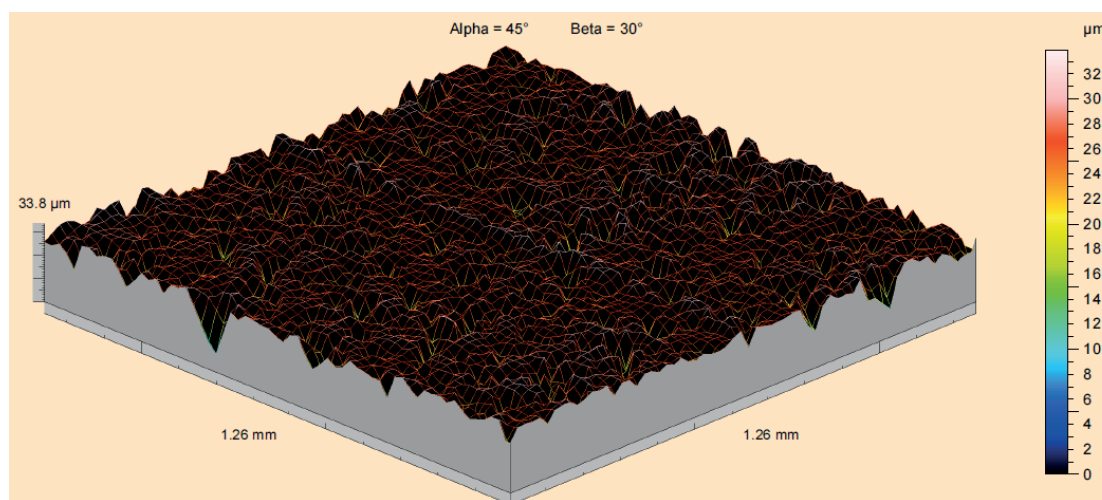
- R_a – vidējā aritmētiskā profila novirze;
- R_z – profila nelīdzenumu augstuma rādītājs (profila piecu lielāko minimumu un piecu lielāko maksimumu punktu vidējo aritmētisko absolūto noviržu summa bāzes garumā).



2.7. att. Eksperimentālās detaļas raupjuma profilogramma
(Taylor Hobson Ltd. lietojumprogrammatūras attēls).

Turpinājumā tika izmērīti un izanalizēti vairāki trīsdimensiju tekstūras parametri (atbilstoši *EN ISO 25178-2 "Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters"*) [58].

Iegūtie trīsdimensiju pulvera detaļas virsmas attēli parādīti 2.8. attēlā.



2.8. att. Trīsdimensiju mazlēģētas pulvera detaļas virsmas attēla skats [20].

Apskatītie pulvera detaļas trīsdimensiju tekstūras parametri pēc mērījumiem, kā arī divdimensionālo mērījumu rezultāti parādīti 2.2. tabulā.

Pētāmās mazlēģētās pulvera detaļas raupjuma un virsmas tekstūras parametri [20]

Divdimensiju amplitūdas nelīdzenuma parametrs	$Ra, \mu\text{m}$	2,37
	$Rz, \mu\text{m}$	11,2
Trīsdimensiju amplitūdas tekstūras parametrs	$Sa, \mu\text{m}$	2,65
	Ssk	-1,56
Trīsdimensiju telpisks parametrs	Str	0,766
Trīsdimensiju funkcionālais parametrs	$Vmc, \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,0187
Trīsdimensiju hibrīda parametrs	Sfd	2,56

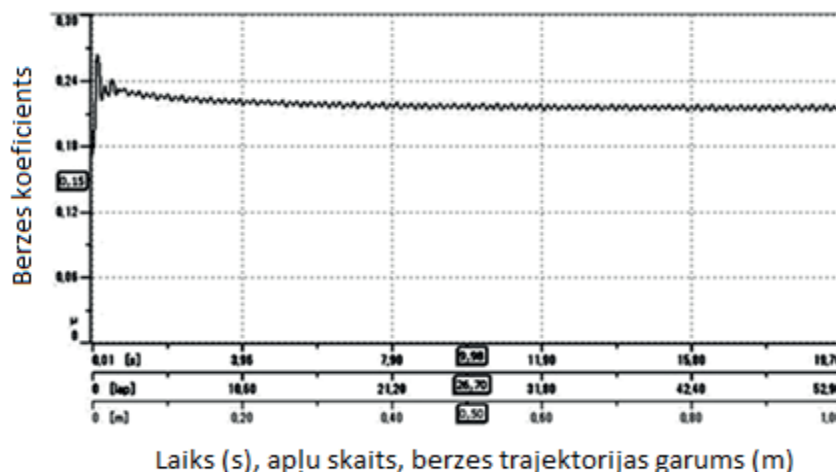
Mērījumu rezultāti apstiprina, ka pētāmajai pulvera detaļai no mazlēģēta pulvera materiāla ir salīdzinoši augsta virsmas kvalitāte. Jāatzīmē, ka virsma ir pietiekami tuva izotropai, jo parametra Str vērtība (virsmas tekstūras attiecība, mēra virsmas izotropiju) tuva 1 (maksimālā Str vērtība). Funkcionālā parametra Vmc visaugstākā vērtība (pēc mēroga ierobežotas virsmas materiāla tilpums, norāda materiāla izmēru, kas veido virsmu starp dažādiem augstumiem), pierāda labu virsmas nesošo spēju, pateicoties lielam materiāla apjomam, kas normālas ekspluatācijas apstākļos atrodas kontaktā.

Augstās hibrīdparametra Sfd vērtības (tuvas 3 – maksimālā Sfd vērtība) daļēji apstiprina šādu hipotēzi: determinēti haotisko virsmu, tādu kā porainā pulvera materiāla virsmu pēc presēšanas un saķepināšanas, nevar pienācīgi raksturot ar standarta divdimensiju raupjuma parametriem. Tādējādi ļoti ticama ir neprecīzu divdimensiju mērījumu iegūšana izstrādājuma virsmas sarežģītības dēļ.

Negatīva amplitūdas parametra Ssk vērtība (pēc mēroga ierobežotas virsmas asimetrija parāda virsmas augstuma simetrijas pakāpi attiecībā pret vidējo plakni) apstiprina virsmas spēju noturēt smērvielu.

Triboloģija

Standartam *DIN 50324 “Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system)”*, *ASTM G99 “Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus”* un *ASTM G133 “Standard test method for linear reciprocating Ball-on-flat sliding wear”* atbilstošā triboloģiskā izpēte tika veikta, izmantojot *CSM Instruments* tribometru. Berzes koeficients kā laika, aplū (griešanās ciklu skaits) un berzes ceļa garuma funkcija pārbaudāmajai detaļai ir redzams 2.9. attēlā.



2.9. att. Berzes koeficients kā laika, griešanās ciklu skaita un berzes ceļa garuma funkcija [20].

Ar salīdzinoši nelielām svārstībām visā berzes garumā tiek novērota stabila berzes koeficienta līkne. Vizuālā apskate pēc izmēģinājumiem ar mērķi noskaidrot nodiluma vai virsmas plastiskās deformācijas pēdas parādīja, ka izmēģinājumu laikā noticis standarta berzes process. Vidējā berzes koeficienta vērtība mazlēģētai pulvera buksē bija $\mu = 0,22$.

Eksperimentālo buksu tribotehniskās īpašības, kas noteiktas pēc izmēģinājumu rezultātiem, apstiprina to piemērotību izmantošanai vagona bremžu sviru pārvada mezglos.

2.2. Presēšanas pētījumi ar impulsveida magnētisko lauku

Kombinētajām tehnoloģijām raksturīgi, ka viena sloģošanas avota darbības laikā otrs darbojas vienreiz uzdotajā (biežāk sākuma vai beigu) ražošanas cikla momentā.

Pie kombinētajiem procesiem var pieskaitīt vibrāciju kratīšanas un impulsu blīvējuma savienojumu, radiālo dinamisko garmēra izstrādājumu sablīvēšanu ar pakāpenisku to kustību, statisko sablīvēšanu uz hidrauliskās preses un impulsu blīvējumu [14], [17].

Pētījumi tika veikti ar *Hoganas AB* pulveriem. Dati par materiāliem redzami 2.3 tabulā.

2.3. tabula

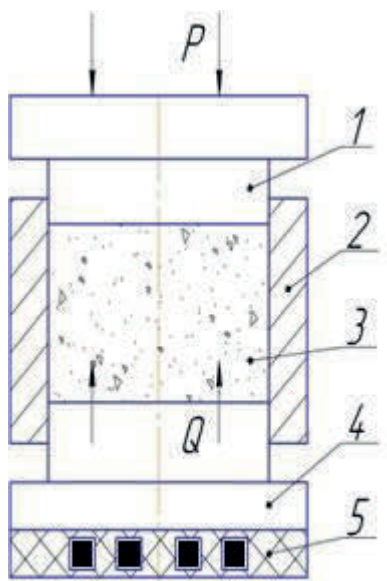
Pulvermateriāli uz dzelzs bāzes

Nr. p.k.	Dzelzs pulvera zīmols	Ražošanas metode	Papildu sastāvdaļas
1.	<i>NC 100.24</i>	Atjaunots	4 % Cu + 0,6 % K
2.	<i>ASC 100.29</i>	Izsmidzināts	1,5 % Cu + 0,15 % K
3.	<i>SC 100.26</i>	Atjaunots	2,0 % Cu + 0,15 % K
4.	<i>Distaloy AB</i>	Iepriekš lēģēts	Cu (1,5 %), Ni (1,75 %), Mo (0,5 %) 0,15 % K

Sablīvēšanai tika izmantota hidrauliskā prese ar maksimālo spēku 100 kN. Uz preses rāmja tika novietota tērauda presforma ar 10 mm diametru. Iebēršanas kameras dziļums bija 20 mm. Apakšējais puansons apgādāts ar elektrību vadošu plāksni un uzstādīts uz plakana induktora (2.10., 2.11. att.), kas pieslēgts *Impulse magnetizer U-series* impulsa strāvu magnetizētajam ar uzstādītu izlādes enerģiju 2,5 kJ (25 000A).

Pulveris sākotnēji tika pakļauts hidrauliskajai preseī ar spēku 50 kN, pēc tam vienreizējai vai vairākkārtīgai impulsu iedarbībai, izmantojot induktoru, kas pieslēgts impulsa strāvas magnetizētajam.

Tika izmantots plakanais induktors no vara vada ar 6 mm² šķērsgriezumu un 12 vijumiem. Apakšēja puansona (4) masa bija 98 g, vara plates masa – 25 g.

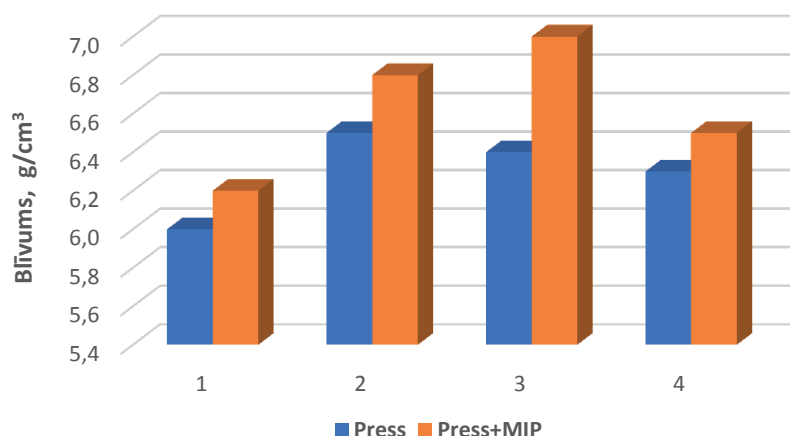


2.10. att. Pulvera presēšana cietā matricē, magneta-impulsa presēšanas (MIP) hibrīdtehnoloģijas shēma [18].
1 – puansons; 2 – konteiners; 3 – pulveris;
4 – apakšējais puansons; 5 – induktors.



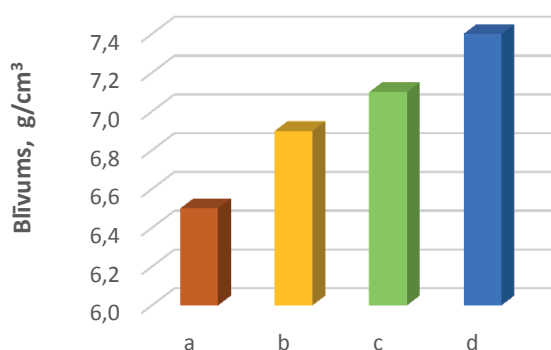
2.11. att. Eksperimentālā ierīce [18].

Presēšanas blīvums δ tika novērtēts, mērot puansona nosēdes pakāpi matricē. Eksperimentu rezultāti parādīti 2.12.–2.14. attēlā.

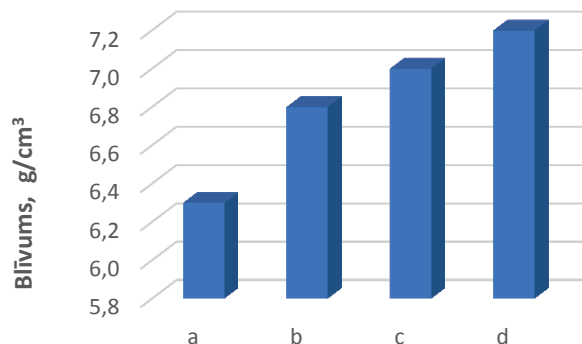


2.12. att. Pulveru kompozīciju (2.3. tab.) blīvuma izmaiņas blīvēšanas laikā [18].

Rezultāti (2.12. att.) rāda, ka triecienimpulsa uzlikšana paaugstina presējuma blīvumu visām pulvera kompozīcijām. Turklāt lielākais blīvuma pieaugums vērojams magnetizētāja izlādes enerģijas augstākos līmeņos (2.13. att.). Izlādes impulsu skaita ietekme īpaši jūtama, ja to skaits ir neliels. Palielinoties impulsu skaitam vairāk par 10, šī ietekme kļūst mazāk pamanāma (2.14. att.).



2.13. att. Presējuma blīvuma izmaiņas atkarībā no īpatnējās izlādes enerģijas: a – 0,8 kJ/cm³; b – 0,9 kJ/cm³; c – 1,0 kJ/cm³; d – 1,2 kJ/cm³ [18].



2.14. att. Blīvuma izmaiņas atkarībā no impulsu skaita ar īpatnējās izlādes enerģiju 0,9 kJ/cm³: a – 1; b – 5; c – 10; d – 15 [18].

Kā parādīja eksperimenti, kombinēto sablīvēšanas metožu izmantošana veicina pulvermateriāla blīvuma paaugstināšanos. Neliela augstuma izstrādājumiem visērtākā metode ir pulvera sablīvēšana cietā matricē ar elektromagnētisko impulsu uzlikšanu.

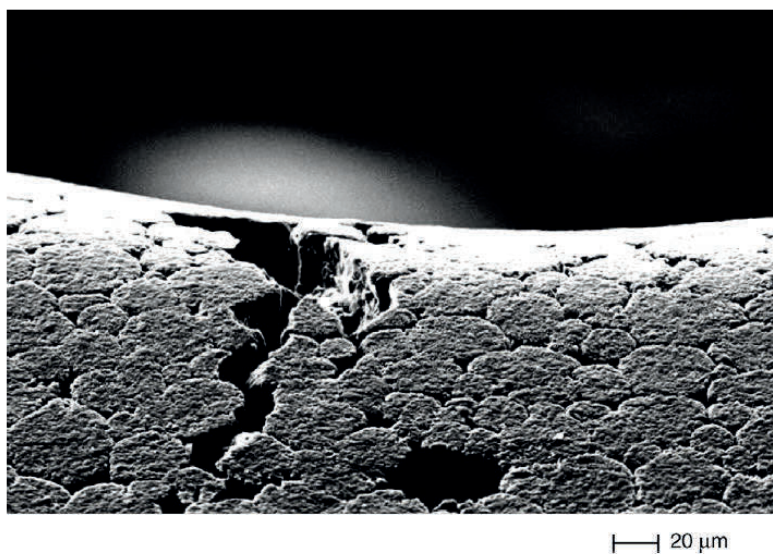
Lai izgatavotu vagona bremžu sviru sistēmas bukses, konkrēto presēšanas metodi var rekomendēt eksperimentālo paraugu ražošanā, jaunu paraugu kompozīciju īpašību izpētē, kā arī ražojot garmēra antifrikcijas bukses.

3. METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS BRĀĶIS UN KVALITĀTES KONTROLES PAŅĒMIENI

3.1. Saķepināšanas brāķis un pasākumi tā samazināšanai

Saķepinot pulvera detaļas, var veidoties ne tikai brāķis, kas saistīts ar tehnoloģijas pārkāpumiem, bet var atklāties arī iepriekšējo operāciju brāķi: pulvera un maisījumu izgatavošanas, formēšanas.

Piemēram, ja granulas nav pietiekami deformētas sablīvēšanas laikā, starpgraudu poras un saglabājušās granulu robežas izraisīs ar granulām saistītus defektus saķepinātajā detaļā. Defekta piemērs parādīts 3.1. attēlā.

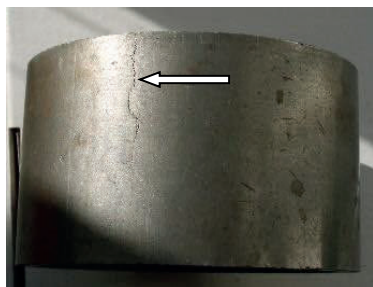


3.1. att. Granulometriskie defekti uz metālpulveru detaļas virsmas [24].

Saķepināšanas brāķis, īpaši tāds, kas nav izlabojams, pamatīgi pasliktina ar PM metodi veidotas detaļas ekonomiskos rādītājus. Pēc brāķa konstatēšanas nepieciešams noteikt tā parādīšanās iemeslus un veikt darbības, lai nepieļautu turpmāku brāķi arī visos etapos pirms saķepināšanas. Līdz ar to ir nepieciešams attīstīt nesagraujošās kontroles izmantošanu metālpulveru detaļu ražošanas procesā.

3.2. MP detaļu kvalitātes kontrole ar ultraskaņu

Lai noteiktu metālpulveru bukšu no mazlēģētiem pulveru maisījumiem viendabīguma pakāpi un iespēju noteikt plaisas, izmantojot ultraskaņu, tika izmantota *TOF* metode (*time-of-flight*). Veicamo mērījumu mērķis bija vienlaikus novērtēt metālpulvera materiāla īpašību neviendabīgumu pēc izstrādājuma apjoma un plaisu atrašanās vietas. Kontroles pārbaudei tika izvēlēti paraugi ar garenisku plaisu, kā arī paraugi bez redzamiem defektiem (3.2. att.).



a



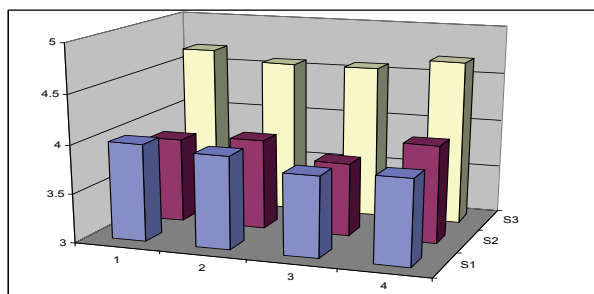
b

3.2. att. Ultraskaņas mērījumu ilustrācija: a) paraugs ar plaisu; b) adapteru pielikšana [20].

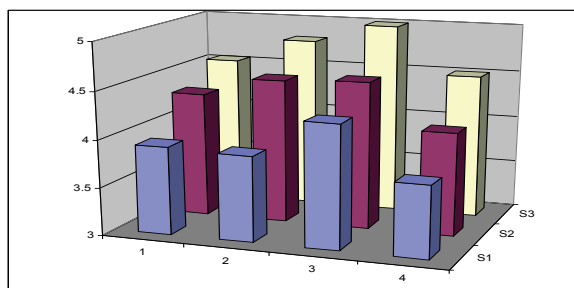
Mērījumi tika veikti ar virsmas izskanējumu pie fiksētas akustiskās bāzes starp izstarotāju un uztvērēju, kas vienāda ar 20 mm. Bāze orientējās perpendikulāri parauga cilindra asij un tādā veidā bija perpendikulāra plaisas virzienam.

Ultraskaņas signālus ierosināja divu periodu garuma sinusoidāls impulss ar nesējfrekvenci 1 MHz.

Ultraskaņas garenvirziena vadošā viļņa ātruma mērījumu rezultāti paraugu virsmā parādīja, ka tie ir nevienmērīgi. Skaņas ātrums pa atsevišķu paraugu zonām var mainīties 3,75–5,00 km/s, kas parāda to sastāva un porainības nevienmērīgumu tehnoloģiskā procesa dēļ. Skaņas ātruma sadalījums paraugos (3.3. a un 3.3. b att.) liecina par lielāku īpašību mainību augstumā nekā pa šķērsriezuma zonām. Tika novērots krasi paaugstināts skaņas ātrums vienā no gala joslām, kas saistīts ar pulvera sablīvēšanas īpatnībām.



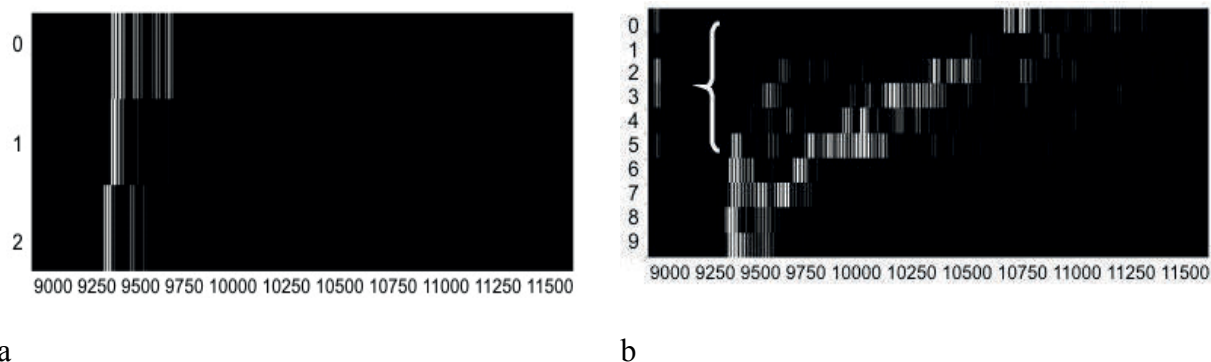
a



b

3.3. att. Skaņas ātruma sadalījums (km/s) pa perimetru (1–4) un pēc augstuma (S1–S3) divos paraugos [20].

Plaisas rajonā ultraskaņas signāli tika noņemti 10 zonās izstrādājuma augstumā, lai novērtētu izmaiņas, kas saistītas ar plaisas attīstību. 3.4. b attēlā parādīti ultraskaņas signālu kopuma divdimensiju attēli, kur abscisa ass – ultraskaņas izplatīšanās laiks, ordinātu ass – rindu pēc rindas reģistrēti signāli paraugu augstumā, savukārt spilgtums atbilst signālu amplitūdai, plaisas augstums atzīmēts ar figūriekavām.



3.4. att. Ultraskaņas signālu attēls paraugu augstumā (ordinātu ass):
a) bez defektiem; b) paraugā ar plaisu [20].

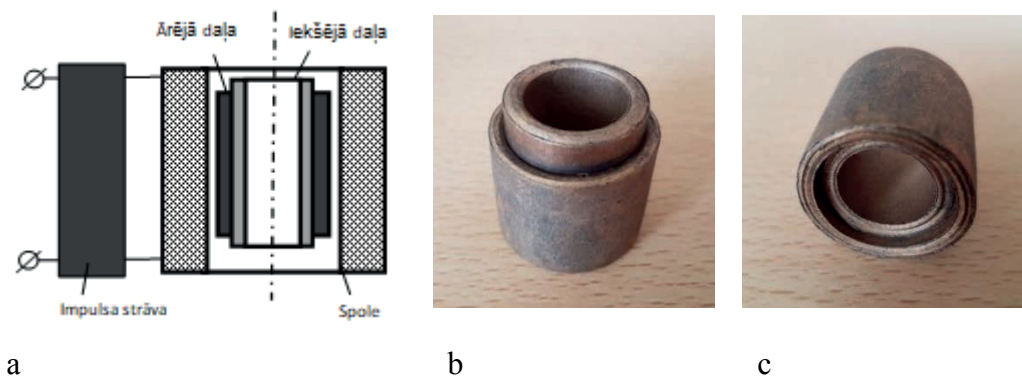
Ultraskaņas signālu divdimensiju profils precīzi parāda plaisas atklāšanu pēc tiešās caurīšanas signāla neesamības un aizkavēto atstaroto signālu relatīvās pastiprināšanās no izstrādājuma pretējā gala. Tādējādi signālu profili var kalpot par plaisu parādīšanās indikatoriem.

Veiktie pētījumi parādīja, ka ultraskaņas kontrole (*TOF* metode) ļauj ne tikai sekmīgi atklāt plaisas PM izstrādājumos, bet ir arī perspektīva materiāla īpašību izkliedes kontrolei pēc izstrādājuma apjoma.

3.3. MP detaļu savienojumu kontrole ar ultraskaņas un radiogrāfijas metodēm

Pētāmo detaļu savienojums tika veikts, izmantojot elektromagnētisko lauku un speciāli izgatavotu induktoru [16]. Detaļu savienojuma veikšanas shēma un savienotās slīdbukses ir redzamas 3.5. attēlā.

Pētījumi tika veikti ar mērķi novērtēt antifrikcijas metālpulvera bukšu, savienojuma kvalitāti. Bukšu pāri, kas savienoti impulsa magnētiskajā laukā, parādīti 3.5. b, c attēlā. Nopresēšana tika veikta ar 90 mm augsta spirāles induktora, kura diametrs 80 mm, palīdzību. Induktors savienots ar impulsa strāvas novadītāju. Pāri bija izvietoti induktora ass zonā, kā parādīts 3.5. a attēlā. Pieliktā elektromagnētiskā lauka magnētisko un elektrisko komponentu lielumi uz induktora ass sasniedza 835 A/m un 17 960 V/m.

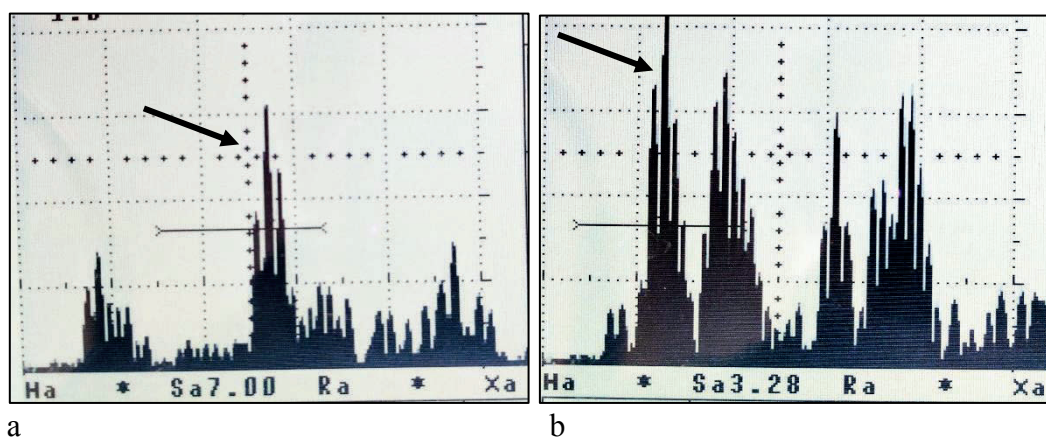


3.5. att. a) principiālā pulvera bukšu nopresēšanas shēma;
b), c) savienojums bukse–bukse pēc nopresēšanas [33].

Impulsa atbalss metodē tika izmantots *Krautkramer GE Inspection Technologies GmbH* ultraskaņas defektoskops *USM 25*, divu elementu pārveidotājs *Olympus 01JJ4L* darba frekvencē 4 MHz tika izvēlēts, ņemot vērā bronzas grafīta materiāla specifiku, tā porainību un tādējādi arī lielu signāla vājinājumu.

Ultraskaņas testēšana

Ehogrammas piemērs redzams 3.6. attēlā. Pareizas adhēzijas gadījumā starp savienojošajām detaļām ultraskaņas viļņi bija iespēja brīvi iziet cauri robežai starp ārējo un iekšējo daļu un atstaroties no sienas iekšējās virsmas. Tādējādi atbalss reakcijai bija kavēšanās, kas atbilst dubultam sienas biezumam abos virzienos. Vājas apspāides un gaisa spraugas esamības gadījumā starp ārējo un iekšējo daļu atbalss reakcijai ir divkārt īsāks kavējums, kas saistīts ar pilnīgu atstarošanu no ārējās daļas sienas virsmas. Vidējā mērījumu kļūda pārbaudītajos paraugos bija 0,14 mm, kas ir augstas mērījumu pieņemamās precizitātes rādītājs [33]. Tādējādi ultraskaņas testēšana apstiprināja pastāvīgo savienojumu, kas iegūts ar impulsa magnētisko lauku apspāides metodi un atbilst *ISO* standartiem [59] ultraskaņas kontrolei, principiālu lietojamību nesagraujošajā kontrolē.

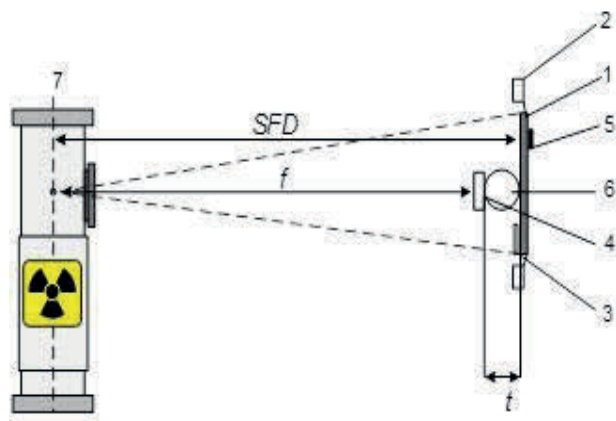


3.6. att. Ultraskaņas ehogrammu paraugi: a) ciešas, un b) vājas sastiprināšanas gadījumos. Ar bultām norādīti atstarojumi, kas atbilst 7,00 mm un 3,28 mm biezumam [33].

Radiogrāfijas kontrole

Metālpulvera detaļu savienojumu (bukšu) mehāniskās viengabalainības novērtējuma izpēte pēc apspāides impulsa magnētiskajā laukā tika veikta ar ierīces *X-ray apparatus SMART EVO 200D of YXLON* palīdzību.

Aparātam fokusa punkts ir 1,0 mm, starojuma jauda ar pastāvīgu potenciālu – 750 W, nodrošinot augstu ražīgumu, īsu eksponēcijas laiku un augstu izšķirtspēju. Principiālā testēšanas shēma redzama 3.7. attēlā.



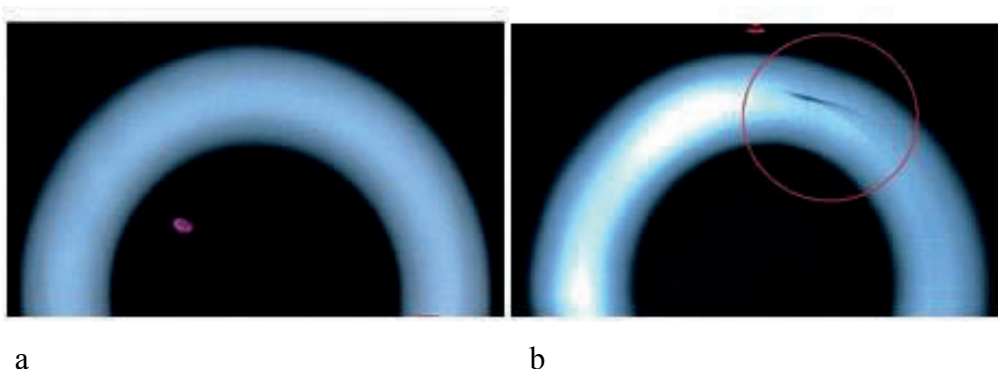
3.7. att. Principiālā radiogrāfijas testēšanas shēma [66].

1 – svina ekrāns; 2 – filma; 3 un 4 – objekta un balsta punkta atzīme; 5 – pretējā starojuma indikators; 6 – objekts; 7 – rentgena starojuma avots; f – attālums starp avotu un objektu; SfD – attālums no avota līdz filmai; t – objekta biezums.

Testēšanas procedūra tika veikta atbilstoši standartiem *LVS EN ISO 17636-1:2013* [60]. Caurstarošanas režīms tika uzstādīts eksperimentāli, izmantojot savienojuma paraugu bukse-bukse. Četri kontroles apstarojumi tika izpildīti ar laika intervāla samazinājumu, sakarā ar to tika atklāta likumsakarība starp attēla aptumšošanas koeficientu un ekspozīcijas laiku, kas variēja no 4 līdz 6 reizēm atkarībā no apstarojamā biezuma.

Rezultātu salīdzināmībai tika atrasta aptuvena saistība starp gamma starojuma daudzumu vienam un tam pašam metālam monolītā struktūrā un pulvera struktūrā. Filmu optiskais blīvums svārstījās robežās 2,3–3,5.

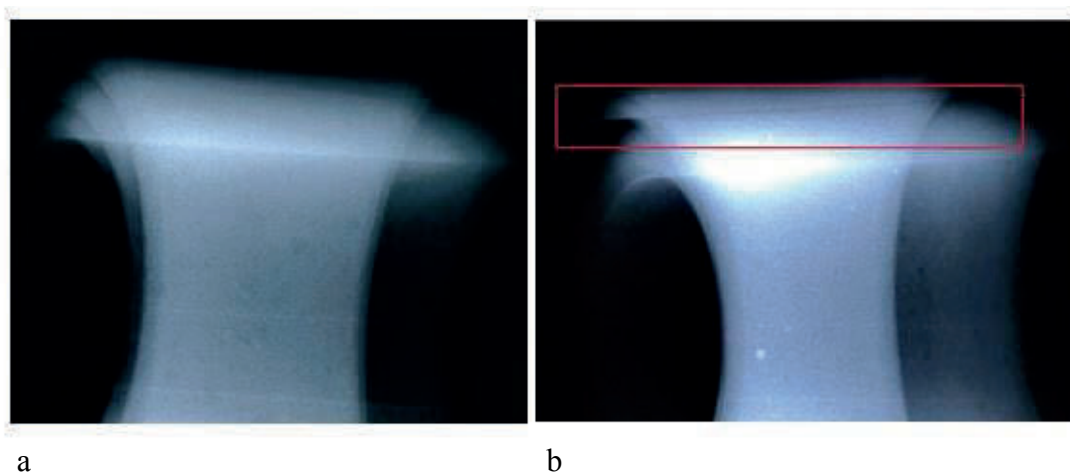
Filmas ļāva atklāt savienojumu defektus abu tipu detaļās. Tika iegūti gan aplveida, gan arī aksiālie spraugu veidi starp ārējo un iekšējo daļu. 3.8. un 3.9. attēlā salīdzinājumā parādīti blīvi (a) un vāji (b) bukšu savienojumi no gala un no sāna. Lai iegūtu skatu no sāniem un labāk apgaismotu spraugas starp buksēm, attēli tika uzņemti aptuveni 30° leņķī.



a

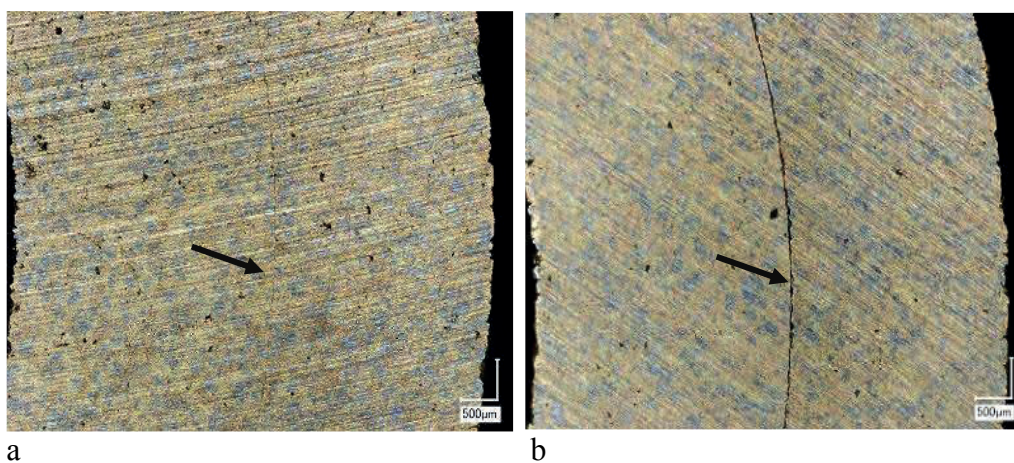
b

3.8. att. Rentgena filmu paraugi ar a) blīvās un b) vājās apspaides attēlu [33].



3.9. att. Rentgena filmu paraugi (skats no sāna) ar a) blīvās un b) vājās apspaides attēlu [33].

Pēc nesagraujošās kontroles bukses tika sagrieztas šķērsām asij, lai mikroskopiski novērotu robežas starp iekšējo un ārējo daļu. Blīvākas un mazāk blīvas apspaides paraugi, kas rada optiski redzamo spraugu atšķirības starp iekšējo un ārējo buksi un variē no nulles līdz vairākiem desmitiem mikronu, ir redzami 3.10. attēlā. Stingras apspaides gadījumā adhēzija starp detaļām notiek savstarpējās mikrokristālu iespiešanās līmenī, nodrošinot mehānisku viengabalainību.



3.10. att. Šuvju fragmentu paraugi ar a) blīvu un b) vāju nopresēšanu starp iekšējo un ārējo buksi; bultas parāda savienojuma robežu [33].

Metožu salīdzinājums

Izmēģinājumos abas nesagraujošās kontroles metodes uzrādīja vienādu jutību, atšķirot detaļas ar blīvo un vājo apspaidi. Atšķirība starp ultraskaņas un rentgenogrāfijas metodēm izriet no to fiziskajiem principiem, kad ultraskaņa atklāja mehānisku plīsumu, kas novērsa elastīgā viļņa izplatīšanos, un rentgena stari uzrādīja tukšumu materiālā starp daļiņām. Kas attiecas uz perspektīvo rūpniecisko izmantojumu, ultraskaņai ir priekšrocības vienkāršākā un nedārgā aprīkojuma dēļ, kā arī ātras darbības un datu interpretācijas ātruma dēļ. Rentgenogrāfijas metodes priekšrocības ir bezkontakta testēšana un vizualizācija.

Novērtējot metālpulvera antifrikcijas bukses savienojuma kvalitāti ar negraujošās kontroles metodi, tā parādīja gan ultraskaņas, gan rentgenogrāfijas metožu jutīgumu, atklājot blīvu un vāju apspaidi. Standarta ultraskaņas kontroles lietošanas sarežģījumus savienojumos bukse-bukse izraisīja augstāks ultraskaņas vājinājums pulverveida bronzas grafiņa savienojumā, salīdzinot ar lieto metālu.

Apspaide ar impulsa magnētisko lauku palīdzību nodrošina blīvu savienojumu, kas vada ultraskaņu bez traucējumiem un neģenerē atbalss reakciju 4 MHz frekvencē. Vāju sakaru apgabali tika atklāti kā agrīni ultraskaņas atbalss signāli, kas nāk no ārējās daļas sienas, un redzamas spraugas rentgena filmās. Abas metodes ir pietiekami perspektīvas, lai tās ieviestu rūpnieciski metālpulveru detaļu apspaides kvalitātes kontroles nodrošināšanai.

4. SEKUNDĀRO OPERĀCIJU PĒTĪJUMI

4.1. Poraino metālpulvera detaļu mehāniskās apstrādes optimālo parametru noteikšana

Daudzām konstrukcijas detaļām, kas izgatavotas no pulveriem, nav nepieciešama mehāniskā apstrāde (MA), taču virknē gadījumu, īpaši pēc formas sarežģītu detaļu izgatavošanā vai ar augstām prasībām izmēru precizitātē, bez mehāniskās apstrādes neiztikt. Visbiežāk saņemtos pulverizstrādājumus pakļauj papildu apstrādei, kalibrējot un sagriežot. Turklāt galējās izmēru precizitātes sasniegšana, neizmantojot MA, ne vienmēr ir tehniski un ekonomiski lietderīga [4].

Sistemātiski apstrādājamības pētījumi, griežot saņemtos pulvera materiālus (SPM), tiek veikti kopš pagājušā gadsimta 60. gadu vidus. Pētījumi atspoguļoti A. Artamonova, I. Armarego, B. Beļkeviča, V. Konoņenko un citu autoru darbos [2], [6], [45].

Poru klātbūtne pulverizstrādājumā apgrūtina tā apstrādi ar griešanu, pazemina instrumentu izturību, neskatoties uz to, ka griešanas spēki porainu izstrādājumu apstrādē parasti ir mazāki nekā tādu pašu apstrādē, tikai bez porām. Raupjums bieži ir labs mehāniskā komponenta ražīguma rādītājs, jo nelīdzenumi uz virsmas var veidot plaisu vai korozijas sākotnējās veidošanās centrus. Palielinoties porainībai, SPM izturības īpašības pazeminās. Sakarā ar to apstrādājamība ar griešanu nedaudz uzlabojas, jo pazeminās griešanas spēks un attiecīgi temperatūra apstrādes laikā. Tomēr atliku porainības dēļ griešanas process SPM norit ar pārtraukumiem, kas paātrina griešanas instrumenta nodilumu [28].

Pirms eksperimentu veikšana mehāniskajā apstrādē tika noteikts īpatnējo griešanas spēku, kontakta slodžu un spriegumu atkarība no griešanas režīma, ka arī griešanas ģeometrijas atkarību raksturs. Izmantojot galīgo elementu metodi (GEM), apskatītas siltuma plūsmas, lauki un temperatūra uz instrumenta kontaktu virsmām un detaļas virsmas slānī. Veikti sprieguma stāvokļa aprēķini virsmas slānī un tā porainība.

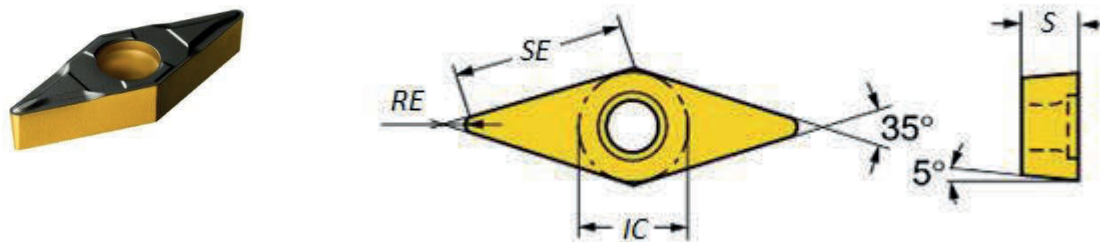
A.V.Skorikova disertācijas darbā [51], SPM virpošanai ar paaugstinātu porainību tiek rekomendēti šādi galvenie griešanas parametri: griešanas ātrums – 150 m/min; padeve – 0,1–0,3 mm; griešanas dziļums 0,1–3,0 mm. Turklāt tiek rekomendēts griežņa priekšējo leņķi izvēlēties 25–28° robežās, aizmugurējo – 5–20°.

Tika veikti pētījumi par mazlēģētu metālpulvera bukšu mehānisko apstrādi ar mērķi noteikt optimālus apstrādes parametrus un novērtēt apstrādātās virsmas kvalitāti.

Kā izmēģinājuma detaļa tika izmantota vagona sviras bremžu sistēmas antifrikcijas slīdbukse, kas izgatavota no materiāla uz Fe-C-Cu bāzes. Bukse tika izgatavota no pulvermateriāla, kas satur Ni un Mo mazāk par 0,3 % un ir ar zemu fosfora saturu [20].

Griezējinstrumenti

Izvēlētā griešanas plāksne paredzēta detaļu griešanai no materiālu grupām *ISO P* (tērauds) un *ISO M* (nerūsējošais tērauds). Griešanas plāksnes kods *ISO: VBMT 11 03 04-PF* (4.1. att.). Metālpulvera buksi var aplūkot kā *M* grupas materiālu, un tāpēc konkrētā griešanas plāksne tika atzīta par piemērotu apstrādes operācijām.



4.1. att. Griešanas plāksne, kur RE – virsotnes rādiuss 0,3969 mm; LE – griezējšķautnes garums 11,0709 mm; IC – ievilkta apļa diametrs 6,35 mm; S – plāksnes biezums 3,175 mm, izmantota *Sandvik Coromant®* griešanas plāksne [21].

Virsmas raupjuma parametri

Detaļu formas veidošanas procesā uz to virsmas parādās raupjums – virkne salīdzinoši maza izmēra mainīgu izvirzījumu un iedobumu.

Pirmie pētījumi par virsmas raupjuma prognozēšanu tika veikti tikai uz ģeometrisko korelāciju pamata – griešanas plāksnes ģeometrijas un tās pārvietošanas gar sagatavi. Uz ģeometrisko korelāciju pamata maksimālais virsmas profila raupjums $Ra_{\max}$ var tikt noteikts, izmantojot šādu vienādojumu [21]:

$$Ra_{\max} = \frac{f^2}{8RE}, \quad (4.1.)$$

kur f – padeve, mm/apgriez.; RE – virsotnes rādiuss.

4.1. vienādojumu var izmantot tikai tad, ja griešanas dziļums mazāks nekā uzgaļa RE rādiuss. Ja uzgaļa RE rādiuss tiek ignorēts un griezējšķautnes leņķi ņemti vērā, tad virsmas $Ra_{\max}$ profila maksimālais raupjums tiek izteikts, izmantojot šādu vienādojumu [12]:

$$Ra_{\max} = \frac{f}{4(\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi_1)}, \quad (4.2.)$$

kur φ – galvenais griezējšķautnes leņķis; φ_1 – mazais griezējšķautnes leņķis.

Šo vienādojumu var izmantot, ja griešanas dziļums ir lielāks nekā griešanas plāksnes RE rādiuss un tiek izmantotas lielas padeves. Tika nolemts izmantot virsmas raupjuma trīsdimensiju parametrus kā primāros parametrus, divdimensiju parametrus vai profila raupjuma parametrus – kā sekundāros parametrus.

Trīsdimensiju virsmas raupjuma parametri noteikti standartā *ISO 25178*. Standarts definē daudzus parametrus, taču visplašāk izmantojamais parametrs ir vidējais aritmētiskais virsmas augstums Sa (μm), ko nosaka ar šādu vienādojumu [21]:

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A Z(x,y) dx dy, \quad (4.3.)$$

kur A – mērījuma šķērsriezuma laukums; $Z(x,y)$ – funkcija, kas attēlo virsmas augstumu attiecībā pret montāžas plakni vai cilindru.

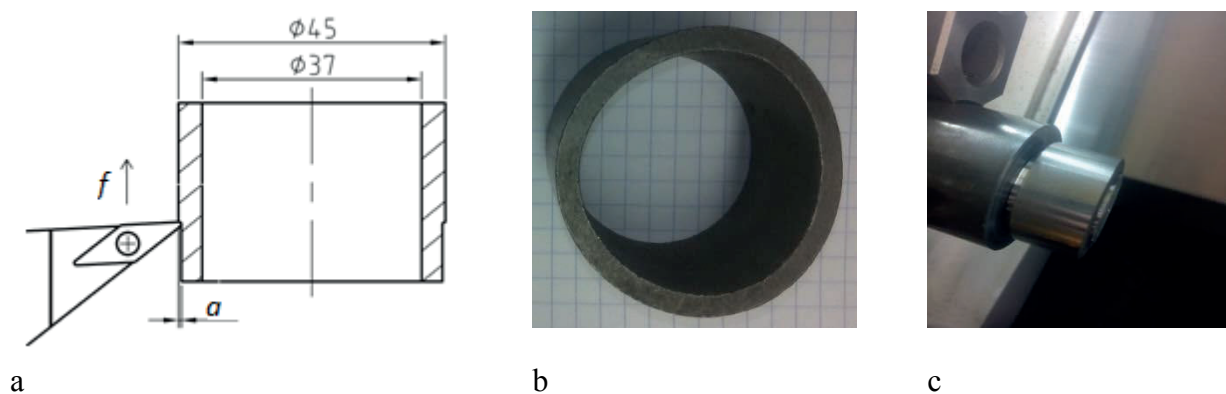
Griešanas parametri

Sekojoot griešanas plāksņu ražotāja rekomendācijām, tika izvēlēti šādi gludapstrādes operācijas dati: griešanas dziļums $a = 0,5$ mm; padeve $f = 0,08$ mm/apgriez. un $0,1$ mm/apgriez.; griešanas ātrums $v = 130$ m/min un 150 m/min. Griešanas un padeves dziļums tika izvēlēts piedāvātā diapazona robežās, izņemot griešanas ātrumu. Griešanas ātrums tika izvēlēts ārpus piedāvātā diapazona robežām, jo griešana tiks izpildīta sausajā režīmā, neizmantojot dzesēšanas šķidrumu.

Griešanas dziļums saglabājās pastāvīgs, jo tas nenodrošina tāds pat adaptīvos raksturlielumus kā griešanas ātrums un padeve. Pēc eksperimenta rezultātiem var tikt izstrādāts prognozēšanas matemātiskais modelis. Nākamais modelis var tikt konfigurēts, lai nodrošinātu adaptīvo padeves un griešanas ātruma regulēšanu apstrādes laikā, kas nodrošina nepieciešamos virsmas raupjuma regulējumus. Sarežģītāk sasniegt adaptīvos raksturlielumus atkarībā no griešanas dziļuma. Griešanas dziļums cieši saistīts ar instrumenta trajektoriju, kas ierobežo adaptīvās izmaiņas apstrādes procesā.

Virpošanas apstrāde tika veikta ar virpu *Okuma L200 E-M*. Bukses virpošanas shēma redzama 4.2. a attēlā.

Pārbaudāmā metālpulvera buksē ir detaļa ar plānām sienām un mehāniskās apstrādes laikā pakļauta deformācijām (4.2. b att.), tāpēc tika izgatavota speciāla palīgierīce (4.2. c att.), kas izslēdza deformāciju detaļas virpošanas apstrādes laikā.



4.2. att. a) bukses apstrādes shēma; b) augstā spiediena dēļ no ietveres puses deformētā buksē; c) bukses uzstādīšana virpā, izmantojot speciālo palīgierīci [21].

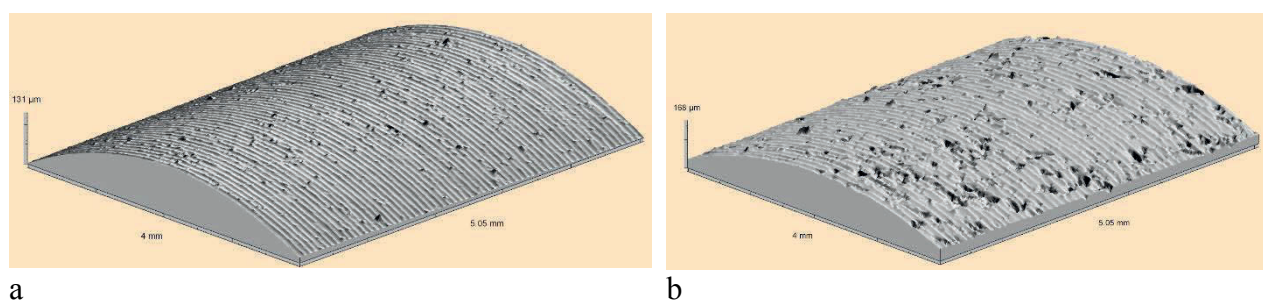
No teorijas [2] zināms, ka no griešanas režīmiem visbūtiskākā ietekme uz virsmas raupjuma veidošanās procesu ir padevei un griešanas ātrumam.

Pēc izpētes rezultātiem (4.1. tab.) var izdarīt secinājumu, ka vislabākais virsmas raupjums var tikt sasniegts, padevei ir $0,08$ mm/apgriez. un griešanas ātrumam 130 m/min. Praktiski to pašu rezultātu var sasniegt, palielinot griešanas ātrumu par 20 m/min, kas tad būs 150 m/min. Cita aina rādīsies, ja izmainīs padevi. Kad padeve f tika izmainīta, to palielinot no $0,08$ mm/apgriez. līdz $0,1$ mm/apgriez., virsmas raupjums palielinājās gandrīz divkārtīgi. Var secināt, ka padeves izmaiņas vienā apgriezienā f (mm/apgriez.) ietekmē pulvera detaļu virsmas raupjuma izmaiņas daudz vairāk nekā griešanas ātrums v .

Griešanas optimālo parametru izvēle pēc virsmas raupjuma mērījumiem [21]

Eksperimenta Nr.	Vidējais profila raupjums Ra , μm	Vidējais virsmas raupjums Sa , μm	Vidējais kvadrāta virsmas raupjums Sq , μm	Griešanas dziļums a , mm	Padeve f , mm/apriez.	Griešanas ātrums v , m/min
1.	0,74	1,62	2,73	0,5	0,1	130
2.	0,30	0,41	0,54	0,5	0,08	130
3.	0,57	0,74	0,91	0,5	0,1	150
4.	0,32	0,44	0,68	0,5	0,08	150

Pēc griešanas eksperimentu rezultātiem tika atzīmētas vairākas iezīmes. Virsmas raupjuma trīsdimensiju parametri uzrādīja krasu virsmas raupjuma palielināšanos. Tomēr divdimensiju profila raupjuma parametrs neuzrādīja straujo palielinājumu. Paraugi tika analizēti tālāk, un pēc trīsdimensiju virsmas raupjuma grafiska attēlojuma tika konstatēts, ka 1. eksperimenta paraugam ir daudz vairāk virsmas defektu nekā citiem paraugiem (4.3. b att.).



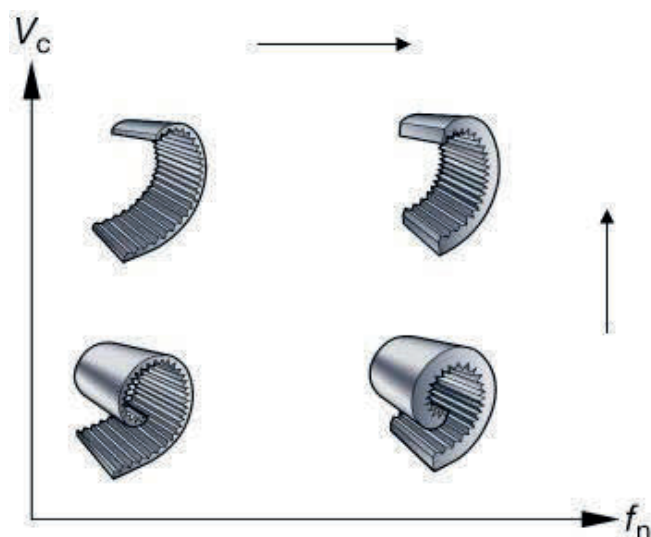
4.3. att. Trīsdimensiju virsmas raupjuma grafiskais attēlojums a) 2. eksperimentam un b) 1. eksperimentam [21].

Šī neatbilstība saistīta ar to, ka divdimensiju profila raupjuma mērīšana (Ra parametra noteikšana) tiek veikta tikai vienā rindā un raksturo tikai šo līniju. Tādējādi, ja defekti neatrodas uz izmēramās līnijas, tad tie tiek ignorēti, sniedzot nepatiesu informāciju par virsmu.

Savukārt trīsdimensiju virsmas raupjuma parametri sevī ietver detalizētāku informāciju par virsmu. Šajā gadījumā tika ņemti vērā arī defekti un uzrādīti reālie virsmas raupjuma raksturlielumi. Attiecīgi – konkrētais eksperiments norāda uz trīsdimensiju virsmas raupjuma mērījumu nepieciešamību divdimensiju mērījumu vietā. Tāpēc nozarēs, kur kvalitāte nosaka ražīgumu, jāizmanto trīsdimensiju virsmas raupjuma parametri.

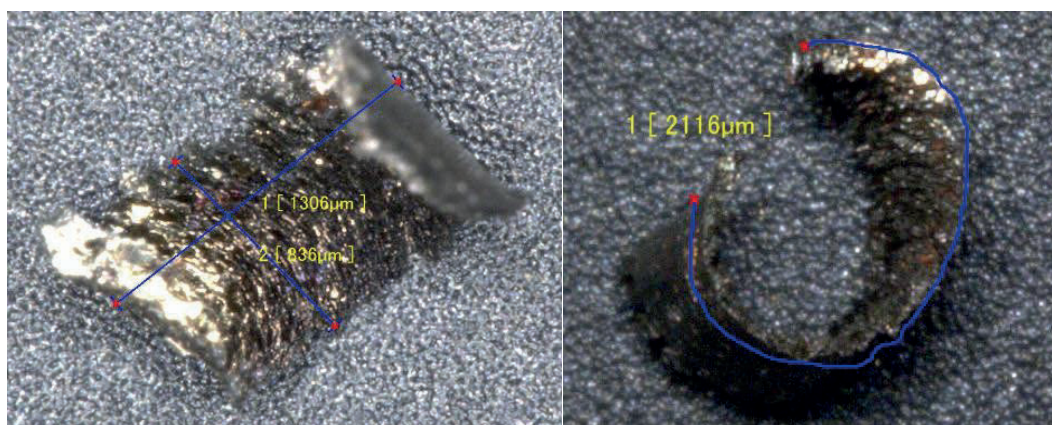
Skaidas forma, ko ir ērti noņemt no tehnoloģiskā aprīkojuma darba zonas, pašlaik ir svarīgs griešanas procesa raksturlielums. Skaidas forma un izmērs parasti ir atkarīgs no apstrādājamā materiāla īpašībām, kā arī no detaļas griešanās ātruma un griežņa padeves dziļuma (4.4. att.).

Rezultātā tika izpētīta skaidas morfoloģija pulvera detaļu apstrādes laikā.



4.4. att. Skaidas morfoloģijas atkarība no ātruma un padeves dziļuma [65].

Iegūtā skaida klasificēta kā diskrēta vai segmenta skaida. Šo skaidu ērti savākt, apstrādāt un izmantot. Ģeometriskie izmēri parādīti 4.6. attēlā. Pēc skaidas izpētes un mērījumiem var izdarīt secinājumu, ka konkrētā pulverdetaļu apstrādes procesa skaidas forma nerada papildu sarežģījumus apstrādei.



4.6. att. Skaidas morfoloģija, kur parādīts 836 µm platais skaidas segments, paredzamais garums 1306 µm un kopējais garums 2116 µm [21].

Pētījumi tika veikti ar mērķi izpētīt griešanas parametru ietekmi uz virsmas raupjuma parametriem, īpaši uz trīsdimensiju virsmas raupjuma parametriem, apstrādājot pulverdetaļas.

Pēc pētījumu rezultātiem no uzdotā griešanas parametru diapazona vislabākais virsmas raupjums ($Sa = 0,41 \mu m$) tika sasniegts, izmantojot šādus režīmus: griešanas dziļums $a = 0,5 \text{ mm}$, padeve $e = 0,08 \text{ mm/apgriez.}$ un griešanas ātrums $v = 130 \text{ m/min}$ [21].

Virsmas raupjuma mērījumi ir pierādījuši, ka trīsdimensiju virsmas raupjuma parametri precīzāk raksturo izmērīto virsmu nekā divdimensiju profila raupjuma parametri, sniedzot ticamākus datus par virsmu. Trīsdimensiju virsmas raupjuma mērījumus pulvera detaļu virsmu novērtēšanai pēc apstrādes ar griešanu var rekomendēt kā galveno mērīšanas metodi.

Skaidas morfoloģija nenorāda ne uz kādām papildu problēmām tehnoloģiskā aprīkojuma izņemšanai no darba zonas, un tā tika atzīta par apmierinošu visā griešanas režīmu diapazonā.

4.2. Metālpulvera detaļu antifrikcijas īpašību paaugstināšana

4.2.1. Poraino pulvera detaļu piesūcināšana

Interesi par iespējām samazināt berzes koeficientu un antifrikcijas pulvera bukšu nodilumu veicina globālā tendence un tieksme pēc ekoloģiskās un ekonomiskās optimizācijas, izstrādājot antifrikcijas materiālus.

Berzei, nodilumam un eļļošanai ir būtiska ekonomiska nozīme, jo šie faktori nosaka mašīnu un aprīkojuma kalpošanas laiku [30].

Lai nodrošinātu līdzīgu berzes mezglu un mehānismu eļļošanu, tiek izmantoti cietie eļļošanas materiāli, ko var iedalīt divās grupās.

1. Neorganiskās vielas:

- slāņaini (ugunsizturīgi metāla (molibdēna, volframa, niobija grafijs, fluorēts grafijs, bora nitrīds, talks, vizla u. c.) dihalogenīdi;
- neslāņaini (hlorīdi, fluorīdi, metālu jodīdi, metālu oksīdi, mīkstie metāli Pb, Sn, Cd, Jn, Ga, Ag, Al u. c.).

2. Organiskie polimēru materiāli:

- fluora polimēri, poliamīdi, polietilēns un citi) [23], [37].

Praktiskam lietojumam visbiežāk tiek izmantota materiāla apstrāde dispersā vidē (eļļas suspensijas), ilgstoši iegremdējot. Tas nodrošina raupjuma mazināšanos, šķidro eļļošanas materiālu triboloģisko īpašību stabilitātes paaugstināšanos.

4.2.2. Dispersā vide un dispersie komponenti

Naftas smēreļļu izturēšanās ekspluatācijā galvenokārt atkarīga no to ķīmiskā sastāva un darba apstākļiem (temperatūra, spiediens, gaisa skābekļa darbība u. c.).

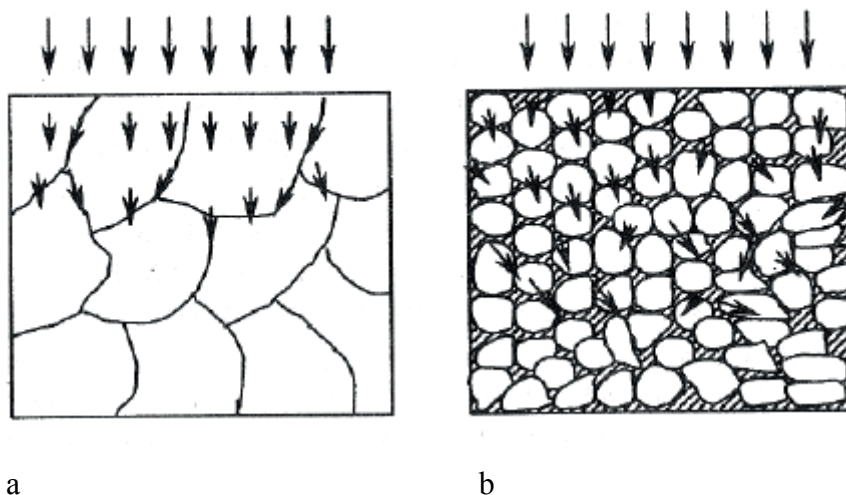
I. Korogodskis, apskatot nodiluma dispersās daļiņas (piestrādes laikā), nosacīti iedalīja tās divās grupās:

1. grupa – liela izmēra cietās daļiņas (virs 5μ), kas jāaizvāc no smēreļļas;
2. grupa – sasmalcinājušās mīkstas daļiņas un sīkas daļiņas, kam eļļā jā saglabājas, jo tām ir pozitīvs efekts.

Otrās grupas disperso daļiņu ietekmes pakāpe uz berzes pāru piestrādes un nodiluma intensitāti ir atkarīga no to koncentrācijas eļļā. Pēc I. Korogodska datiem, optimāla ir 2,5 % koncentrācija [38].

Visplašāko izplatību ieguvuši naftas smēreļļās ievadāmie dispersie komponenti no grafiņa un molibdēna disulfīda daļiņām. Grafiņam ir ļoti augsta ķīmiskā stabilitāte, un tas ir praktiski inerts pret radioaktīvo starojumu [7], [13].

Porainības esamība pulvera detaļās veicina difūzijas intensifikāciju; lietajos materiālos ievadāmais elements izkliedējas dziļumā pa graudiem un starpgraudu robežām, savukārt porainajos pulvera materiālos difūzija norit pa visu daļiņu virsmu, kā shematiski parādīts 4.7. attēlā [42].



4.7. att. Piesātinājuma shēma: a) bez porām; b) porains pulvera materiāls.

Naftas eļļas un dispersijas komponentu izvēle

Eksperimentālajiem pētījumiem kā dispersijas vide izvēlēta eļļa *MS-20*. Stabilitāti pret *MS-20* eļļas oksidēšanu uzglabāšanas laikā uztur ievērojams daudzums dabisko inhibitoru, ko nevar deaktivizēt ar nelielu eļļā izšķīdināta skābekļa daudzumu. Šī īpašība veicina dažādas ievirzes eksperimentālo pētījumu tīrības paaugstināšanos.

Smērēlļās parādoties sīkām dispersām daļiņām (turpmāk tiek izmantots jēdziens dispersā fāze), notiek dispersu sistēmu veidošanās, kuru viskozitāte atšķiras no dispersas vides (eļļas) viskozitātes.

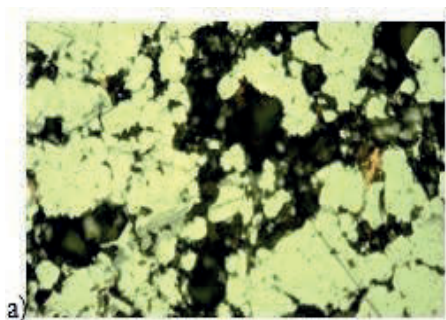
Neorganiskie slāņainie cietie smērvielu materiāli (MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 u. c.) saglabā ekspluatācijas īpašības plašā temperatūru diapazonā no $-100\text{ }^\circ\text{C}$ līdz $+1000\text{ }^\circ\text{C}$, kas spēj izturēt galēji augstu kontaktu spiedienu, kas ir salīdzināms ar augstas stiprības tēraudu plūstamības robežu, ir stabili vakuumā, agresīvās un inertās vidēs. Dihalkogenīdu adhēzija pret metālu virsmu ir tik liela, ka pietiek ar nelielu kontaktu spiedienu ($0,4\text{--}0,5\text{ MPa}$) ar relatīvo nobīdi, lai smērvielas daļiņas savienotos ar virsmu, veidojot kopēju plēvi [39].

4.2.3. Berzes koeficienta samazināšanas pētījumi

Berzes koeficienta samazināšanai tika veikti pētījumi saķepinātu porainu metālpulvera detaļu (slīdbukses) piesātināšanai ar nanodaļiņām. Pētījumi tika veikti uz buksēm, ko izmanto vagona bremžu sviru sistēmā un kas izgatavoti no pulveru maisījuma $\text{AHC100.29} + 2,27\% \text{ Cu} + 0,22\% \text{ Ni} + \text{C}$ [20].

Kā dispersa vide tika izmantota eļļa *MS-20*, kā dispersas piedevas – volframa dihalkogenīdu pulveri – disulfīda WS_2 un diselenīda WSe_2 .

Bukšu mikrostruktūra un ārējais izskats redzami 4.8. attēlā.



a

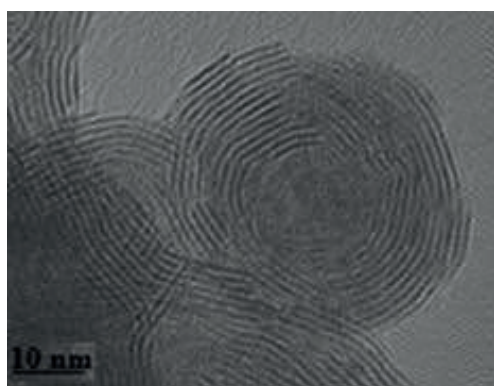


b

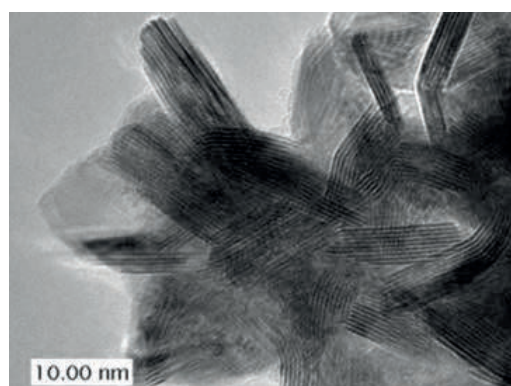
4.8. att. a) buksu mikrostrukturā un b) ārējais izskats [32].

Pētījuma gaitā bukses tika piesūcinātas ar eļļu *MS-20*, kā arī ar to pašu eļļu ar 4 % volframa disulfīda nanodaļiņu piedevām – WS_2 un 4 % volframa diselenīda piedevām – WSe_2 .

Volframa disulfīda nanodaļiņām ir sfēriska forma ar diametru 30–50 nm (4.9. a att.), savukārt volframa diselenīda daļiņām ir plakana forma ar vidējiem izmēriem 5 nm × 70 nm (4.19. b att.) [34], [35].



a



b

4.9. att. TEM mikrogrāfija ar a) WS_2 un b) WSe_2 nanodaļiņām [32].

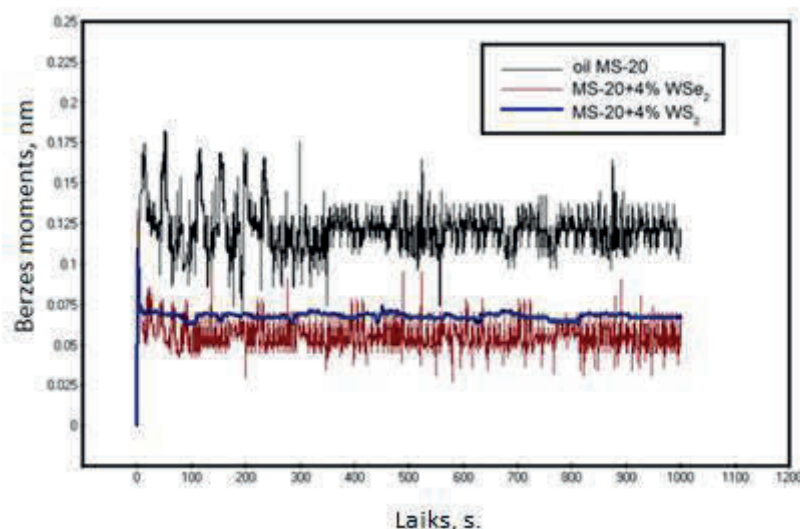
Ar eļļu *MS-20*, *MS-20* + 4 % WS_2 , *MS-20* + 4 % WSe_2 piesūcināto paraugu triboloģiskā testēšana tika veikta berzes apstākļos pārī ar gultņu tēraudu pie slodzes 210 N un griešanās ātruma 200 apgriez./min.

Izmēģinājumi tika veikti, izmantojot frikciju mašīnu *PBD-40*. Papildu pārbaudes paplašinātā temperatūras diapazonā tika veiktas izmantojot iekārtu materiālu triboloģisko īpašību novērtēšanai (LV Patents Nr. 15225) [27], [49].

Paraugi tika pakļauti kontaktam ar normālu slodzi 210 N. Turpinājumā tika sākts darbvārpstas griešanās process ar cilindrisko paraugu, rotācijas frekvence 200 apgriez./min. Viena testa laiks – 1000 s.

Rotācijas berzes momenta atkarība no laika, ar eļļu *MS-20* piesūcinātām buksēm, kā arī eļļošanas kompozīcijām redzama 4.10. attēlā. Visos gadījumos deformācija rodas otrajā eksperimenta sekundē, berzes moments vienāds ar 0,12–0,1 nm visām eļļošanas kompozīcijām. Berzes momentu un laika intervālu identiskums līdz deformācijai var būt

saistīts ar berzes sākotnējo nosacījumu identiskumu, kas izteikti, galvenokārt, poru pārsegumā ar noteikta biezuma oksīdu plēvē.



4.10. att. Berzes momenta atkarība no laika, izmēģinot ar eļļu *MS-20* un eļļošanas kompozīcijām, ar 4 % WSe_2 un 4 % WS_2 piesūcinātus paraugus [32].

Grafiks 4.10. attēlā parāda, ka berzes momenta atkarībai no laika, buksēm kas piesūcinātas ar eļļu *MS-20* un eļļošanas kompozīciju ar WSe_2 , ir “lēcieņi” berzes momentā, kas var būt saistīti ar kontaktu un oksīda plēvju sairšanu. Vēlāk pēc smērēlļas izspiešanas no porām griezes momenta svārstības samazinās.

Vidēji berzes moments bija vienāds ar $\approx 0,056 \text{ N}\cdot\text{m}$ un $\approx 0,067 \text{ N}\cdot\text{m}$ eļļām, kas modificētas attiecīgi ar volframa disulfīda un diselenīda nanodaļiņām [32].

Visstabilāko berzes momentu uzrādīja bukses, kas piesūcinātas ar eļļošanas kompozīciju *MS-20* + 4 % WS_2 . Var atzīmēt, ka eļļošanas kompozīcijai, kas satur sfēriskas volframa disulfīda (WS_2) nanodaļiņas, berzes sākuma momentā raksturīgie ar oksīda plēves sairšanu saistītie “lēcieņi” neparādās. Tas var būt saistīts, no vienas puses, ar nelielu oksīda plēves biezumu, no otras – sakarā ar eļļošanas kompozīcijas izplatīšanos, kas izstumta lokālā iecirknī pa oksīda plēves virsmu, kas vēl nebija sairusi un nonāk kontaktā. Šajā gadījumā ievadāmo daļiņu sfēriskā forma var veicināt stabilākus antifrikcijas rādītājus.

SECINĀJUMI

Balstoties uz promocijas darbā veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem un iegūtajiem rezultātiem, autors ir sniedzis detalizētu tehnoloģiskā procesa, kā arī saspiešanas parametru un eksperimentālo paraugu izgatavošanai nepieciešamo pulverdetaļu saķepināšanas aprakstu. Balstoties uz pētījumiem ar eksperimentālajām detaļām, parādītas mazlēģētā pulvera uz dzelzs bāzes (Fe-C-Cu ar leģējošo elementu saturu 0,22 % Ni, 0,28 % Mo) priekšrocības vagona bremžu sviru sistēmas bukšu ražošanai.

Pēc nesagraujošās kontroles pētījumu rezultātiem tika noteiktas saķepināto poraino pulvera materiālu testēšanas īpatnības. Pārbaudot metālpulvera detaļu kvalitāti ar ultraskaņu, testēšanas rezultāti pierādīja šīs metodes spēju atklāt pulvera detaļu plaisas un nevienlaidības. Radiogrāfijas izpēte kopā ar ultraskaņas metodi precīzi nosaka bukšu savienojuma kvalitāti.

Darbā noteiktas statistiski dinamiskās hibrīda pulverdetaļu presēšanas metodes lietošanas perspektīvas, izmantojot elektromagnētisko lauku.

Saskaņā ar porainu pulverdetaļu griešanas eksperimentu rezultātiem tika noteikti optimālie režīmi, kas nodrošina vienmērīgu apstrādājamas detaļas virsmas raupjumu. Tika secināts, ka padeves ātruma izmaiņas iespaido pulverdetaļu virsmas raupjuma izmaiņas daudz vairāk nekā griešanas ātrums.

Pēc pētījumu rezultātiem uz eksperimentālajām buksēm, kas piesūcinātas ar eļļošanas kompozīciju $MS-20 + 4\% WSe_2$ un $MS-20 + 4\% WS_2$, vidējais berzes moments samazinās attiecīgi par $\approx 53\%$ un $\approx 44\%$, salīdzinot ar buksēm, kas piesūcinātas ar eļļu $MS-20$ bez ievadāmām daļiņām.

Pētījumi parādīja, ka volframa disulfīda daļiņu sfēriskā forma veicina noturīgākus antifrikcijas rādītājus un nodrošina stabilāku frikciju mezgla darbu, praktiski apejot berzes pāra piestrādes stadiju, kas nav mazsvarīgs faktors, izmantojot konkrēto tehnoloģiju ritošā sastāva bremžu sviru sistēmas antifrikcijas buksēs.

Tika atrisināti promocijas darba uzdevumi:

- 1) izpētīta metālpulvera detaļu ražošanas tehnoloģija, presēšanas un saķepināšanas tehnoloģiskie parametri, pulvera īpašības un leģējošo elementu ietekme uz izgatavojamo detaļu izturību un drošību;
- 2) noteikti kritēriji metālpulvera materiālu izmantošanai dzelzceļa transportā;
- 3) veikti pētījumi ar eksperimentālām detaļām, kas pierāda mazlēģētā pulveru maisījuma uz Fe-C-Cu bāzes ar zemu leģējošo elementu saturu piemērotību izmantošanai ritošā sastāva bremžu sviru pārvada antifrikcijas slīdbukšu ražošanā;
- 4) parādītas metālpulvera detaļu hibrīdās presēšanas metodes perspektīvas, noteikti presēšanas parametri, izmantojot elektromagnētisko lauku;
- 5) noteiktas īpatnības un nesagraujošās kontroles – ultraskaņas un radiogrāfijas paņēmieni – piemērotība izmantošanai poraino metālpulvera detaļu kvalitātes kontrolei;

- 6) veikti poraino metālpulvera slīdbukses mehāniskās apstrādes pētījumi un izstrādāta šo detaļu mehāniskās apstrādes metodoloģija, balstoties uz apstrādātās detaļas raupjuma pakāpēm;
- 7) balstoties uz promocijas darbā veiktajiem eksperimentiem, piedāvāta metode antifrikcijas metālpulvera detaļu piesūcināšanai ar eļļas emulsiju saturošām WS_2 , WSe_2 nanodaļiņām, berzes koeficienta samazināšanai un tribotehnisko īpašību paaugstināšanai.

KOPSAVILKUMA LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Ahlström, M., Thyssen, J., Menne, T., Johansen, J. Prevalence of nickel allergy in Europe following the EU Nickel Directive – a review. 2017, *Contact Dermatitis*. vol. 77, pp. 193–200. Available from: doi: 10.1111/cod.12846.
2. Armarego, E. J. A., Shi, G., Verezub, S. Modeling the Basic Cutting Action and Machining Performance of Sintered Metallic Materials. *Machining Science and Technology*, 2001. vol. 5 no. 3, pp. 353–373. Available from: doi: <https://doi.org/10.1081/MST-100108620>.
3. Beiss, P. Principles of Metal Powder Compaction. In: *European Powder Metallurgy Association Training Course*, Germany, Aachen, Sept, 2005, pp. 109–134.
4. Blais, C. Machining of PM Materials: A Secondary Shaping Operation Of Primary concern. 2008, *International Journal of Powder Metallurgy*. vol. 44, no. 2. pp. 13–14.
5. Chasoglou, D., *Surface Chemical Characteristics of Chromium-alloyed Steel Powder and the Role of Process Parameters during Sintering*. PhD Thesis. Chalmers University of Technology: 2012. 90 p.
6. Christopher P. Adams, Carl Blais and Deepak S. Madan. *Machining & Machinability of PM Components*, Report by Metal Powder Industries Federation. Metal Powder Industries Federation: 2006.
7. Dresel, W., Mang T. (ed.). *Lubricants and Lubrication, vol. 2. 3rd Edition*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. 1262 p. ISBN 978-3-527-32670-9.
8. European Powder Metallurgy Association (EPMA). *Introduction to Powder Metallurgy The Process and its Products*. 2008, Shrewsbury, U. K.
9. German, R. M. *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing*. Princeton NJ USA: Metal Powder Industries Federation, 2005. 522p. ISBN 0-9762057-1-8.
10. Glass, S. J. and Ewsuk, K. G. (1997) Compaction science and technology. *MRS Bull.*, 22 (12), 24–28.
11. Karas, L., Flodin, A. Wear Investigation of Porous Material Impregnated with Oil and Nanoparticles. in: *Euro PM2017 Proceedings: New Frontiers in PM Steels*. Milan: EPMA, 2017.
12. Kirby, E. D., Zhang, Z., Chen, J. C. Development of an accelerometer-based surface roughness prediction system in turning operations using multiple regression techniques, in: *Journal of Industrial Technology*, 2004, vol. 20, no. 4, pp. 1–8.
13. Klamann D. *Lubricant and related products*, Weinheim: Wiley-VCH, 1984. 489. p. ISBN 978-3527260225.
14. Lapkovskis, V., Mironovs, V., Zemčenkova, V., Boiko, I. Processing of Powder Materials by Pulse Electromagnetic Field. In: *Proceedings of 11th World Powder Metallurgy Congress (PM2010)*, Italy, Florence, 10–14 October, 2010. Shrewsbury: European Powder Metallurgy Association, 2010, pp. 519–524. ISBN 9781899072101.
15. Lewandowski, J., Seifi, M., Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annual Review of Materials Research*. 2016, vol. 46. pp. 151–186. Available from: doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024.

16. Mironovs, V., Gluschenkov, V., Belyaeva, I., Tatarinovs, A. Combined Methods of Pulsed Magnetic Compaction of Metal Powders. In: *World PM 2016 Congress and Exhibition Guide*, Germany, Hamburg, 9–13 October, 2016. Hamburg: 2016, pp. 56–56.
17. Mironovs, V., Korjamins, A., Tatarinovs, A., Barone, E., Gluschenkov, V. Combined Static-Dynamic Compaction of Metal Powder and Ceramic Materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 251: *3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017)*, pp. 1–7. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Available from: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012020.
18. Mironovs, V., Stankevich, P., Beljaeva, I., Glushenkov, V. Static-Dynamic Powder Material Compaction Methods. In: *15th International Scientific Conference, Engineering for Rural Development. Latvia, Jelgava, 25–27 May, 2016*. vol. 15, Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2016, pp. 1128–1132. ISSN 1691-5976.
19. Mironovs, V., Stankevich, P., Eiduks, J. Tendencies in the Field of Application of Metal-Powder Materials for Repair and Maintenance of Railway Equipment. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 149, pp. 344–348. ISSN 1877-0509. Available from: doi:10.1016/j.procs.2019.01.146.
20. Mironovs, V., Stankevich, P., Tatarinov, A., Zemchenkov, V., et al. Mechanical and Acoustical Properties of Bushings Made of Low-Alloyed Materials and Used in Brake Systems of Transport Vehicles. *Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 96, no. 1, pp. 1–9. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Available from: doi:10.1088/1757-899X/96/1/012016.
21. Mironovs, V., Stankevics, P., Kromanis, A., Lungevics, J. Influence of Machining Parameters on 3D Surface Roughness of Powder Bushings. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 721, pp. 378–382. ISSN 1013-9826. e-ISSN 1662-9795. Available from: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.721.378.
22. Morl, L., Heinrich, S., Peglow, M. Fluidized bed spray granulation. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 11, pp. 21–188. Available from: doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)80037-6](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)80037-6).
23. Muson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., Rothmayer, A. P. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 747 p. ISBN 978-1-118-11613-5.
24. Oberacker, R.: Powder compaction by dry pressing. In: Riedel, R., Chen, I.-W. (eds.). *Ceramics Science and Technology*, 2011. vol. 3, pp.1–37. ISBN: 978-3-527-31157-6.
25. PM Industry Roadmap Technology Update for the Powder Metallurgy Industry. *Metal Powder Industries Federation*, 105 College Road East, Princeton, New Jersey. ISBN 08540-6692, 2017. 24 p.
26. Rahaman, M. N. (2003) *Ceramic Processing and Sintering*, 2nd edn, Marcel Dekker, New York, Basel.
27. Rīgas Tehniskā Universitāte. *Iekārta materiālu triboloģisko īpašību novērtēšanai*. Viktors Mironovs, Pāvels Stankēvičs, Jānis Rudzītis, Int. Cl.:G01N3/56. Iesniegšanas datējums 2016-12-29. Patenti un Preču Zīmes. LV15225. 2017.12.20.

28. Robert-Perron. E., Blais. C. Green Machining: Parametrs, Applications, And Sintered Properies. 2008, *International Journal of Powder Metallurgy*. vol. 44, no. 2. pp. 41–53.
29. Schatt, W., Wieters, K. P., Kieback, B. *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. 2nd ed. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2007. 552 p. ISBN 978-3-540-23652-8.
30. Shi, Z., Jian, P., Xue, P., Chen, D. 2012 The Friction and Wear Characteristic of Iron-based Powder metallurgy materials in Scroll Compressor In Pros. of 21st Int. Compressor Engineering Conference at Purdue. West Lafayette, Indiana, USA, pp. 6–12.
31. Slotwinski, J., Cooke, A., Moylan, S. Mechanical Properties Testing for Metal Parts Made via Additive Manufacturing: A Review of the State of the Art of Mechanical Property Testing. 2015, NISTIR 7847.
32. Stankevich, P., Mironovs, V., Vasilyeva, E., Breki, A., Tolochko, O. The Possibility of Modifying the Elements of the Bearing Assembly with Nanoparticles in Order to Reduce the Friction Coefficient. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 251, pp. 1–5. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Available from: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012084.
33. Tatarinovs, A., Mironovs, V., Rybak, D., Stankevich, P. Non-Destructive Testing of Joints of Antifriction Parts Crimped by Pulsed Magnetic Deformation. *Solid State Phenomena*. 2017, vol. 267, pp. 248–252. ISSN 1662-9779. Available from: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.267.248.
34. Vasilyeva, E., Nasibulin, A., Maximov, M., A., Tolochko, O., et al. Synthesis of Tungsten Diselenide Nanoparticles by Chemical Vapor Condensation Method. *Materials Science* 2015, vol. 21, no. 3, pp. 339–342. Available from: doi: 10.5755/j01.ms.21.3.7356.
35. Vasilyeva, E., Nasibulin, A., Tolochko, O., Rudskoy, A., et al. Application of WSe₂ Nanoparticles Synthesized by Chemical Vapor Condensation Method for Li-Ion Battery Anodes. *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 2015, vol. 229, no. 9, pp. 1429–1437. Available from: doi: 10.1515/zpch-2015-0573.
36. Анциферов В. Н., Акименко В. Б., Гревнов Л.М. Порошковые легированные стали. – М.: Металлургия, 1991. – 318 с.
37. Бирюков В. П. *Смазочные материалы, топлива и технические жидкости*. М.: МИИТ. 2008. 183 с. ISBN 978-5-7876-0023-0.
38. Бреки А. Д., Васильева Е. С., Толочко О. В., Стариков Н. Е. *Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама*. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 276 с. ISBN: 978-5-7679-3203-0.
39. Бреки А. Д., Кудрявцев В. В., Диденко А. Л., Васильева Е. С., и др. *Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама для узлов трения машин*. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 128 с. ISBN 978-5-7679-3113-2.
40. Галай, Э. И., Галай, Е. Э. *Тормозные системы железнодорожного транспорта. Конструкция тормозного оборудования*. Гомель: БелГУТ, М-вообразования Респ. Беларусь, Белорус. гос.ун-трансп. 2010. 315с. ISBN978-985-468-687-5.
41. Гегузин, Я. Е. *Физика спекания*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука., 1984. 312 с.

42. Гиршов, В. Л., Котов, С. А., Цеменко, В.Н. *Современные технологии в порошковой металлургии*. Санкт-Петербург.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. 385 с.
43. Гропянов А. В., Теплухин Г. Н. *Материаловедение*. СПб: СПбГУПТД 2017. 78с.
44. Гропянов, А. В., Ситов, Н. Н., Жукова, М. Н. *Порошковые материалы*. Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2017. 74 с.
45. Дьячкова Л. Н., Керженцева Л. Ф., Маркова Л. В. Порошковые материалы на основе железа. – Минск.: Тонпик, 2004. 228 с.
46. Карпычев, Владимир Александрович. *Разработка метода системного анализа автотормоза грузового подвижного состава*. Диссертация на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. Москва: [МИИТ], 2000. 157 с.
47. Крылов В. И., Крылов В. В., Ефремов В. Н. *Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава*. М.: Транспорт, 1989. 487 с.
48. Либенсон Г. А. Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формование и спекание. – М.: МИСИС, 2002. – 320 с.
49. Миронов, В., Станкевич, П., Дортыньш, В. Машина трения с вертикальной осью вращения. В: Порошковая металлургия: Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 13-й Международной научно-технической конференции. Минск, Беларусь. 16–18 Мая, 2018. Беларуская навука, 2018, 351–354 с. ISBN 978-985-08-1838-6.
50. Полюшкин, Н. Г. *Основы теории трения, износа и смазки..* Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т. 2013. 192 с. ББК 40.72-082я73.
51. Скориков, А. В. *Теоретические предпосылки обеспечения заданного качества порошковых изделий и рекомендации по их практической реализации*. Автореф. Дисс. д. т. н., 2003. –186 с.
52. Хренов, О. В., Афанасьев Л. Н., Лешок А. В. Материалы и технология порошковой металлургии. Минск. Белорусский национальный технический университет. 2010. 37 с.
53. Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством: [tiešsaiste]. *Производство изделий с низким коэффициентом трения для нужд машиностроения. [skatīts 2019.g. 20.apr.]*. Pieejams: http://russian.impulse.by/?page_id=356.
54. Fine Sinter Co., Ltd. – Powder Metallurgy Products, [online]. *Railroad application*. [viewed 21 April 2019]. Available from: <http://www.finesinter.com/english/products/pmp/railway/>.
55. *Полувагон модели 12-132-03*. [tiešsaiste]. Руководство по эксплуатации. [skatīts 2019. g. 20. apr.]. Pieejams: <https://ldzcargo.ldz.lv/sites/cargo.ldz.lv/files/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%BD%2012-132-03.pdf>.
56. Abbott Furnace Company. [online]. [viewed 11 April 2019]. Available from: <https://www.abbottfurnaceco.com/sintering-fundamentals>.

57. Höganäs iron and steel powders for sintered components, Handbook 1. 2002. [online]. [viewed 2 May 2015]. Available from: https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/handbooks--all-documents/handbook-1-material_and_powder_properties_december_2013_0674hog-interactive.pdf.
58. International Organization for Standardization. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters* [online]. ISO 25178-2:2012 [viewed 4 February 2019]. Available from: <https://www.iso.org/standard/42785.html>.
59. International Organization for Standardization. *Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Sensitivity and range setting*. [online]. ISO 16811:2012. [viewed 15 February 2019]. Available from: <https://www.iso.org/standard/57782.html>.
60. International Organization for Standardization. *Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 1: X- and gamma-ray techniques with film*. [online]. ISO 17636-1:2013. [viewed 15 February 2019]. Available from: <https://www.iso.org/standard/52981.html>.
61. International Organization for Standardization. *Sintered metal bushings – Determination of radial crushing strength* [online]. ISO 2739:2012 [viewed 1 April 2019]. Available from: <https://www.iso.org/standard/53346.html>.
62. Keyence corporation. *Digital Microscope VHX-2000 series* [online]. [viewed 26 January 2019]. Available from: <https://www.keyence.com/products/microscope/digital-microscope/vhx-2000/index.jsp>.
63. Presi Metallography. [online]. [viewed 6 January 2019]. Available from: <https://www.presi.com/en/>.
64. *Production of Sintered Components*, in Höganäs Handbook 2., [online]. Höganäs AB: 2013. 162p. [viewed 11 April 2019]. Available from: https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/handbooks---all-documents/handbook-2_production_of_sintered_components_december_2013_0675hog_interactive.pdf.
65. Sandvik coromant. [online]. Metal cutting knowledge [viewed 10 February 2016]. Available from: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/pages/default.aspx>.
66. Yxlon Product Catalog. Portable and mobile X-ray systems. [online]. [viewed 5 February 2018]. Available from: https://www.yxlon-portables.com/YxlonPortables/media/pdf/product_catalog/YXLON_Product_Catalog_v1.pdf.