

**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 darbs**

Zinātniskie vadītāji:

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

asoc. profesors *Dr. sc. ing.*

|                |
|----------------|
| DIJS SERGEJEVS |
|----------------|

RTU Izdevniecība

Rīga 2020

# 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

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| PUBLIKĀCIJU SARAKSTS.....                                                                        | 5  |
| AUTORA IEGULDĪJUMS PUBLIKĀCIJĀS .....                                                            | 7  |
| APLIECINĀJUMI .....                                                                              | 9  |
| DARBA APROBĀCIJA .....                                                                           | 10 |
| SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....                                                                        | 11 |
| ANOTĀCIJA .....                                                                                  | 12 |
| ABSTRACT .....                                                                                   | 13 |
| IEVADS .....                                                                                     | 14 |
| 1. METĀLPULVERU MATERIĀLU RAŽOŠANAS TEHNOLOĢIJA UN TĀS<br>IZMANTOŠANA DZELZCEĻA TRANSPORTĀ ..... | 19 |
| 1.1. Metālpulveru materiālu īpašības .....                                                       | 19 |
| 1.2. Pulveru veidi un to īpašības .....                                                          | 22 |
| 1.3. Leģējošo elementu ietekme uz detaļu īpašībām.....                                           | 26 |
| 1.4. Metālpulveru detaļu izmantošanas novērtējums ritošā sastāva mezglos .....                   | 30 |
| 1.5. Metālpulveru detaļu izgatavošanas procesi.....                                              | 37 |
| 1.5.1. Metālpulveru detaļu presēšanas procesu analīze.....                                       | 37 |
| 1.5.2. Metālpulveru sagataves saķepināšana .....                                                 | 46 |
| 2. EKSPERIMENTĀLO METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS PROCESU<br>PĒTĪJUMI .....                        | 52 |
| 2.2. Eksperimentālo detaļu no mazlēģētiem komponentiem tribotehniskie raksturojumi               | 52 |
| 2.2.1. Eksperimentālo detaļu mehāniskās īpašības .....                                           | 52 |
| 2.2.2. Eksperimentālo detaļu triboloģiskie un virsmas kvalitātes mērījumi .....                  | 58 |
| 2.3. Presēšanas pētījumi ar impulsveida magnētisko lauku .....                                   | 64 |
| 3. METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS BRĀĶIS UN KVALITĀTES<br>KONTROLES PAŅĒMIENI .....               | 69 |
| 3.1. Saķepināšanas brāķis un pasākumi tā samazināšanai .....                                     | 69 |
| 3.2. Metālpulveru detaļu kvalitātes pārbaude ar nesagraujošās kontroles metodi .....             | 71 |
| 3.2.1. Metālpulveru detaļu kvalitātes kontrole ar ultraskaņu .....                               | 72 |
| 3.2.2. MP detaļu savienojumu kontrole ar ultraskaņas (UT) un radiogrāfijas (RT)<br>metodēm.....  | 73 |
| 4. SEKUNDĀRO OPERĀCIJU PĒTĪJUMI .....                                                            | 80 |
| 4.1 Poraino metālpulvera detaļu mehāniskās apstrādes optimālo parametru noteikšana..             | 80 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2. Metālpulvera detaļu antifrikcijas īpašību paaugstināšana..... | 87  |
| 4.2.1. Poraino pulvera detaļu piesūcināšana .....                  | 87  |
| 4.2.2. Dispersa vide un dispersie komponenti.....                  | 89  |
| 4.2.3. Berzes koeficienta samazināšanas pētījumi .....             | 92  |
| SECINĀJUMI .....                                                   | 95  |
| LITERATŪRAS SARAKSTS .....                                         | 96  |
| PIELIKUMI .....                                                    | 104 |

## PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

Promocijas darbs balstās uz zemāk norādītajiem zinātniskajiem rakstiem (1-6.pielikumi), 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. raksts

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. raksts

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. raksts

Tatarinovs, 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. raksts

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. raksts

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. raksts

**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

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. 20.12.2017. (7. pielikums).

Rīgas Tehniskā Universitāte. *Paņēmiens un iekārta poraino izstrādājumu piesūcināšanai ar nanodaļiņām*. Viktors Mironovs, Aleksandrs Poļakovs, **Pāvels Stankēvičs**, Aleksandrs Korjaks. Iesniegšanas datējums 2018-12-28. Patenti un Preču Zīmes. LV15433. 20.02.2020. (8. pielikums).

# 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 tribotehniskajiem rādītājiem, autors piedalījies pulvera detaļas pārbaudes modeļa realizācijā ar negsagraujošās kontroles *TOF* metodi un eksperimentālās detaļas virsmas kvalitātes pētījumos. Autors pamatojis mazlēģētu 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.

## APLIECINĀJUMI

Promocijas darbs ir uzrakstīts kā tematiski vienota publikāciju kopa. Saskaņā ar MK noteikumiem Nr. 1001. "Zinātniskā doktora grāda piešķiršanas (promocijas) kārtība un kritēriji", ir doti publikāciju galveno autoru apliecinājumi par pretendenta personisko ieguldījumu publikāciju sagatavošanā.

Apliecinu zinātniskā grāda pretendenta Pāvela Stankēviča personisko ieguldījumu šādās publikācijās (1., 2., 4., 5. raksts):

- Mironovs, V., Stankevich, P., Eiduks, J. *Tendencies in the field of application of metal-powder materials for repair and maintenance of railway equipment*;
- 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*;
- Mironov, V., Stankevich, P., Beljaeva, I., Glushenkov, V. *Static-Dynamic Powder Material Compaction Methods*;
- Mironovs, V., Stankevics, P., Kromanis, A., Lungevics, J. *Influence of Machining Parameters on 3D Surface Roughness of Powder Bushings*.

\_\_\_\_\_ profesors, Dr. habil. sc. ing. Viktors Mironovs

Apliecinu zinātniskā grāda pretendenta Pāvela Stankēviča personisko ieguldījumu šādā publikācijā (3. raksts.):

- Tatarinov, A., Mironov, V., Rybak, D., Stankevich, P. *Non-Destructive Testing of Joints of Antifriction Parts Crimped by Pulsed Magnetic Deformation*.

\_\_\_\_\_ Dr. sc. ing. Aleksejs Tatarinovs

## DARBA APROBĀCIJA

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

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).

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).

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).

4. rakstā “*Static-Dynamic Powder Material Compaction Methods*” pētījuma rezultāti tika prezentēti starptautiskā zinātniskajā konferencē “*15<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development*” 25.–27.05., Jelgava, 2016., un publicēti zinātniskajā žurnālā “*Agronomy Research*” (Vol. 14).

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).

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

MA – mehāniskā apstrāde

MIP – magnēta – impulsa presēšana

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

PFM - pulvera frikcijas materiāls

PM – pulvermetallurģija

PT - penetrācijas pārbaude

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*)

## ANOTĀCIJA

Promocijas darbs “Ritošā sastāva metālpulveru antifrikcijas detaļu ražošanas tehnoloģija un tribotehnisko īpašību paaugstināšana” tika izstrādāts lai izpētītu metālpulveru antifrikcijas detaļu ražošanas tehnoloģiju un veiktu eksperimentālas pārbaudes ar mērķi noteikt metālpulveru antifrikcijas detaļu ar zemo leģējošo elementu saturu, piemērotību izmantošanai ritošā sastāva bremžu sviru pārvadā, kā arī veiktu ar tiem eksperimentus berzes koeficienta samazināšanai. Darbā ir veikti pētījumi izgatavojamo detaļu tribotehniskāi novērtēšanai un pārbaudei ar nesagraujošo kontroli. Parādīta ultraskaņas un radiografijas metožu piemērotība poraino detaļu kvalitātes novērtēšanai. Izskatītas detaļu statiskās un dinamiskās presēšanas paņēmieni izmantojot impulsveida magnētisko lauku. Eksperimentāli noteikti mehāniskās apstrādes parametri, lai nodrošinātu apstrādājamās detaļas virsmas raupjuma kvalitāti. Sniegtas rekomendācijas antifrikcijas detaļu piesūcināšanai ar  $WS_2$ ,  $WSe_2$  nanodaļiņas saturošu eļļu berzes koeficienta samazināšanai.

Šī promocijas darba ietvaros veikto pētījumu rezultāti parādīja, ka pulvermetallurģijas izstrādājumiem piemīt plašs īpašību spektrs, kas ļauj tos izmantot dažādu konstrukcijas materiālu ražošanā, un tie ir droši, izgatavojot antifrikcijas detaļas. Leģējošo elementu masas daļa pulveru kompozīcijās uz dzelzs bāzes, tādas kā Ni un Mo, ražojot antifrikcijas bukses vagona bremžu sviru sistēmai, var tikt samazināta, jo izgatavotās eksperimentālās detaļas apliecināja atbilstību prasībām to uzstādīšanai vagona bremžu svīru pārvadā šarnīra mezglos. Mazleģētu materiālu izmantošana antifrikcijas detaļu ražošanā ļauj sasniegt augstākus ekonomiskos rādītājus neietekmējot uz kustības drošību. Tāpat darbā ir atainoti pētījumi, kas parāda iespēju uzlabot antifrikcijas pulvermateriāla triboloģiskās īpašības, piesātinot tos ar nanodaļiņām, kas savukārt ļauj sasniegt drošākus antifrikcijas detaļu izturības un ekspluatācijas raksturlielumus.

Promocijas darbs balstās uz autora publicētiem zinātniskiem rakstiem, pulvermetallurģijas teorētisko procesu analīzi un eksperimentāliem pētījumiem ar metālpulveru antifrikcijas materiāliem.

Promocijas darbs kā zinātnisko publikāciju kopa 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.

## ABSTRACT

The doctoral thesis “Production Technology of Metal Powder Antifriction Parts for Rolling Stock and Improvement of Their Tribological Properties” has been worked out in order to research the production technology of metal powder antifriction parts and perform experimental tests with the purpose to determine the suitability of metal powder antifriction parts with low alloying element content to use in the brake lever mechanism of rolling stock, as well as to perform with them tests in order to reduce the friction coefficient. Analyses for tribological estimate and testing with a non-destructive test of the parts in production is performed within this thesis. Suitability of ultrasound and radiography methods to quality estimate of porous materials is shown. Techniques of static and dynamic pressure by using impulse magnetic field are reviewed. Mechanical treatment parameters to ensure surface roughness quality of the treated part is experimentally determined. Recommendations for impregnation with lubricant containing  $WS_2$ ,  $WSe_2$  nanoparticles to reduce the friction coefficient are proposed.

The results of research performed within this doctoral thesis show that powder metallurgy products have a specific range of properties allowing to apply them in production of various construction materials, and they are safe when producing antifriction parts. Mass fraction of alloying elements on the iron basis, such as Ni and Mo, when producing antifriction bushes for the brake lever system of a car, may be reduced because the experimental parts made attested the conformity with the requirements for installing them in the pin joints of the brake lever mechanism of a car. Using low-alloyed materials in the production of antifriction parts allows to obtain higher efficiency indexes with no impact on the movement safety. Additionally, the thesis contains studies showing opportunity to improve tribological properties of antifriction powder materials by impregnating them with nanoparticles, thus, reaching safer resistance and exploitation characteristics of antifriction parts.

The doctoral thesis is based on the scientific articles published by the author, analyses of powder metallurgy theoretical processes, and experimental tests with metal powder antifriction materials.

This doctoral thesis, as a composition of scientific publications, has been drafted in Latvian and consists of introduction part, four chapters, conclusion part, bibliography part, 69 images, 16 tables, 8 annexes, and 151 pages in total. The bibliography part contains 101 titles.

## IEVADS

No dzelzceļa transporta darba kvalitātes izriet pārvadājumu pieprasījuma nodrošinājums, pārvadājumu ātrums, valsts tranzīta potenciāla realizācija un attīstība. Lai nodrošinātu maksimālo transporta pārvadājumu efektivitāti un drošību, it īpaši - pārsūtot kravas ar dzelzceļa transportu, ir nepieciešams pastāvīgi veikt inovācijas risinājumu meklēšanā un ieviešanā. Lielā mērā tas attiecas uz tehnisko daļu, pirmkārt, uz ritošā sastāva mehānismiem.

Kā inovatīvs virziens minams mūsdienīgais pulvermetallurģijas tehnoloģijas pielietojums, izgatavojot svarīgas detaļas un mezglus, kas savukārt nodrošinās kvalitatīvu darbu, drošību un ekonomisko efektivitāti.

Pulvermetallurģija (PM) – rūpniecības nozare, kas iekļauj sevī noteiktu metožu klāstu metālisko pulveru un kompozīciju ražošanā, kā arī detaļu ražošanu no šiem materiāliem. Šim detaļu ražošanas veidam ir virkne priekšrocību, kas ļauj tam veiksmīgi konkurēt ar citām, bieži vien dārgākām, detaļu izgatavošanas metodēm (liešana, kalšana, štancēšana).

Metālpulveru izstrādājumu izgatavošanā pastāv četri pamata etapi: pulvera izgatavošana, presēšana presformā, saķepināšana līdz noteiktam blīvumam un sekundāras pēsaķepināšanas operācijas līdz gatavam produktam. Katrs no šiem etapiem ir ļoti svarīgs produkta kvalitātes nodrošināšanai un prasa zinātnisko principu pārzināšanu.

Dzelzceļa transporta specifika nosaka nepieciešamību nodrošināt detaļu un mezglu drošumu, darbojoties lielas īpatnējās slodzes un ievērojamu temperatūras svārstību apstākļos, un mūsdienu sasniegumi pulvermetallurģijā ļauj veidot metālpulveru detaļas, kas atbilst visaugstākajām prasībām. Pulvermetallurģijai ir ievērojamas priekšrocības detaļu un sastāvdaļu ražošanā, pateicoties jaunām pulveru kompozīcijām un formēšanas metodēm.

Visstraujāk pulvermetallurģija attīstās tādās valstīs kā Vācija, ASV, Japāna, Koreja un Ķīna. Latvijā ir liela pieredze pulverdetaļu ražošanā, piemēram, Rīgas pulvermetallurģijas rūpnīcā. Daudzus nozīmīgus pētījumus pulvermetallurģijas jomā veikuši Latvijas zinātnieki A.Godes, V.Mironovs un ārzemju zinātnieki O.Roman, V.Šatts., F.Aizenkolbs, R.German, un citi.

### **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 [76].

Kopš 2012. gada 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 blīvījumam, lieltonnāžas presēm un saķepināšanas tehnoloģijai [43]. 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 [49]. 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 [26], 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 [43].

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 [9] 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 aprobēti uz detaļām, kas ražotas, izmantojot citas metodes (liešana, kalšana) [51], 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 papildus operācijas pēc detaļu izgatavošanas, tomēr atsevišķos gadījumos [6] 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.

**Promocijas darba mērķis:** metālpulveru antifrikcijas materiālu ražošanas tehnoloģijas izpēte un mazlēģēto 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<sub>2</sub> WSe<sub>2</sub> 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 sastādīšana.

**Pētījuma iekārtas**

Metālpulveru antifrikcijas materiālu īpašību novērtēšanai tika izmantotas vairākas iekārtas.

Tribotehniskajiem pētījumiem – “3D izmērīšanas sistēma *Taylor Hobson Ltd.*” un “*CSM Instrument*” iekārta “*Ball-on-disk tribometer*”.

Metalogrāfijai – “*PRES*” 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. Parādīts, ka, izgatavojot antifrikcijas metālpulveru detaļas, Ni un Mo leģējošo elementu satura pazemināšanu var kompensēt, uzlabojot triboloģiskās īpašības, piesātinot tās ar WS<sub>2</sub> un WSe<sub>2</sub> nanodaļiņām.
2. Noskaidrotas porainu pulvera detaļu griešanas režīmu ietekmes likumsakarības uz apstrādātās virsmas raupjuma īpašībām.
3. Pirmo reizi eksperimentāli apstiprināts berzes koeficienta samazināšanas paņēmieni mazleģētām metālpulveru slīdbuksēm, kas tiek izmantotas vagona bremžu sviru pārvadā, piesātinot tās ar WS<sub>2</sub> un WSe<sub>2</sub> nanodaļiņām (LV Patents Nr. 15433, 8. pielikums).

#### **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<sub>2</sub> WSe<sub>2</sub> nanodaļiņas.

#### **Darba praktiskais pielietojums**

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.



# 1. METĀLPULVERU MATERIĀLU RAŽOŠANAS TEHNOLOĢIJA UN TĀS IZMANTOŠANA DZELZCEĻA TRANSPORTĀ

## 1.1. Metālpulveru materiālu īpašības

PM tehnoloģija iekļauj pulveru ražošanu, pulverdaļu 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.

Šis metalurģijas virziens kā gatavo izstrādājumu iegūšanas paņēmiens sāka attīstīties aptuveni pirms simts gadiem. Pulvermetalurģija ļauj paaugstināt metāla izmantošanas koeficientu un paaugstināt darba ražīgumu. Ja vienkārši definēt pulvermetalurģiju, tad tā ir izstrādājumu izgatavošana no metāla pulvera, pakļaujot to lielumam spiedienam, pēc tam saķepinot augstā temperatūrā. Detaļu izgatavošanas process ir līdzīgs keramikas izgatavošanas procesam, līdz ar to pulvermetalurģiju sauc arī par metālkeramiku. Metālpulveru izstrādājumu ražošanas tehnoloģija pastāvīgi uzlabojas, pilnveidojas un attīstās.

Par pulvera materiāliem sauc tādus materiālus, ko izgatavo, presējot metāla pulverus nepieciešamās formas un izmēru izstrādājumos un pēc tam saķepinot izveidotos izstrādājumus vakuumā vai aizsargatmosfērā 0,7–0,8 kušanas punkta temperatūrā [16]. Izšķir porainos un kompakto pulvermateriālus.

Par kompaktiem sauc materiālus, kuros pēc galīgās apstrādes atliku porainība ir ne vairāk par 3–5%. Tos galvenokārt izmanto tādu detaļu izgatavošanai, kas saņem spēka, siltuma un citas slodzes [14].

Par porainiem sauc materiālus, kuros pēc galīgās apstrādes saglabājas 10–30% atliku porainības. Šos sakausējumus galvenokārt izmanto antifrikcijas detaļu (gultņi, bukses) un filtru izgatavošanai [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 [36]. Pārklājuma struktūrai jānodrošina pretsāķere un ātras piestrādes iespēja pretķermenim. Materiāla mehāniskajiem raksturlielumiem jāatbilst ekspluatācijas slodzēm, bet pašiem materiāliem jābūt pietiekami dilumizturīgiem un plastiskiem. Antifrikcijas pulverusakausējumiem ir zems berzes koeficients, tie viegli piestrādināmi, iztur būtiskas slodzes un tiem ir laba dilumizturība.

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 [85].

No pulveršakausējumiem izgatavotie gultņi pēc piesūcināšanas ar eļļu var darboties bez piespiedu eļļošanas, pateicoties eļļas “izsvīšanai” no porām [14], [80].

Dzelzs-grafīta materiālu metāla pamatnes struktūrai jābūt perlītiskai, ar saistītās oglekļa masas daļu  $\sim 1,0\%$ . Tāda struktūra pieļauj vislielākos ātrumus un slodzes pie vismazākā gultņu nodiluma. Sēra ( $0,8\text{--}1,0\%$ ) un sulfīdu ( $3,5\text{--}4,0\%$ ) pievienošana dzelzs-grafīta materiāliem, kas veido sulfīda plēvīti uz berzes virsmām, uzlabo piestrādināmību, samazina nodilumu un saķeri ar blakus esošajām detaļām [81].

Frikciju materiāli – tie ir materiāli, kam kontaktā ar metālisku virsmu ir augsts berzes koeficients. Tiek lietoti bremzēs un vārpstu berzes sajūgos. Tiem raksturīga augsta frikciju siltumizturība (spēja saglabāt berzes koeficientu un dilumizturību plašā temperatūras diapazonā), zema adhēzijas spēja (tiem berzes laikā nav jāsaķeras), augsta siltuma vadītspēja un siltumietilpība, laba noturība pret karstuma dūrienu, kas rodas intensīvas siltuma izdalīšanās rezultātā berzes procesa laikā [36]. Frikciju izstrādājumiem jābūt ar augstu berzes koeficientu, pietiekamu mehānisko izturību un labu pretestību nodilumam. Lai paaugstinātu berzes koeficientu, frikciju materiālu sastāvā ievada silīcija, bora karbīdus, ugunsizturīgos oksīdus utt. Kā cietās smērvielas komponenti kalpo grafīts, svins, sulfīdi u.c.

Pulvermetalurģiju izmanto, lai izgatavotu speciālos sakausējumus: karstumizturīgus uz niķeļa bāzes, ar dispersiju rūdītus materiālus uz Ni, Al, Ti un Cr bāzes. Ar pulvermetalurģijas metodi iegūst dažādus materiālus uz W, Mo un Zr karbīdu bāzes.

Arvien plašāku pielietojumu gūst kompakti materiāli ( $1\text{--}3\%$  porainības) no oglekļa un leģētā tērauda pulvera, bronzas, misiņa, alumīnija un titāna sakausējumiem, lai izgatavotu visus iespējamus zobratu, sprūdus, krānus, gultņu korpusus, automātisko pārvadu detaļas un citas mašīnu detaļas [2].

Metālpulvera detaļām piemīt sekojošas īpašības [14], [47]:

- Enerģiju saudzējošs un īsākais ražošanas process. Pulvermetalurģijas tehnoloģija nodrošina precīza izmēra izstrādājumu ražošanu un minimizē vai pilnībā novērš mehāniskās apstrādes procesu.
- Augsta izturība. Ar izsvērtu ražošanas procesu, materiālu sagatavošanu, formēšanu, saķepināšanu un pēcapstrādi tiek nodrošināta ražojamo detaļu augsta izturība.

- Pašēļošana. Saķepinātajā materiālā ir pietiekams daudzums poru eļļas impregnēšanai, kas nodrošina izcilus raksturojumus gultņiem un mašīnu daļām.
- Dažādu metālu īpašību apvienošana vienā izstrādājumā. Apvienojot dzelzs, vara, grafitā, keramikas un citu materiālu īpašības, pulvermetallurģijas tehnoloģija ļauj ražot materiālus ar lielāku frikcijas vai antifriccijas, siltuma, berzes un bīdes pretestību un citus materiālus ar speciālām īpašībām.

Izplatītākie materiāli, ko iegūst pulvermetallurģijā, un dažādi konstrukciju materiāli ar speciālām fizikāli – mehāniskajām un ekspluatācijas īpašībām parādīti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Pulvermateriālu klasifikācija [3], [16].

| Materiālu grupa        | Izstrādājuma veids               | Materiāla sastāvs                                                                                                                    |
|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                      | 2                                | 3                                                                                                                                    |
| Elektrotehniskie       | Magnēti                          | Pulveri no tīra dzelzs, sakausējumiem, oksīdiem utt.                                                                                 |
|                        | Elektriskās sukas                | Grafitā kompozīcijas ar varu vai sudrabu                                                                                             |
| Porainie               | Filtri                           | Pulveri no bronzas, dzelzs, titāna, niroma, korozijizturīga tērauda utt. ar porainību līdz 50%                                       |
|                        | “Svīstošie” izstrādājumi         | Materiāli ar porainību līdz 30...40 % no korozijizturīga tērauda, niroma u.c.                                                        |
| Friciju un antifriciju | Slīdgultņi                       | Kompozīcijas uz vara vai dzelzs pulvera bāzes ar porainību līdz 10...35 %, piesūcinātas ar eļļu                                      |
|                        | Bremžu uzliktni                  | Kompozīcijas uz dzelzs vai vara pulvera bāzes ar dažādām leģējošām piedevām un nemetāla komponentiem                                 |
| Instrumentu            | Plates no cietiem sakausējumiem  | Kompozīcijas uz ugunsizturīgu metālu karbīdu bāzes (volframs, titāns, tantals)                                                       |
|                        | Plates no pārcietiem materiāliem | Kompozīcijas uz dimanta, elbora, heksanīta graudu bāzes                                                                              |
|                        | Minerālkeramikas plates          | Kompozīcijas uz alumīnija oksīda bāzes ar nebūtisku piemaisījumu daudzumu                                                            |
| Kompaktie konstrukciju | Dažādas mašīnu un ierīču detaļas | Pulveri no dažādiem leģētiem un oglekļa tēraudiem, krāsainajiem metāliem un to sakausējumiem ar porainību ne vairāk par 1,0 ... 2,0% |

1.1. tab. turpinājums

| 1              | 2                                            | 3                                                                                                    |
|----------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Termoizturīgie | Dažādu izstrādājumu karstumizturīgās detaļas | Kompozīcijas uz karbīdu, borīdu bāzes                                                                |
|                | Dažādu izstrādājumu ugunsizturīgās detaļas   | Kompozīcijas uz volframa, molibdēna, tantalā, niobija, to karbīdu un citu ugunsizturīgu metālu bāzes |
| Speciālie      | Vakuuma aparatūras detaļas                   | Kompozīcijas uz dzelzs un ugunsizturīgu metālu bāzes                                                 |
| Pusvadītāji    | Kompozīcijas uz germānija, bora u.c. bāzes   | Pulveri no tīra dzelzs, sakausējumiem, oksīdiem utt.                                                 |

Pulvermetalurģijai izdodas iegūt augstu izejmateriālu tīrības pakāpi, kas ir pats galvenais, lai sasniegtu elektromagnētisko izstrādājumu elektromagnētiskās un citas fiziskās īpašības. Elektrokontakta materiālus izgatavo no ugunsizturīgu metālu pulveru maisījuma ar varu un sudrabu. Ugunsizturīgie metāli (volframs, molibdēns, volframa karbīds) kalpo par pamatu un nosaka mehāniskās īpašības, bet vieglkūstošie metāli ir pildviela un dod materiāliem augstu elektrisko vadītspēju.

Pulvermetalurģijas konkurētspēja salīdzinājumā ar tradicionālajiem sagatavju iegūšanas paņēmieniem metāla liešanas veidā arvien vairāk izpaužas, pateicoties sekojošiem faktoriem: iespēja iegūt materiālu ar speciālām fiziskajām un ekspluatācijas īpašībām; kā izejmateriāli izmantojami pamatražošanas atlikumi – atgriezumī, skaidas, plāvas utt., kā arī materiāla ieguve no rūdas, apejot metalurģijas stadiju; praktiski izpaliek nepieciešamība tālāk mehāniski apstrādāt iegūstamās sagataves, līdz ar to samazinās darbietilpība un to izgatavošanas pašizmaksa un palielinās materiāla izmantošanas koeficients, tiek savienoti nepieciešamā materiāla un gatavā izstrādājuma ieguves procesi; augsts visu tehnoloģisko operāciju mehanizācijas un automatizācijas līmenis.

## 1.2. Pulveru veidi un to īpašības

Pulvera ražošana – pirmā pulvermetalurģijas metodes tehnoloģiskā operācija. Esošie pulveru iegūšanas paņēmieni sniedz iespēju izstrādājumiem no pulvera dot prasītās fiziskās, mehāniskās un citas 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) [31].

Pulvermetalurģija arī pieprasa ugunsdrošības prasību stingru ievērošanu. Metāliska pulvera tieksme pašuzliesmot – bīstams ražošanas faktors, kas prasa precīzu ugunsdrošības tehnikas ievērošanu.

Rūpniecība saražo dažādus metāla pulverus: dzelzs, vara, niķeļa, hroma, kobalta, volframa, molibdēna, titāna u.c. Pulveru iegūšanas paņēmienus nosacīti iedala mehāniskajos un fizikāli ķīmiskajos [16].

Vispraktiskākais pielietojums ir izejvielu (skaidas, atgriezumi, lūžņi utt.) mehāniskās smalcināšanas paņēmienam. Smalcināšanu veic mehāniskajās dzirnavās. Maļot iegūst pulverus no stingri uzdota ķīmiskā sastāva leģētiem sakausējumiem un no trausliem materiāliem (silīcijs, berilijs utt.).

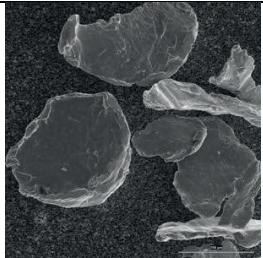
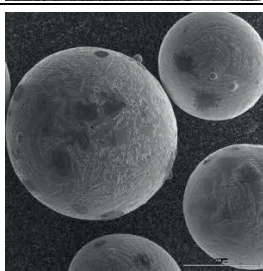
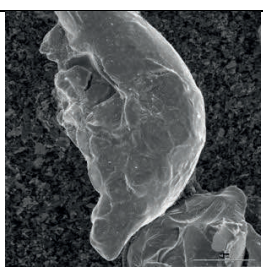
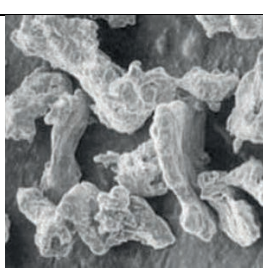
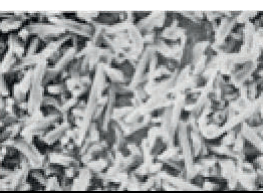
Rūpniecība apguvusi arī pulveru iegūšanas tehnoloģiju, pūšot šķidru metālu ar gāzes vai šķidrums plūsmu. Visvienkāršākais un ekonomiskākais ir paņmiens, kad pūš šķidro metālu ar ūdens strūklu zem noteikta spiediena.

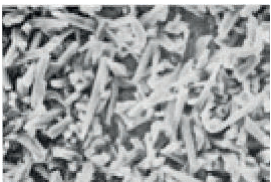
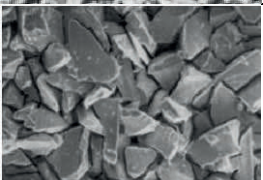
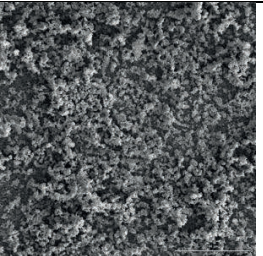
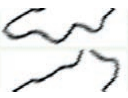
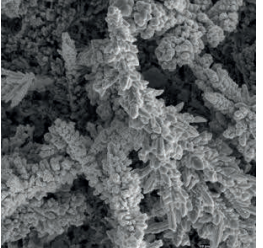
Izmantojot mehāniskās metodes, sākotnējais produkts tiek sasmalcināts, nemainot ķīmisko sastāvu. Kā mehāniskās smalcināšanas trūkums jāatzīmē augstā pulveru cena, jo tajā ietilpst sākotnējo metālu un sakausējumu izgatavošanas izmaksas.

Kā fizikāli – ķīmiskie paņēmieni minami tādi tehnoloģiskie procesi, kuros pulvera iegūšana saistīta ar sākotnējās izejvielas ķīmiskā sastāva izmaiņām vai tās stāvokļa izmaiņām ķīmiskās vai fiziskās iedarbības rezultātā uz sākuma produktu. Pulveru iegūšanas fizikāli – ķīmiskie paņēmieni ir universālāki nekā mehāniskie. Iespēja izmantot lētas izejvielas (rūda, ražošanas atkritumi plāvas veidā, oksīdi) padara daudzus fizikāli – ķīmiskos paņēmienus ekonomiskus. Ugunsdrošo metālu pulverus, kā arī sakausējumu un savienojumu uz to bāzes pulverus var iegūt tikai ar fizikāli – ķīmiskiem paņēmieniem.

Metāla pulveru izturēšanās presēšanas un saķepināšanas laikā ir atkarīga no pulveru īpašībām. Pulveru ķīmiskais sastāvs tiek noteikts pēc galvenā metāla vai komponenta un piemaisījumu satura. Pulveru fiziskās īpašības tiek raksturotas ar daļiņu izmēru un formu, mikrocietību, blīvumu, kristāla režģa stāvokli, bet tehnoloģiskās īpašības – ar pulvera uzbēruma blīvumu, plūstamību, saspiežamību un saķepināšanu. Pulvera daļiņu veidi, kā arī to iegūšanas paņmiens parādīts tabulā 1.2.

Metāla pulvera daļiņu veidi [20], [24].

| Pulvera daļiņu forma un iegūšanas veids                                                | Shematiskais attēlojums                                                             | Optiskā mikroskopa attēls                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                      | 2                                                                                   | 3                                                                                     |
| <b>Šķembu</b><br>(mehāniskā smalcināšana)                                              |    |    |
| <b>Sfēriska</b><br>(atomizācija, daļiņu nogulsnešanās)                                 |    |    |
| <b>Noapaļota</b><br>(atomizācija, ķīmiskā atjaunošana)                                 |   |   |
| <b>Nepareizas formas</b><br>(atomizācija, ķīmiskā atjaunošana)                         |  |  |
| <b>Vārpstveida, nepareizas formas</b><br>(ķīmiskā atjaunošana, mehāniskā smalcināšana) |  |  |
| <b>Adataina</b><br>(mehāniskā smalcināšana)                                            |  |  |

| 1                                                                                | 2                                                                                   | 3                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Adataina</b><br>(mehāniskā smalcināšana)                                      |    |   |
| <b>Leņķa</b><br>(mehāniskā nolietošanās)                                         |    |   |
| <b>Daļiņas ar iekšējām porām</b><br>(porainas, šūnainas)<br>(oksīdu atjaunošana) |    |   |
| <b>Dendrīta</b><br>(elektrolīze)                                                 |  |  |

### Metāla pulveru raksturojumi

**Uzbēruma blīvums** – brīvi uzbērtā pulvera apjoma vienības masa. Uzbērtās masas stabilitāte nodrošina pastāvīgu rukšanu saķepināšanas laikā. Tā galvenokārt atkarīga no pulvera daļiņu formas un izmēriem [41]. Izciļņu un negludumu esamība uz daļiņu virsmas paaugstina starpdaliņu berzi, kas apgrūtina to kustību attiecībā citai pret citu un noved pie pulvera uzbēruma blīvuma samazināšanās. Būtiska nozīme ir pulvera granulometriskajam sastāvam – palielinoties dispersāku daļiņu saturam, noteikti samazinās pulvera uzbēruma blīvums, jo palielinājusies berzes virsma.

**Plūstamība** – pulvera spēja piepildīt formu. Plūstamība pasliktinās, samazinoties pulvera daļiņu izmēriem un paaugstinoties mitrumam. Plūstamības novērtējums ir pulvera daudzums, kas 1 sekundē iztek caur atveri ar diametru 1,5...4 mm. Pulvera plūstamībai ir liela nozīme, īpaši automātiskās presēšanas laikā, kad preses ražīgums atkarīgs no formas aizpildīšanās ātruma. Zema plūstamība veicina arī blīvuma ziņā nevienādu detaļu saņemšanu [55].

**Saspiežamību** raksturo pulvera spēja sablīvēties ārējas slodzes iedarbībā un daļiņu adhēzijas stiprība pēc saspiešanas. Pulvera saspiežamība ir atkarīga no daļiņu materiāla plastiskuma, to izmēriem un formas, un tā paaugstinās, ievadot materiāla sastāvā virsmaktīvas vielas [52].

Ar **saķepināšanu** saprot daļiņu adhēzijas izturību presētu sagatavju termiskās apstrādes rezultātā.

Maisījuma pagatavošanas process var ietvert pulvera iepriekšēju atkvēlināšanu, šķirošanu pēc daļiņu izmēriem un sajaukšanu. Pulvera iepriekšēja atkvēlināšana veicina oksīdu atjaunošanos un noņem uzkalci, kas rodas izejmateriāla mehāniskās smalcināšanas laikā. Atkvēlināšanai parasti pakļauj pulverus, kas iegūti mehāniskās smalcināšanas, elektrolīzes un karbonilu sadalīšanās ceļā. Atkvēlināšanu veic temperatūrā, kas vienāda ar 0,5-0,6 kušanas temperatūras aizsargatmosfērā vai atjaunojošajā atmosfērā [16].

Pulverus ar daļiņu izmēru 50 мкм un vairāk sadala pa grupām, izkliešot sietos, bet sīkākus pulverus – ar gaisa separāciju. Metāla pulveros ievada dažādu uzdevumu tehnoloģiskās piedevas: plastifikatorus (parafīns, stearīns, oleīnskābe u.c.), kas atvieglo saspiešanas procesu un augstas kvalitātes sagatavju iegūšanu, kā arī kausējamos materiālus, kas uzlabo saķepināšanas procesu; dažādas gaistošas vielas, lai iegūtu detaļas ar noteiktu porainību. Sagatavotos pulverus samaisa lodīšu, bungu dzirnavās un citās sajaukšanas ierīcēs.

Daļiņu formai ir ietekme uz pulvera uzbēruma blīvumu, saspiežamību un formējamību; ar to saistīta arī to virsmas enerģija, kas pieaug, palielinoties daļiņu virsmai. Vislielāko stiprību saspiešanas laikā dod dendrīta formas daļiņas, ko iegūst elektrolīzes ceļā. Šajā gadījumā kopā ar saķeres spēkiem darbojas arī mehāniskie iemesli, piemēram, daļiņu iekļīlēšanās, izvīrējumu savīšanās u.c. [15]. Pulvera daļiņu izmērs ir viens no faktoriem, kas nosaka īpatnējo spiedienu saspiešanas laikā, kāds nepieciešams, lai sasniegtu vajadzīgo porainību, kā arī rukumu saķepināšanas laikā un saķepināto izstrādājumu mehāniskās īpašības.

### 1.3. Legējošo elementu ietekme uz detaļu īpašībām

Mūsdienās ekonomiskie apstākļi un konkurences pieaugums visās ražošanas jomās motivē meklēt jaunus inovatīvus risinājumus, lai samazinātu ražošanas izmaksas un paaugstinātu ražotās detaļas kvalitāti vai materiāla īpašības.

Pulvera konstrukciju detaļas uz legēta tērauda bāzes var tikt izgatavotas, saspiežot un saķepinot legētos pulverus un granulas, samaisot dzelzs pulverus ar legējošo elementu pulveriem, kā arī piesūcinot ar šķidriem metāliem porainas saķepinātas sagataves un difūzi piesātinot augstā temperatūrā.

Tīra dzelzs pulvera kā izejmateriāla izmantošana pulvera detaļu izgatavošanā ir ierobežota, jo saķepinātās dzelzs stiprības īpašības ir zemas [16]. Kā legējošos elementus izmanto niķeli, varu, hromu, molibdēnu u.c. Katra legējoša elementa lomu nosaka tas kvantitatīvā attiecība pret dzelzi un citiem legējošiem elementiem, kā arī attiecība pret oksīdiem, kas vairumā gadījumu attēlo robežas starp daļiņām.

Pirms eksperimentālo detaļu izgatavošanas un legējošo elementu izvēles tika veikta legējošo elementu ietekmes uz materiāla īpašībām analīze.

Pēc attiecības pret tēraudā esošo oglekli legējošie elementi iedalās:

- karbīdu veidojošajos;
- grafitu veidojošajos.



Karbīdu veidojošie elementi (titāns, vanādijs, volframs, molibdēns, hroms, mangāns) kopā ar oglekli veido speciālus karbīdus, kas ir stiprāki un par dzelzs karbīdu (cementīts). Titāns veido visnoturīgākos un stiprākos karbīdus; mangāns ir visvājākais karbīdus veidojošais elements, taču tā karbīds ir izturīgāks par dzelzs karbīdu. Jo spēcīgāks un noturīgāks karbīds, jo pie augstākas temperatūras tas izšķīst austenītā, piemēram, rūdīšanas laikā, un grūtāk izdalās no martensīta, atlaižot rūdīto tēraudu [65].

Grafitu veidojošie elementi (silīcijs, alumīnijs, varš, niķelis un kobalts) kopā ar oglekli neveido karbīdus un pazemina citu elementu karbīdu noturību, īpaši dzelzs karbīda, veicinot tā sairšanu ferītā un atkvēlināšanas ogleklī (grafīts). Pats stiprākais grafitu veidojošais elements ir silīcijs, bet pats vājākais – kobalts. Jo spēcīgākas elementa grafitu veidojošās darbības, jo mazāk tā vajag karbīdu noārdīšanai, t.i., tērauda grafitizācijai [69].

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

Lai palielinātu saraušanos un paaugstinātu pulvera izstrādājumu mehāniskās īpašības, lietderīgi ievadīt pulvera maisījumā elementus, kas saķepināšanas laikā ar dzelzi veido vieglkūstošas eitektikas, šķidrās šķīdumus utt., kas aktivizē saķepināšanas procesu. Vislabākie rezultāti tiek sasniegti, leģējot kompleksi ar oglekli, varu, niķeli, molibdēnu un citiem elementiem. Tā, piemēram, vara pievienošana kopā ar fosforu kompensē starpību rukšanā, bet niķeļa pievienošana pazemina saķepināšanas temperatūru un laiku [61].

Konstatēts [78], 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 (granulas).

Pulvera ligatūru ievadīšana saķepināšanas laikā var nodrošināt noteiktā laika posmā šķidrās fāzes esamību, kas veicina rukšanas palielināšanos, viendabīgākas struktūras iegūšanu un mehānisko īpašību paaugstināšanos. Uz gala rukšanu ietekmi atstāj pārvērtības, kas notiek dzesēšanas laikā [78].

**Vara** ievadīšana materiālā uz dzelzs bāzes palielina plūstamības galējo robežu un īslaicīgu materiāla pretestību, bet nedaudz pazemina tā plastiskumu un viskozitāti. Vara ievadīšana pulvera tēraudā uzlabo apstrādājamību un paaugstina atmosfēras korozijas pretestību.

Saķepinot dzelzs - vara materiālus virs vara kušanas temperatūras (1083 ° C), varš ir šķidrā stāvoklī, mijiedarbojas ar dzelzi un veido cietu aizstājējšķīdumu, kura pamatā ir  $\gamma$ -dzelzs, ar maksimālo vara koncentrāciju šķīdumā līdz 8%. Lēnas dzesēšanas laikā varš izdalās gar dzelzs graudu robežām ar varu bagātā  $\epsilon$  fāzē;  $\alpha$ -dzelzī vara saturs samazinās līdz 0,2–0,35% [75].

**Niķeļa** ievadīšana pulvermateriālā uz dzelzs bāzes paaugstina tērauda stiprību un plastiskumu, pie tam pulvera dzelzs leģēšana tikai ar niķeli tiek izmantota reti, jo nepieciešama augsta temperatūra un ilgstoša izture saķepināšanas laikā, lai iegūtu viendabīgu struktūru. 5 % niķeļa piedeva tīrai dzelzij paaugstina materiāla stiprību un cietību, tā plastiskumu atstājot praktiski bez izmaiņām. Sakarā ar to, ka niķelis saķepināšanas laikā izraisa lielu rukšanu, nerūkamam izstrādājumam iegūšanai ar augstām mehāniskajām īpašībām pulvertērauds tiek leģēts ar varu un niķeli. Vienlaicīgi leģējot ar niķeli un varu (Ni - 4 % un Cu - 2 %), paraugu ar 10 % porainību stiepes stiprība sasniedz 400 – 420 MPa, pagarinājums - 7 - 8 %, cietība – 120 - 127 HB. Tādi paši paraugi, leģēti tikai ar 2 % varu, uzrāda sekojošas īpašības pie 10 % porainības: stiepes stiprība – 280 - 300 MPa, pagarinājums – 3 - 4 %, cietība - 100 HB. Vislabvēlīgākā stiprības un plastiskuma kombinācija vērojama sakausējumos, kas satur no 1 līdz 5 % katra no šiem elementiem [65], [74].

Pulvertērauda uz dzelzs bāzes leģēšana ar karbīdu veidojošu elementu **molibdēnu** ierobežota dēļ zemā tā difūzijas koeficienta  $\alpha$ - un  $\gamma$ -dzelzī, kas apgrūtina viendabīga cieta šķīduma iegūšanu. Molibdēna ievadīšana dzelzī noved pie intensīvas rukšanas un intensīva graudainības pieauguma saķepināšanas laikā. Pulvertērauda leģēšana ar molibdēnu tiek veikta tikai izgatavojot svarīgas, stipri noslogotas detaļas. Pulvermetallurģijas praksē vairāk izplatīta kompleksā leģēšana ar molibdēnu un niķeli. Molibdēns pulvertēraudā tiek ievadīts daudzumā 0,2-1,0% sagatavojot pulveru maisījumu vai pulveru sastāvā, ko saņem smidzināšanas veidā, vai ligatūru veidā [75].

Izplatīts un lēts karbīdu veidojošs elements ir **hroms**, kas spējīgs veidot divkārsus un sarežģītus karbīdus. Hroms veicina stiprības un nodilumizturības palielināšanos, labu pulvera tērauda sacietēšanu. Saķepinātā hroma tēraudā ir plaša struktūru gamma, no ferīta līdz sorbīta ar sarežģītiem karbīdiem. Tas skaidrojams ar augstu oksīdu noturību, kuru disociācijas temperatūra gandrīz sasniedz tīra hroma kušanas temperatūru. Oksīdu esamība apgrūtina difūzijas procesus, bet pašu saķepināšanu nepieciešams veikt augstā temperatūrā akūti žāvētā reducēšanas vidē (ūdeņradis, disociētais amonjaks).

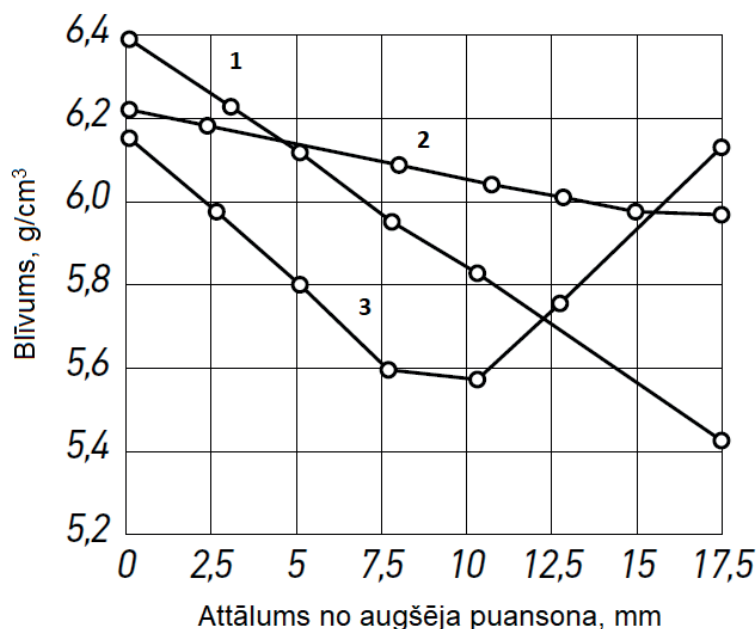
No nemetāla leģējošajiem elementiem praktisku pielietojumu pulvermetallurģijā atradis **fosfors**. Viskozitātes dēļ fosfora saturs tērauda pulverī ir ierobežots līdz 0,3 - 0,6%. Sakarā ar cietu šķīdumu veidošanos ar dzelzi, fosfors stabilizē Fe $\alpha$ . Tēraudus, kas satur vairāk par 0,55 % fosfora, var saķepināt bez fāžu pārvērtībām. Paaugstināts pašdifūzijas ātrums  $\alpha$ -fāzē veicina materiāla migrāciju saķepināšanas laikā un pieļauj saķepināšanu pie pazeminātas temperatūras (1000 °C). Pie 0,3 % fosfora tērauds nostiprinās analogiski kā ievadot 2% vara, ar rukšanu vairāk kā 1%. Fosfora esamība sistēmās Fe – Cu – P un Fe – Ni – P veicina šķidrās fāzes formēšanos temperatūrā 920 °C, kas paātrina saķepināšanas procesu [83].

**Mangāns** pieder pie pārejas metāliem, kas paplašina  $\gamma$ -Fe esamības apgabalu, palielinot ferīta cietību, paaugstina pārdzesēta austenīta noturību un samazina martensīta pārvērtību temperatūru. Mangāns pieder pie elementiem ar augstu sacietēšanas efektu tēraudam, nepietiekami plaši tiek izmantots pulvertēraudā, jo ir jāizmanto reducējošā atmosfēra ar augstu žāvēšanas pakāpi. Tā pie temperatūras 800 °C nepieciešams izmantot rāsas punkta atmosfēras - 77 °C, pie temperatūras 1100 °C – 54 °C [74].

**Titāns** kā dzelzi leģējošais elements netiek izmantots. To izmanto kā elementu, kas ietekmē citu leģējošo elementu. Tā kompozīcijā Fe – Ni – Co – Mo titāns veido ar niķeli metālu nostiprinošās cietās fāzes [71].

**Grafīta** pievienošana smalkiem pulveriem tikai nedaudz samazina izstrādājumu mehāniskās īpašības, bet pulveru saspiežamība stipri uzlabojas, izstrādājumi iegūst vienmērīgu blīvumu un mazāk deformējas saķepināšanas laikā. Grafīta ievadīšana lielos pulveros ievērojami samazina mehānisko izturību. Ja nepieciešams pievienot grafītu gultņiem, kas izgatavoti no lieliem pulveriem, to ievada jau saķepinātu izstrādājumu porās koloidālā grafīta formā ar smērvielu. Gultņos uz čuguna pamata grafītu papildus neievada, jo to jau satur čuguns.

Grafīta klātbūtne šīhtā ļauj sasniegt vienmērīgāku izstrādājumu blīvumu, pateicoties labākai pulvera plūstamībai un sablīvējamībai (1.2. att.). Grafīts novērš sauso berzi, veicina vibrāciju absorbciju [69].



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

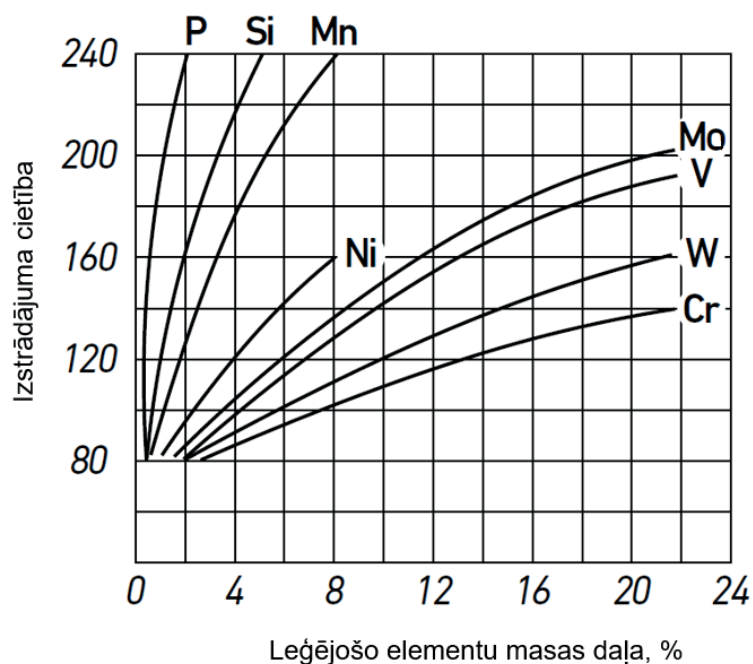
- 1 - varš pie vienas pusējas presēšanas;
- 2 - varš ar 4% grafīta pie vienas pusējas presēšanas;
- 3 - varš pie divas pusējas presēšanas bez grafīta piedevas.

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). Attālums starp diviem blakus esošiem atomiem būtiski mazāks par 0,14 nm. Attiecīgi enerģija starp saites atomiem katrā slānī ir 427 kJ / (g-atoms), bet saistošā enerģija starp atomiem, kas atrodas dažādos slāņos, ir par pakāpi zemāka [62].

Grafīta eļļošanas darbības efektivitāti lielā mērā nosaka tvaika un gāzes molekulu piepildīšana, ko adsorbē slīdēšanas plaknes, nodrošinot ievērojamu bīdes spēku samazināšanos visā sadaļas laukumā. Šajā gadījumā grafīta daļiņu saķere ar metāla virsmu, uz kuras šīs daļiņas ir novietotas, ir ievērojami augstāka nekā saķere starp slīdēšanas plaknēm, uz

kurām adsorbējas tvaika un gāzes molekulas. Tā rezultātā grafīts atmosfēras apstākļos (un īpaši mitrā gaisā) nodrošina augstas antifrikcijas un pretnodiluma īpašības.

Metālpulvera materiāla mehāniskās īpašības lielā mērā ir atkarīgas no materiāla mikrostrukturā, kas savukārt ir atkarīga no pulveru maisījuma ķīmiskā sastāva, it īpaši no leģējošo elementu satura [41], 1.3. attēlā. parādīts, kādā mērā leģējošo elementu saturs ietekmē dzelzs cietību.



1.3. att. Leģējošo elementu ietekme uz dzelzs cietību, HB.

Pulvera dzelzs leģēšana 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 leģē ar varu un citiem leģējošiem elementiem. Visefektīvākā ietekme uz mehāniskajām īpašībām parādās, kopā ievadot molibdēnu ar niķeli un citiem elementiem.

#### 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.

Konstrukciju detaļas parasti izgatavo no materiāliem uz dzelzs pamata ar grafīta, vara, niķeļa un molibdēna piedevām, ar blīvumu 6-7 g/cm<sup>3</sup> un cietību 55-130 HB. Virsmas raupjums Ra 2.5. Pie tādām detaļām var attiecināt ūdens un eļļas sūkņu zobratu, slīdbukses

(1.4. att.). Citu konstrukcijas detaļu grupu sastāda detaļas uz vara pamata ar dzelzs pievienošanu. Tās blīvums ir virs  $7,9 - 8,7 \text{ g/cm}^3$  un cietība nepārsniedz 45 HB un virsmas raupjums Ra 3.2., [36].

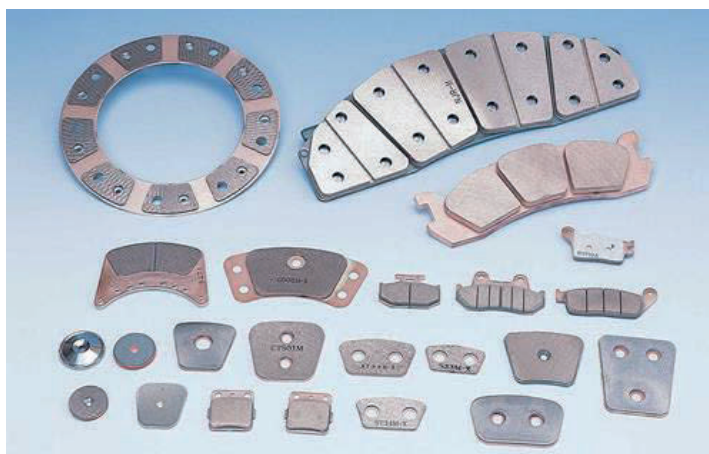


1.4. att. Bremžu sviru pārvada slīdbukses [36].

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; augstā nodilumizturība, ko nodrošina pašēļļošanās efekts.

Antifrikcijas īpašības tiek paaugstinātas ar grafiņa piedevām, kam ir augstas smērvielu īpašības. Slīdgultņiem ar paaugstinātu grafiņa saturu praktiski nav nepieciešams eļļas pielietojums.

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 [36].

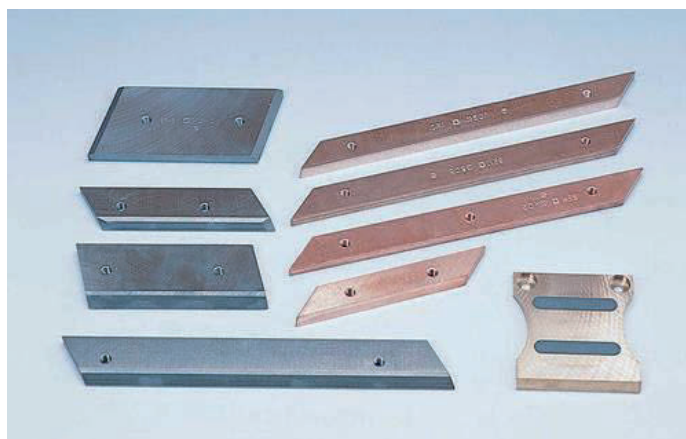
Šādu detaļu presēšana notiek uz hidrauliskām presēm ar paaugstinātu spiedienu no 5 000 līdz 20 000 kN. Saķepināšana notiek elektriskajā stāvceplī ūdeņraža atmosfērā pie

temperatūras 1050° C. [19]. Pulvera frikcijas materiāliem (PFM) raksturīgas tādas īpašības kā augsta efektivitāte un drošums ekspluatācijā, strādājot pie lielām slodzēm un praktiski jebkādos laika apstākļos. Salīdzinoši augstāks berzes līmenis ir efektīvs un stabils.

PFM ir 3 reizes lielāks kalpošanas termiņš un nodiluma pakāpe ir 1/3 līdz 1/10, salīdzinot ar citiem frikcijas materiāliem. Salīdzinoši reti izveidojas plaisas un apdegumi. Pateicoties PMF augstajai termoizturībai, tos var izmantot pie temperatūras līdz 800-1000° C.

PFM detaļu ražošana īpaši ātri attīstījās Ķīnā. Kopējais ātruma palielināšanās apjoms dzelzceļa līnijās nosaka stingras prasības frikcijas materiālu izmantošanai lielātruma vilcieniem. PMF tiek izgatavoti ar pulvermetallurģijas metodēm kā kompozītmateriāls no metāla un nemetāla komponentiem ar augstu berzes koeficientu [86].

Japānas dzelzceļos plaši izmanto dažādas pulvermateriālu antifrikcijas detaļas elektriskajos kontakttīklos: slīdņi un pantogrāfu komponenti (1.6. att.).



1.6. att. Pantogrāfu kontaktdaļas no metālpulvera materiāliem [36].

Izskatot pamattendences, kas attiecas uz metālpulvera detaļu ražošanu dzelzceļa transportam, jāatzīmē sekojošais:

Blīvuma (blīvām detaļām) un porainības (porainām detaļām) paaugstināšana;

Antifrikcijas īpašību paaugstināšana antifrikcijas detaļām;

Ekspluatācijas temperatūras diapazons paplašināšana;

Detaļu ar sarežģītu ģeometriju izgatavošanas nodrošināšana.

Tātad var secināt, ka 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.



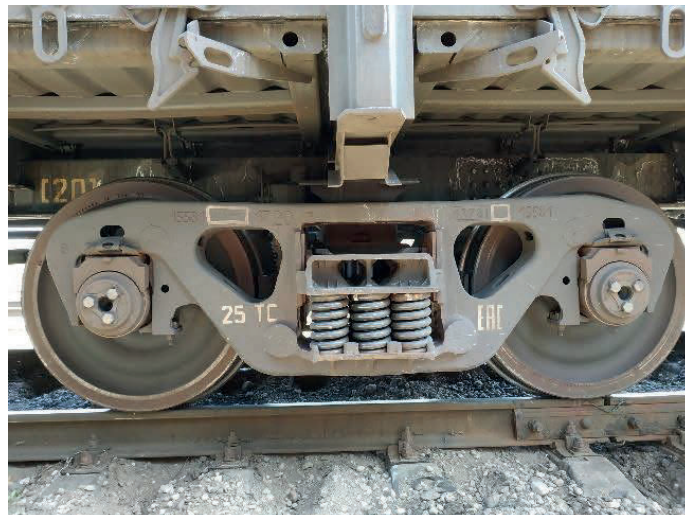
### Vagona bremžu sviru pārvada uzbūve

No ritošā sastāva bremžu sistēmas darba efektivitātes atkarīga ritošā sastāva kustības drošība. Bremžu darba drošumu nodrošina pneimatiskā un mehāniskā bremžu daļa. Vagona bremžu pneimatiskā daļa nodrošina savlaicīgu spēka radīšanu bremžu cilindra stienī bremzēšanas procesā. Bremžu mehāniskā daļa nodrošina bremžu kļu piespiešanu pie riteņpāru velšanās virsmas un to atlaišanu.

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 [87].

Daudzos gadījumos konstrukcijas iemeslu dēļ nav iespējams nodrošināt tiešu bremžu cilindra stienī nospiešanu uz frikcijas elementiem. Tādējādi nepieciešamību ieviest bremžu sviru pārvadu diktē funkcionālas un konstruktīvas bremžu sistēmas īpatnības.

BSP kalpo spēka padevei no bremžu cilindra (BC) stienī uz bremžu kļūčiem ar noteiktu ieguvumu spēkā un vienmērīgu šī spēka sadalījumu pa riteņpāriem (1.7. att.).



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

BSP raksturo pārnēsūmskaitlis, ko nosaka visu bremžu kļu kopējā spiediena spēka un gaisa spiediena attiecība BC. Pārnēsūmskaitlis raksturo, cik reizes bremžu kļu spiediena spēks lielāks par gaisa spiediena spēku BC. Piemēram, četrasu pusvagonam ar kompozīcijas bremžu kļūčiem pārnēsūmskaitlis  $n = 5,7$ ; pasažieru vagonam  $n = 5,3$ . Svīru un vīlces pārvītošanās process kravas vai pasažieru vagona BSP notiek aptuveni 0,5 sek. laikā, kamēr bremžu cilindrā neizveidosies lēciena spiediens aptuveni 0,04 MPa, kas nepieciešams atsperu spēka pārvarēšanai, kas pārvada sastāvā, un bremžu kļu pārvītošanai un to piespiešanai pie rīteņu frīkciju vīrsmas [66].

Bremžu svīru pārvada šārnīra savīenojūmī remonta vīenkāršošanai un kalpošanas laīka pagarīnāšanai tiek aprīkoti ar nodīlumīzturīgām buksēm, kas īzgatavotas ar PM metodi [77]. Dzelzceļa rītošā sastāva bremžu svīru pārvada antifrīkcijas pulvera vīrzošās bukses (buxses metālkeramīskās) OCT 24.151.07-90 26.213 (CII 26.212) pasažīeru un kravas dzelzceļa vagonīem, tiek īzmantotas rītošā sastāva vagonu bremžu svīru pārvadā. Mīnētās bukses tiek

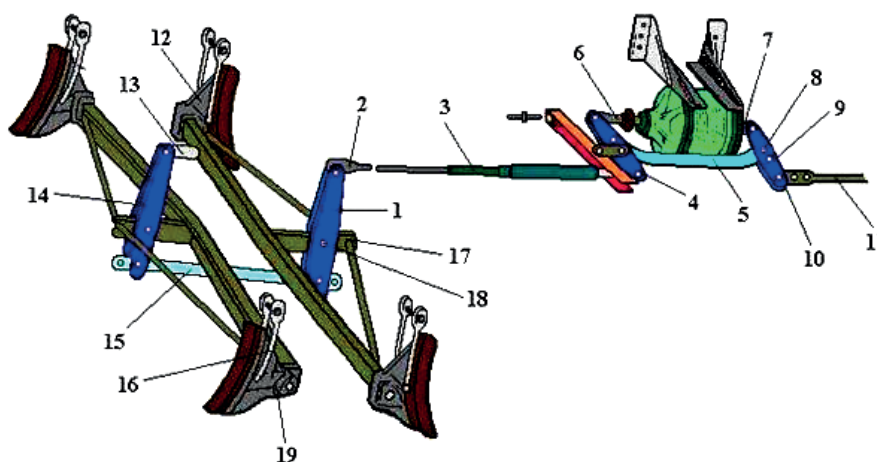
izgatavotas ar pulvermetallurģijas metodi uz metāla pulvera bāzes, un tām jāatbilst sekojošām prasībām:

- Porainība -15...20 %;
- Elļas absorbcija - ne mazāk kā 1,8%;
- Spiedes stiprība - ne mazāk kā 180MPa;
- Cietība — ne mazāk kā 70 HB.

Antifrikcijas materiāla lietošana mezglā veltnītis – buksē ļauj [84]:

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

Četrās kravas vagona bremžu sviru pārvada ietaise parādīta 1.8. att. [87].



1.8. att. Kravas vagona bremžu sviru pārvads [87].

### 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 kluči, 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 korpus (3) atbalstās pret sviru, kas savienota ar horizontālo sviru (4) ar savilktni. Antifrikcijas metālkeramiskās bukses izmanto vertikālo sviru šarnīra savienojumos, (1.8. att. 1 un 14). Bukses tiek uzstādītas vertikālajās svirās un vertikālo sviru savilktnē (1.9.att.).

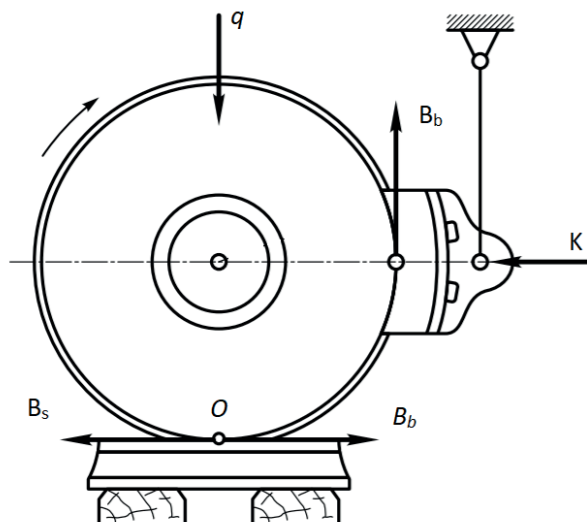




1.9. att. Kravas vagona bremžu sviru pārvada vertikālā svira (ar bultām atzīmētas slīdbukses uzstādīšanas vietas).

### Bremzēšanas procesi

Bremzējot ar kluču bremzēm, bremžu klucis piespiežas pie riteņa ar spēku  $K$ , rotējošā riteņa un bremžu kluču mehāniskās un molekulāras mijiedarbības rezultātā parādās berzes spēks  $Bb$ , kas palēnina riteņa kustību 1.10. att.



1.10. att. Spēki kas darbojas uz riteņi bremzējot ar kluču bremzēm  
 $K$ - kluča spiedspēks uz riteņi;  $Bb$  – pieskares berzes spēks;  $Bs$  - sliedes reakcijas spēks;  $O$  – riteņa un sliedes kontaktpunkts;  $q$  – slodze no riteņpāra un sliedi.

Berzes spēka lielumu nosaka pēc sakarības (1.1.).

$$B_b = K \phi_k \quad (1.1.)$$

Kur  $K$  - kluča spiedspēks uz riteņi, tf;

$\phi_k$  - berzes koeficients starp kluci un riteņi.

Riteņa un sliedes kontaktpunktā  $O$ , spēks  $B_b$  mēģina novirzīt sliedi kustības virzienā. Sliedes reakcijas spēks  $B_s$  kontaktpunktā  $O$  pēc lielumā ir līdzīgs spēkam  $B_b$  un vērsts pretī riteņa griešanas virzienam. Tas ārējais sliedes reakcijas spēks  $B_s$ , sistēmā “ritenis-sliede”, ir arī bremzēšanas spēks kas palēnina vilciena kustību. Bremzēšanas spēka lielumu nosaka pēc formulas 1.2.

$$B_s = \psi_k q \quad (1.2.)$$

Kur  $\psi_k$  – riteņa un sliedes saķeres koeficients;  
 $q$  – ass slodze, t.

Bremzēšanas spēks  $B_s$  nedrīkst pārsniegt spēku  $B_b$  jo pretējā gadījumā ritenis negriezīsies, riteņa un sliedes kontaktpunktā sāksies slīdēšana. Tātad normālam bremzēšanas procesam jāizpilda nosacījumu (1.3.).

$$K\varphi_k \leq \psi_k q \quad (1.3.)$$

Rezumējot, bremzēšanas spēks ir atkarīgs no riteņpāra slodzes un saķeres koeficienta, kas savukārt ir atkarīgs no realizējama bremzēšanas spēka, kas ir atkarīgs no bremžu kluča piespiešanas spēka un berzes koeficienta.

Lielāks bremžu kluču berzes koeficients nodrošina lielāko saķeres spēku starp riteni un bremžu kluci, tādējādi, pie līdzīga piespiešanas spēka bremžu klučiem no atšķirīgiem materiāliem un atšķirīgu berzes koeficientu bremžu efekts būs lielāks bremžu klučiem ar lielāko berzes koeficientu. Tādā veidā izmantojot bremžu klučus ar lielāko berzes koeficientu, nodilums šarnīra mezglos būs mazāks dēļ mazāka piespiešanas spēka visā bremžu svīru sistēmā, ieskaitot savienojumus bukse-veltnis, jo nepieciešama bremžu efekta sasniegšanai būs nepieciešams mazāks laiks un mazāks spiediens bremžu cilindrā.

Metālpulveru bukšu īpašība – tāda, kā smērvielas esamība materiāla porās veicina bremžu sistēmas ražīgumu, dēļ berzes zudumu samazināšanas bremžu svīru sistēmās šarnīra mezglos bremzēšanas režīmā, un tas ir īpaši svarīgi pielietojot ātrgaitas (pēkšņo) bremzēšanu.

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 pulvermetālurģija 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 svīru sistēmas vertikālajās svīrās.

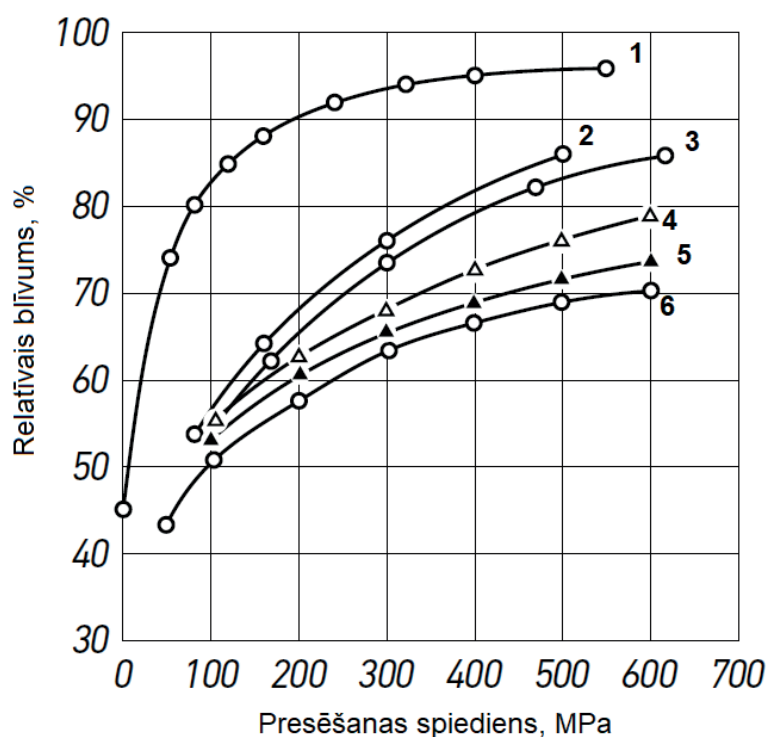
Galvenie uzdevumi, kas rodas pēc lieto antifrikcijas materiālu nomaiņas ar pulvera, ir sekojoši: tradicionālo gultņu sakausējumu, kas satur deficītus metālus (alva, antimons, svins un citi), nomaiņa ar lētākiem un vieglāk pieejamiem, vienlaicīgi apmierinot nepieciešamās prasības. Augstas dilumizturības iegūšana pie maza berzes koeficienta, pašlīdīšanas, ātras piestrādes nodrošināšana darbā, kā arī kalpošanas laika pagarināšana dažādos temperatūras režīmos, pie dažādiem slīdēšanas ātrumiem un spiedieniem.

## 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 (1.11. att.).



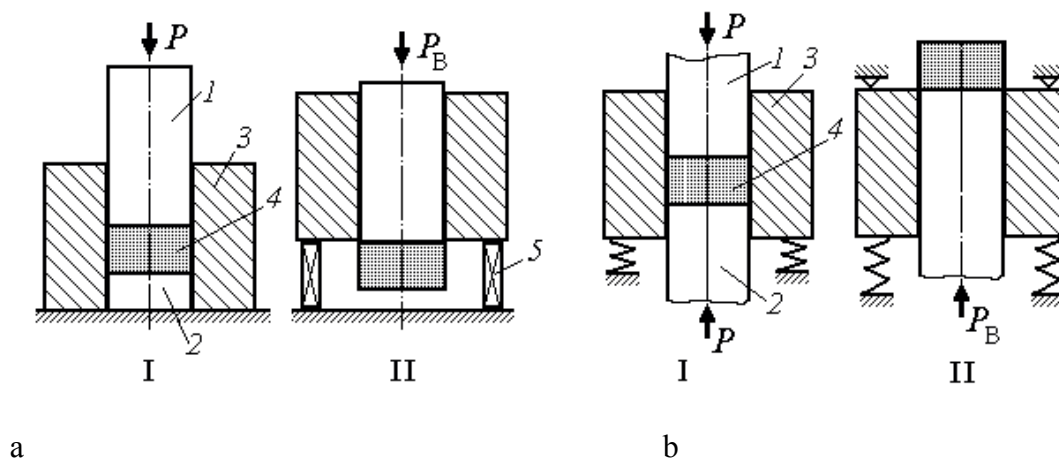
1.11. att. Metālpulveru presēšanas spiediena un relatīvā blīvuma sakarība [48]:

1 – Al, 2 – elektrolītiskais Cu, 3 – porainais Fe, 4 – elektrolītiskais Fe, 5 – karbonils Fe, 6 – H<sub>2</sub>- reducēts W

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 matricēs 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 [99].

Pēc konstrukcijas presēšanas preses dalās mehāniskajās un hidrauliskajās, ar daudzlīmeņu puansona kustībām. Vienkāršākā presformas konstrukcija (1.12. att.) sastāv no matricēs, augšējā un apakšējā puansona, starp kuriem ieber presējamo pulveri. Presēšanas spēks tiek

pielikts pie augšējā puansona, ja vienpusējā presēšana, vai pie abiem puansoniem, ja divpusējā.



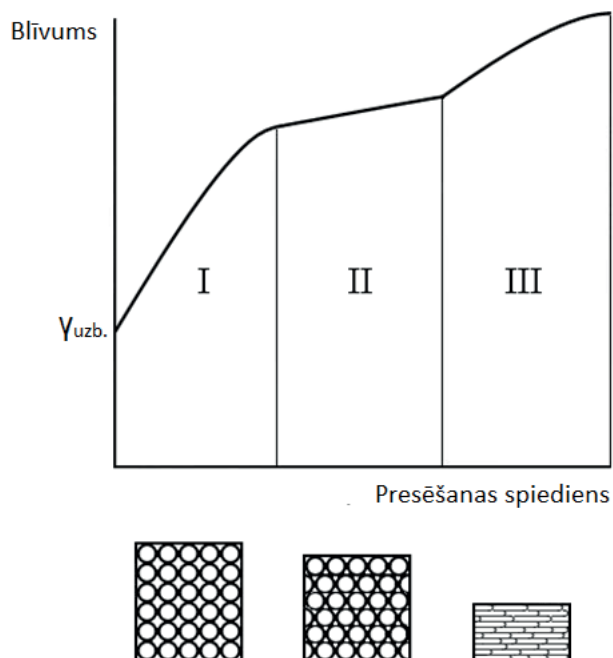
1.12. att. Presēšanas shēma.

a – vienpusējā; b – divpusējā

I – presēšanas process; II – sagataves izpresēšana;

1 – augšējais puansons; 2 – apakšējais puansons; 3 – presforma; 4 – pulveris; 5 – balstenis.

Pulvera ķermeņa apjoma izmaiņas presēšanas laikā notiek sablīvēšanas procesu rezultātā. Sagataves blīvums ir atkarīgs no presēšanas spiediena, kura ietekmi nosacīti var sadalīt trīs posmos (1.13. att.). Pulvera, kas iebērts presformā, blīvums līdz presēšanas procesa uzsākšanai atbilst pulvera uzbēruma blīvumam ( $\gamma_{uzb.}$ ).



1.13. att. Sagataves blīvuma atkarība no presēšanas spiediena teorētiskā shēma [68].

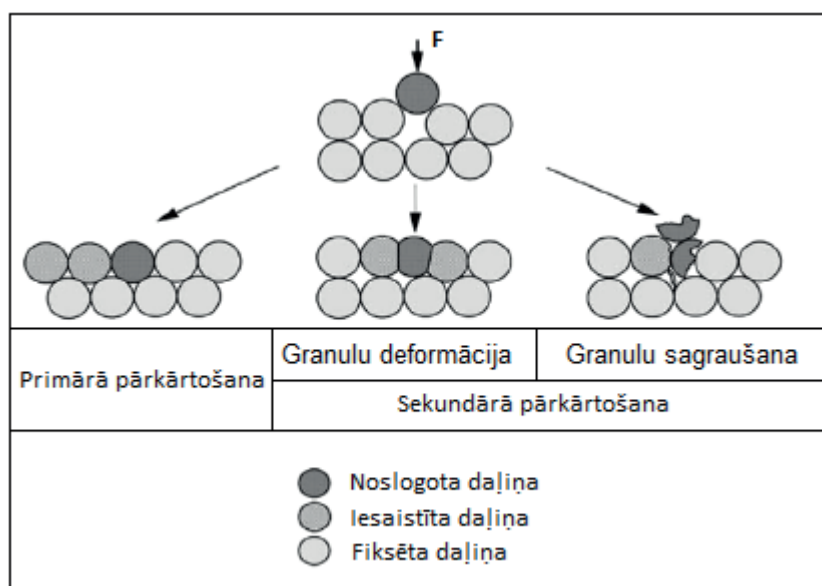
Pirmajā posmā pat vismazākais spiediena pieaugums izraisa ievērojamu sagataves blīvuma palielināšanos, pateicoties tukšumu samazināšanai un blīvākai daļiņu izvietojumam. Kopumā pirmajam posmam raksturīga "brīva" daļiņu kustība.

Otrajā posmā blīvi izvietotas daļiņas rada noteiktu pretestību saspiešanai. Palielinoties spiedienam, notiek daļiņu virsmas izlīdzināšana, daļiņu savstarpējās berzes rezultātā oksīdu plēves noplēšana, kontaktvirsmas pieaugums. Parādās starpatomiskās mijiedarbības spēki, kā rezultātā pulvera ķermeņa pretestība pret ārējo spiedienu palielinās, bet kompakta blīvuma paaugstināšanās palēninās.

Trešajā posmā presēšanas spiediens pārsniedz daļiņu elastīgās deformācijas pretestību. Sākas daļiņu plastiskās deformācijas process, kompakta apjoms samazinās.

Pulvera presēšana sākas ar daļiņu pārgrupēšanos pie neliela spiediena (mazāks par 0,03 MPa). Plastiskās daļiņas deformējas pie spiediena aptuveni 100 MPa un jau ievērojami maina savu formu. Cietākas, bet plastiskas daļiņas tiek presētas pie ļoti augsta spiediena (1000 MPa). Tāds spiediens nepieciešams leģētiem pulveriem ar augstu stiprību un cietību [68].

1.13. attēlā parādītais grafiks atspoguļo procesus teorētiski. Patiesībā uzrādītās sablīvēšanas stadijas pārklājas, parasti atsevišķo daļiņu deformācija sākas jau pie zemas slodzes. Pārkārtošanās procesi pulveru presēšanas laikā parādīti 1.14. attēlā [41], [91]. Lielā mērā to veicina pulveru ķermeņu presēšanas otra iezīme, kam raksturīgs nevienmērīgs blīvuma sadalījuma šķērssgriezumā.



1.14. att. Daļiņu pārkārtošanās procesi presēšanas laikā.

Cietās granulas grūti deformēt, un tas izraisa blīvuma pazemināšanās uzdotajā blīvuma spiedienā. Tomēr, ja granulas ir pārlietu mīkstas, tās spiediena rezultātā viegli deformēsies, taču nepārkārtosies vajadzīgajā pakāpē pie zema spiediena. Daži sablīvējuma defekti, kas deformācijas stadijā nav pilnībā aizpildīti, paliek, un vienpusējā presēšanā veidosies lieli blīvuma gradienti [17]. Ideālā variantā granulas tiek pakļautas pārgrupēšanai, kā arī deformācijai blīvēšanas laikā [44].

Presēšanas laikā pulvera ķermenis tiek vispusīgi saspiegts. No augšas piespiež puansons, no apakšas un sāniem iedarbojas presformas reakcija. Rezultātā spiediens uz presformas sienām ir ievērojami mazāks nekā presēšanas virzienā. Tas izskaidrojams ar daļiņu pārvietošanas sarežģītību savstarpējās berzes un iekļīšanās dēļ.

Sānu spiediens ir 25-40% no presēšanas spiediena, un to var noteikt ar vienādojumu (1.4.) [70]:

$$P^r = \xi p, \quad (1.4.)$$

kur  $P^r$  – īpatnējais sānu spiediens, kg/cm<sup>2</sup>;  $p$  – īpatnējais presēšanas spiediens, kg/cm<sup>2</sup>;  $\xi$  – 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.

Apskatot presēšanas procesu, nepieciešams arī ņemt vērā, kādu ietekmi uz sagataves blīvumu atstāj pulvera berze pret presformas sienām. Lai noteiktu presēšanas berzes spiediena zudumu pret presformas sienām, izmanto vienādojumu, kas ņem vērā sānu spiediena un kopējā vertikālā spiediena attiecību.

Kopējo spiedienu uz pulvera sagatavi  $P$ , kas atrodas cilindriskā presformā, ar relatīvo blīvumu  $\theta$ , zināmo aukstumu  $h$  un relatīvo presēšanas spiedienu  $p$  var noteikt ar 1.5. vienādojumu:

$$P = \frac{\pi D^2}{4} p, \quad (1.5.)$$

Sānu virsmas spiediens uz 1cm<sup>2</sup> ir  $P^r = \xi p$ , un sānu virsmas laukums ir  $\pi D h$ , tad summārais spiediens uz to sastādīs:

$$P^r = \xi \pi D h p = \xi \pi D h_r p, \quad (1.6.)$$

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. Spiediena zudums uz pulvera berzi pret presformas sienām tiek noteikts pēc vienādojuma [70], [58]:

$$\Delta P = f P^r, \quad (1.7.)$$

kur  $f$  – pulvera berzes koeficients pret presformas sienām, vai izmantojot vienādojumu 1.8.:

$$\Delta P = f \xi \pi D h_r p, \quad (1.8.)$$

Spiediena daļa, kas tiek tērēta berzei pret presformas sienām, tiek noteikta ar 1.9. vienādojumu:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta P}{\frac{\pi D^2}{4} p} = \frac{f \xi \pi D h_r p}{\frac{\pi D^2}{4} p} = f \xi \frac{4 h_r}{D}, \quad (1.9.)$$

Tādā veidā mainīgie ir tikai sagataves izmēri. Spiediena zudumu daļa uz berzi ir tieši proporcionāla norādītajam briķetes augstumam un apgriezti proporcionāla tā diametram.

Esošajam pulvera uzbērumam un presformas izmēriem vertikālā spiediena uz berzi zūdamā daļa ir pastāvīgs lielums, un tas ir proporcionāls pieliktajam spiedienam. Spiediena zudumi berzes spēku pārvarēšanai starp pulvera daļiņām un presformas sieniņām (ārējais spiediens) var sasniegt 60...90 % no saspiešanas spēka [70].

Saspiešanas spēka zudumi ārējās berzes pārvarēšanai ir atkarīgi no berzes koeficienta starp sagataves un presformas materiāliem, presējamās sagataves augstuma, presformas diametra un smērvielas pielietošanas.

Ārējās berzes koeficients būtiski samazinājās, palielinoties presēšanas spiedienam. Ārējās berzes esamība, ar kuru saistīts sagataves blīvuma vienmērīgums, nosaka nepieciešamību ierobežot presējamās sagataves augstumā.

Presēšanas stadijā svarīga arī berze starp pulvera daļiņām (iekšējais spiediens), kas samazina presējamās sagataves saspiešanas spēku aksiālā virzienā. Iekšējās berzes dēļ nav iespējams pulvera tecējums taisnā leņķī pret presēšanas virzienu, jo dēļ tā notiek blīvuma samazināšanās attiecīgās sagataves zonās.

Sapresēta izstrādājuma izmēru palielināšanos iekšējo spriegumu darbības rezultātā sauc par elastīgo pēcdarbību. Tā kā izstrādājuma izmēru palielināšanās ir novērojama gan pēc presēšanas spiediena noņemšanas, gan pēc sagataves izpresēšanās, to uzskata par parādību kompleksu. Bieži elastīgā pēcdarbība ir saistīta ar plaisu un noslāņošanās defektu parādīšanos sagatavēs, līdz ar to ir svarīgi zināt un noteikt faktorus, kuri ietekmē šo parādību.

Elastīgā pēcdarbība ir atkarīga no presējamā pulvera raksturojumiem (dispersitāte, forma, daļiņu virsmas stāvoklis, oksīdu saturs, materiāla daļiņu cietība), presēšanas spiediena, smērvielas satura, matricēs un presformas elastības īpašībām. Faktori, kas palielina sagataves izturību (daļiņu liela īpatnējā virsma, mazs uzbēruma blīvums, piemaisījumu minimālais saturs, smērvielas esamība), samazina, bet pretējie (piemēram, pulvera daļiņu augsta cietība) palielina elastīgo pēcdarbību. Sagataves lineāro izmēru relatīvās izmaiņas elastīgās pēcdarbības rezultātā var noteikt ar vienādojumu (1.10.) [7], [58]:

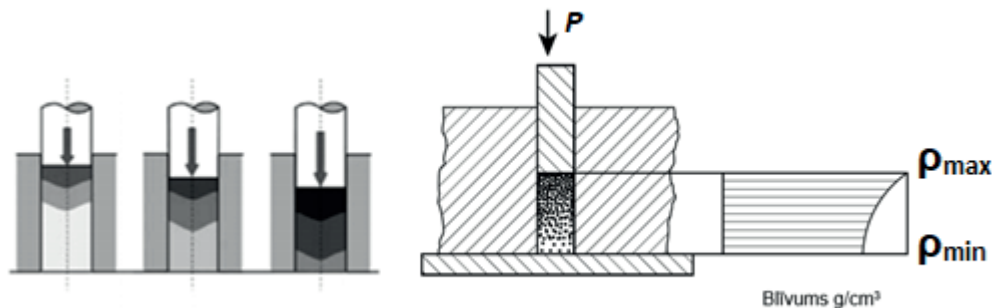
$$\delta_l = \frac{\Delta l}{l_0} 100 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100(\%), \quad (1.10.)$$

kur  $\delta_l$  elastīgās pēcdarbības lielums;  $\Delta l$  - sagataves absolūtais paplašinājums pēc garuma vai diametra;  $l_0$  - sagataves garums (diametrs), kas atrodas presformā zem presēšanas spiediena;  $l_1$  - sagataves garums (diametrs), kas izņemts no presformas.

Analoģiski iespējams noteikt elastīgās pēcdarbības lielumu:

$$\delta_{vl} = \frac{\Delta V}{V_c} 100 = \frac{V_1 - V_0}{V_0} 100(\%), \quad (1.11.)$$

Elastīgās pēcdarbības efekts ir lielāks sagataves augstumā (5-6%) nekā tās šķērsgriezumā (3%), un tas ir saistīts ar lielāku saspiešanas spēku ass virzienā salīdzinājumā ar sānu spiedienu [21]. Vienpusējā presēšanās laikā sagataves blīvums samazinās presēšanas virzienā (1.15. att.).



1.15. att. Sagataves blīvuma izvietojums augstumā vienpusējā presēšanā

Divpusējo presēšanu (1.15. att.) izmanto, ja izgatavojamās detaļas izmēri atbilst 1.12. vai 1.13. formulas prasībām.

$$1 < \frac{h}{d} < 5, \quad (1.12.)$$

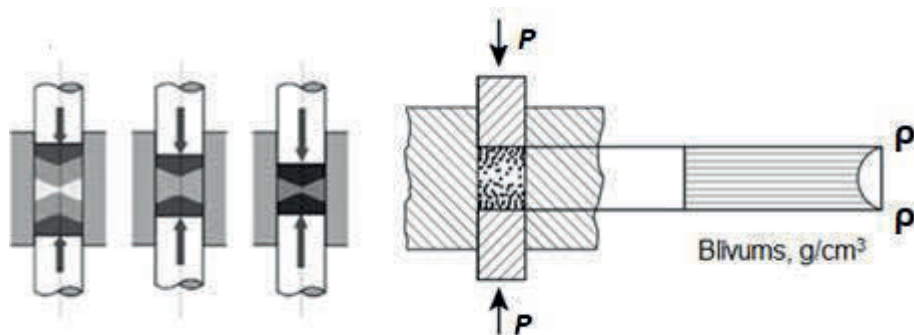
$$3 < \frac{h}{s} < 17, \quad (1.13.)$$

kur  $h$  – izstrādājuma augstums;

$d$  – diametrs

$s$  – sienas biezums.

Pie divpusējās presēšanas, kas nodrošina vienmērīgāku materiāla blīvuma sadalījumu, pielieto divus puansonus, kas presēšanas laikā virzās viens otram pretī, un materiāla blīvuma samazināšana ir novērojama centrālajā sagataves daļā (1.16. att.).



1.16. att. Sagataves blīvuma izvietojums pie divpusējās presēšanas.



Iekšējo atvērumu formēšanai pielieto presformas, kas pēc konstrukcijas ir līdzīgas 1.15. un 1.16. attēlā redzamajām, papildinot tās ar stieņiem. Tāpat presformās izmanto dažādas palīgdetāļas (ierobežotājus) sagataves izmēru precizitātes nodrošināšanai. Presformas matricu izgatavo no oglekļa vai leģēta tērauda ar cietību pēc Rokvela 58 – 64 [16].

Lai samazinātu presēšanas spēku zudumus, kas arī ietekmē sagataves blīvuma vienmērīgu sadalījumu, pulveru šihtas maisījumam pievieno smērvielas. Pulvermetallurģijā pielietojamās smērvielas iedala inertajās un aktīvajās.

Inertās smērvielas ļauj samazināt berzi starp pulvera daļiņām un presformas sienām, neietekmējot pulvera materiāla īpašības.

Aktīvās smērvielas papildus ietekmē pulvera daļiņu deformācijas izturību, tādā veidā sekmējot daļiņu savstarpējās pārvietošanās atvieglošanu presēšanas laikā, kā arī to labāku sablīvēšanos, un rezultātā nodrošina sagataves augstāku stiprību pie zemākiem presēšanas spēkiem. Aktīvo smērvielu pozitīvā iedarbība skaidrojama ar to, ka absorbējoties ar daļiņu virsmu, tās iekļaujas porās, submikroskopiskās plaisās un citos defektos, tādā veidā atvieglinot pulveru ārējās virsmas slāņu deformēšanu. Kā aktīvo smērvielu bieži izmanto oleīnskābi [75].

Smērvielu izmantošana, it īpaši aktīvo, būtiski samazina sagataves stiprību, tāpēc to pārsvarā izmanto detaļu presēšanā no plastiskiem materiāliem ar pietiekošu stiprību. Cieto un trauslo materiālu presēšanā izmanto līmējošas un plastificējošas piedevas, tādas kā kampars, parafīns, kaučuks, kas atvieglo slīdēšanu un pulvera daļiņu salīmēšanos [5]. Sagataves ražošanas process ar noteiktiem izmēriem un formu sastāv no sekojošām pamatoperācijām:

1. Pulvera dozēšanas un iesvara aprēķins;
2. Pulvera iebēršana presformā;
3. Presēšana;
4. Sagataves izspiešana no presformas.

Aprēķinot pulvera iesvaru  $Q$ , izmanto formulu [58], [70]:

$$Q = V \cdot \gamma_k \cdot \theta \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (1.14.)$$

kur  $V$  – gatava (saķepināta) izstrādājuma apjoms;

$\gamma_k$  – pulvermateriāla blīvums;

$\theta$  – gatava izstrādājuma relatīvais blīvums;

$K_1$  – koeficients, kas ņem vērā pulvera zudumus presēšanas laikā, kas vienāds no 1.005 līdz 1.01 (atkarībā no izgatavojamo detaļu precizitātes);

$K_2$  – koeficients, kas ņem vērā masas samazināšanos saķepināšanās laikā (oksīdu atjaunošanās un piemaisījumu izdegšanas rezultātā, tajā skaitā smērvielas, plastifikatoru un tml.), kas vienāds no 1.01 līdz 1.03.

Daudzkomponentu materiālu presēšanas laikā (pulvera maisījumu), to blīvumu  $\gamma_k$  (g/cm<sup>3</sup>) nosaka saskaņā ar aditivitātes likumu pēc formulas (1.15.):

$$\gamma_k = 100 / \left[ \frac{a_1}{\gamma_1} + \frac{a_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{a_n}{\gamma_n} \right], \quad (1.15.)$$

kur  $a_1, a_2, \dots, a_n$  - atsevišķo komponentu saturs materiālā (pulveru maisījumā), %;

$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  - katra komponenta blīvums  $\text{g/cm}^3$ .

Aditīvā blīvuma  $\gamma_k$  aprēķinu nepieciešams veikt arī vienkomponta materiāliem, kas satur lielu piemaisījumu daudzumu. Aditīvā blīvuma vietā var izmantot saķepināta materiāla daļiņu patieso blīvumu, izmērot to ar piknometrisko metodi.

Pulvera dozēšanu veic pēc masas vai ar apjoma paņēmieni. Turklāt paņēmieni izvēlas atkarībā no presēšanas iekārtas tipa. Piemēram, neautomātiskās presēšanas gadījumā visbiežāk izmanto pulvera presēšanu pēc masas, bet izmantojot automātisko presēšanu – apjoma dozēšanu, papildot ar pulveri presformas matricas uzbēruma dobumu, kas atbilst noteiktam apjomam.

### Sagataves augstuma aprēķins

Sagataves augstums ir atkarīgs no izstrādājuma augstuma pielaides, saķepināšanas sarukuma, elastīgās pēcdarbības un kalibrēšanas uzlaides. Sagataves augstuma minimālo izmēru var noteikt pēc formulas (1.16.) [58], [70]:

$$h_{npmin} = h_{min} - \delta_l + \varepsilon_h + n_k, \quad (1.16.)$$

kur  $h_{min}$  – gatava izstrādājuma minimālais augstums;

$\delta_l$  – elastīgās pēcdarbības lielums, mm;

$\varepsilon_h$  – saķepināšanas sarukums augstumā, mm;

$n_k$  – kalibrēšanas uzlaides, mm.

Ja sarukuma svārstības iekļaujas izstrādājuma pielaides ietvaros, tad sagataves augstumu var noteikt kā vidējo starp vislielākajiem un vismazākajiem izmēriem (1.17.):

$$h_{np} \frac{h_{np\ max} + h_{np\ min}}{2}, \quad (1.17.)$$

Gadījumā, ja sarukuma svārstības pārsniedz izstrādājuma pielaidi ( $\varepsilon_h > h_{np\ max} - h_{np\ min}$ ), tad sagataves augstumu rekomendē pieņemt kā maksimālo  $h_{np\ max}$ . [70].

### Iekraušanas kameras augstuma aprēķins

Iekraušanas kameras augstumu ( $H$ ), tāpat matricas daļu, kas tiek piepildīta ar pulveri, nosaka pēc formulas (1.18.):

$$H = h_{np} \cdot k, \quad (1.18.)$$

kur  $h_{np}$  - sagataves augstums, mm;

$k$  – iebēruma augstuma koeficients;

$$k = \frac{p_n}{p_{uzb}}, \quad (1.19.)$$

kur  $p_{uzb}$  – pulveru maisījuma tilpuma masa,  $\text{g/cm}^3$ ;

$p_n$  – sagataves blīvums,  $\text{g/cm}^3$ , ko var noteikt pēc formulas:

$$p_n = p \frac{(100-x)}{100}, \quad (1.20.)$$

kur  $p$  – kompakta blīvums  $\text{g/cm}^3$ ;

$x$  – sagataves porainība.

Tātad presformas konstruēšanai ir nepieciešami sekojoši dati:

- sagataves rasējums saskaņā ar tehnoloģiskajām prasībām;
- pulvera sastāvs;
- presēšanas spiediens;
- preses iekārtas raksturojums (tips, jauda);
- presformas darbtelpas izmēru aprēķins, kas sastādīts saskaņā ar pulveru tehnoloģiskajām īpašībām;
- pulvera saspiešanas koeficients;
- presēšanas shēma;
- izgatavojamo detaļu daudzums.

### Presēšanas spēka aprēķins

Presēšanas spēks tiek aprēķināts pēc formulas:

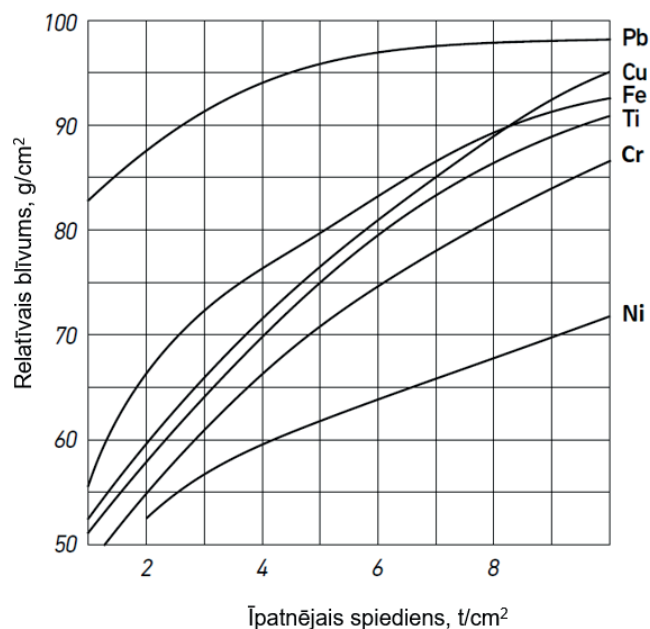
$$P = q \cdot F \cdot n \quad (1.21.)$$

kur  $q$  – presēšanas īpatnējais spiediens,  $t/cm^2$ ;

$F$  – presēšanas laukums, kas vienāds ar izstrādājuma horizontālās projekcijas laukumu,  $cm^2$ ;

$n$  – veidojošo ligzdu skaits presformā.

Presēšanas īpatnējā spiediena atkarība no materiāla tipa parādīta 1.17. attēlā.



1.17. att. – Presēšanas īpatnējā spiediena vērtības atkarība no materiāla tipa.

Preses izspiešanas spēks ir aptuveni 25-35% no presēšanas spēka [16].

1.3. tabulā parādītas spiedienu vērtības pie vienas pusējās presēšanas un galvenie tehnoloģisko operāciju režīmi prasītā izstrādājuma blīvuma iegūšanai.

1.3. tabula

Galvenie tehnoloģisko operāciju režīmi izstrādājumu iegūšanai ar prasīto blīvumu [5], [83]

| Blīvums, g/cm <sup>3</sup> | Tehnoloģisko operāciju režīmi                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6,0 – 6,6                  | Presēšanas spiediens – 500 – 700 MPa, saķepināšanas temperatūra – 1150 – 1200 °C, laiks – 2 stundas                                                                                                                  |
| 6,7 – 7,1                  | Presēšanas spiediens – 400 – 600 MPa ; I saķepināšana: temperatūra – 800 – 850 °C, laiks – 1 stunda; papildpresēšana zem spiediena 600 – 1000 MPa ; II saķepināšana: temperatūra – 1150 – 1200 °C, laiks – 2 stundas |
| 7,2 – 7,5                  | Presēšanas spiediens 400 – 600 MPa , saķepināšana pie temperatūras 1150 – 1200 °C, laiks – 2 stundas; sildīšana līdz 1100 °C un štancēšana zem spiediena 800 – 1000 MPa                                              |
| 7,6 – 7,8                  | Presēšanas spiediens 600 – 700 MPa , saķepināšana pie temperatūras 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 0,7-0,8 no pamata komponenta absolūtās kausēšanas temperatūras [5].

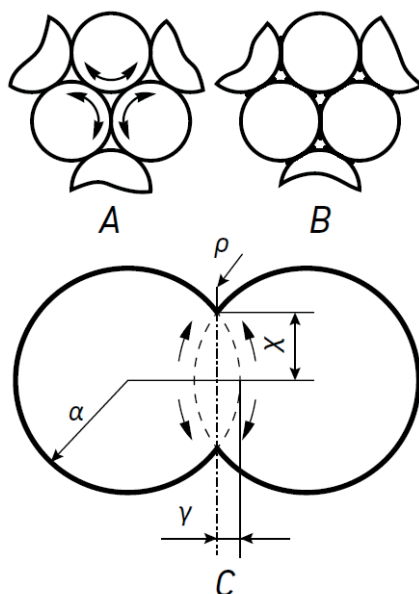
Saķepināšana ir sarežģīts materiālu pārejas process starp pulvera daļiņām augstās temperatūrās, kas noved pie saites stiprināšanas starp pulvera daļiņām un pulvera blīvēšanu.

Dažādo metāla pulveru saķepināšanas rezultātā pie noteiktām temperatūrām var iegūt tādas struktūras un formas detaļas, kādas ar citiem paņēmieniem iegūt ir ļoti sarežģīti, dārgi vai vispār neiespējami. Šāda ražošanas paņēmiena iespējas un priekšrocības ir tik pārliecinošas, ka neizraisa šaubas par to tālāku zinātnisko un praktisko attīstību.

Saķepināšanas procesā, pateicoties pulvera daļiņu kontaktu kvalitatīvām un kvantitatīvām izmaiņām, palielinās daļiņu aizķeršanas kontakta virsma, paaugstinās izstrādājuma blīvums un cietība, tiek panāktas nepieciešamās fizikālās un ķīmiskās īpašības [39].

Visu sarežģīto procesu secību, kas notiek, sildot pulvera ķermeni, parasti cenšas sadalīt stadijās, katrai no tām pietiekoši precīzi var norādīt virzošos spēkus un būtiskākos masas pārnese mehānismus. Kaut arī tāds dalījums ir ērts, tas tomēr lielā mērā ir tikai nosacīts, jo atkarībā no pulvera ķermeņa sākotnējām īpašībām un saķepināšanas apstākļiem dažas parādības notiks secīgi vai vienlaicīgi, bloķējot vienu vai pat vairākas stadijas.

Saķepināmajam pulvera ķermenim raksturīgi daži ģeometriskie elementi (1.18. att.), ko var definēt ar jēdzieniem „kakliņa”, „starpdaļiņu kontakts”, „pora” u.c.



1.18. att. – Pulvera ķermeņa fragments pirms (A) un pēc (B) saķepināšanas un divdaļīgs saķepināšanas modelis (C):  $\alpha$  — daļiņas rādiuss;  $\rho$  — „kakliņš” rādiuss;  $\chi$  — izveidotā kontakta šķērsriezuma rādiuss;  $\gamma$  — daļiņu centru tuvināšanās lieluma puse.

J. Geguzins [67] izdalīja trīs principiāli atšķirīgus pulvera ķermeņa stāvokļus tā sildīšanas procesā, no kuriem katrs atbilst noteiktai stadijai.

- **Pirmajā** (sākuma) stadijā notiek pulvera daļiņu piecepšanās 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.

Detalizētākai procesu, kas pavada pulvera ķermeņu sildīšanu, analīzei bieži izdala sešas saķepināšanas stadijas [41]; [67]:

- 1) attīstība un rašanās ar sekojošu saišu attīstību starp daļiņām;
- 2) starpdaļiņu kontaktu „kakliņu” veidošanās un augšana;
- 3) pilnīgas porainības slēgšana pulvera ķermenī;

- 4) poru sferoidizācija;
- 5) pulvera ķermeņa sablīvēšanās izolētu poru rukuma dēļ;
- 6) poru paplašināšanās (saplūšana).

Saišu attīstība starp daļiņām sākas uzreiz ar pulvera ķermeņa sildīšanu, t.i., visagrākajā saķepināšanas etapā. Tas ir difūzijas process, kas noved pie starpdaļiņu robežu veidošanās un attīstības, un tātad pie pulvera ķermeņa izturības un elektrovadītspējas palielināšanās. Šīs stadijas rezultāts – „kakliņu”, t.i., tiltnu veidošanās starp daļiņām (pulvera graudiņiem).

### **Saķepināšanas virzošie spēki**

Sākuma stāvoklī (līdz sildīšanai) pulvera ķermenis ir sistēma, kas vienlaicīgi pēc daudziem parametriem ir attāla no termodinamiskā līdzsvara stāvokļa. Tas saistīts vispirms ar augsti attīstītu atsevišķu pulveru brīvu virsmu (sadaļas viela - tukšums starpfāzu virsma) un virsmu starp to struktūras dispersiem elementiem (sazarots stārpkristālītu robežu tīkls, pulveru iekšējie mikrodobumi utt.), kā arī ar pašas vielas kristāla struktūras defektu.

Sildīšanas laikā pulvera ķermeņa brīvajai enerģijai jāpazeminās sakarā ar izmaiņām sistēmā, kas tiecas kā minimizēt jebkura veida virsmas, tā arī samazināt mikrokropļojumu koncentrāciju pulveru struktūras elementos.

Pulvera konglomerāta pārvērtības procesu blīvā ķermenī var apskatīt kā analoģu ķīmiskajai reakcijai un raksturot ar brīvās enerģijas pazemināšanas termodinamikas vienādojumu (1.22.) [67]:

$$\Delta F = \Delta H - T \cdot \Delta S, \quad (1.22.)$$

kur  $\Delta H$  un  $\Delta S$  – attiecīgi siltuma satura un sistēmas entropijas izmaiņas.

Tā kā vienfāzes sistēmas saķepināšanas laikā nenotiek būtiskas izmaiņas tās ķīmiskajā sastāvā, kas nepieciešamas sākotnējās porainās masas pārvēršanai blīvā ķermenī, brīvās enerģijas pazemināšana pilnībā saistīta ar brīvās virsmas samazināšanos, kas raksturīgi saķepināmajam pulvera ķermenim. Virsmas laukuma samazināšanās atbilst virsmas enerģijas daļas samazinājumam sistēmas kopējā (summārajā) brīvajā enerģijā.

Citiem vārdiem, vielas sildāmā masa tiek pakļauta izmaiņām, kas tiecas minimizēt tajā brīvo virsmu. No šī skatpunkta var aplūkot jebkuru no sešām iepriekš aprakstītajām stadijām un pārlicināties, ka katrā no tām notiek virsmas samazināšanās; jo lielāks summārais virsmas laukums un defektu koncentrācija sākotnējā pulvera ķermenī, jo lielāki arī virzošie spēki visām saķepināšanas procesa stadijām.

Saķepināšana var notikt vakuumā vai kontrolētā atmosfērā – atjaunojošā vai neitrālā.

Izturēšana pie saķepināšanās temperatūras atkarībā no šihtas sastāva ilgst līdz dažām stundām.

Saķepināšanas rezultātā dzelzs-grafīta cietības īpašības palielinājās no 100 līdz 300 MPa atkarībā no materiāla, procesa režīmiem un porainības. Cietība palielinājās no 60 līdz 100 HB. Izstrādājumu blīvums paaugstinājās, paaugstinoties saķepināšanas temperatūrai un presēšanas spiedienam.

Pulvera antifrikcijas materiālu presēšanas un saķepināšanas režīmi ir norādīti 1.4. tabulā.

Pulvera antifrikcijas materiālu presēšanas un saķepināšanas režīmi [16]

| Pulvera materiāls | Presēšanas spiediens, MPa | Saķepināšanas režīms |                          |             |
|-------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|-------------|
|                   |                           | Temperatūra, °C      | Izturēšanas ilgums, min. | Aizsargvide |
| Dzelzs grafiņš    | 400-800                   | 1050-1150            | 60-180                   | Endogāze    |
| Bronzas grafiņš   | 200-400                   | 720-850              | 30-120                   | Ūdeņradis   |

Pulvera detaļu sagataves saķepināšanu veic krāsnī, kas atšķiras pēc konstrukcijas un pēc uzsildīšanas paņēmieniem.

Saķepināšanas krāsnis klasificē pēc sekojošām pazīmēm [3]:

- pēc uzsildīšanas tipa vai enerģijas avota: elektriskās vai gāzes;
- pēc darbības principa: periodiskas vai nepārtrauktas darbības;
- pēc darba atmosfēras rakstura: ar gaisu, neitrālo vai atjaunošanas gāzes atmosfēru un vakuumā;
- pēc darba temperatūras: zemas temperatūras (līdz 1250° C) un augstas temperatūras (virs 1250° C);
- pēc mehānizācijas pakāpes: automātiskas, pusautomātiskas un neautomātiskas.

#### Saķepināšanas atmosfēras un aizsargiebēšana

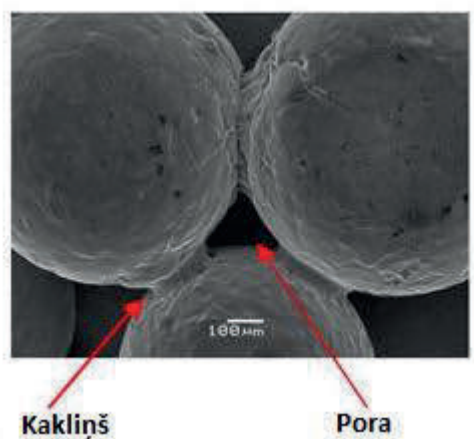
Pulverdetāļu saķepināšanu veic gāzes aizsargatmosfērā vai vakuumā. Aizsargatmosfēru pielietošana ir nepieciešama, lai pasargātu uzsildāmo materiālu pret oksidēšanos termiskās apstrādes procesā. Oksidēšanās saķepināšanas procesā ir nevēlama parādība, jo oksīdu plēves veidošanās uz pulvera daļiņām bremzē vai pilnīgi apstādina uzsildāmo pulvera ķermeņu sablīvēšanas un sacietināšanas procesu.

Aizsargvidēs izvēle lielākā mērā ir atkarīga no pulvera materiāla sastāva, krāšņu tipa un no ekonomiskajiem faktoriem. Kā aizsargatmosfēra visbiežāk tiek izmantots ūdeņradis, konvertēta dabasgāze, argons un vakuums. Aktuāla problēma ir aizsarggāzu žāvēšana, kuru H<sub>2</sub>O saturu raksturo ar rasas punktu vai gramos uz 1 m<sup>3</sup>, kā arī procentos [55].

Saķepināšana piedod detaļai nepieciešamo stiprību, veidojot savienojumu starp metāla daļiņām.

Virsmas difūzija ir dominējošā PM tēraudu cietās fāzes saķepināšanas gadījumā. Saķepināšanas pakāpi nosaka uzstādīto kakliņu skaits un stiprība. Starpdāļiņu kakliņu veidošanās un augšana tiek nodrošināta ar agru un efektīvu virsmas oksīdu atjaunošanu, kas pārklāj pulveri. Saķepināšana atjaunošanas atmosfērās likvidē virsmas oksīdus. Jauktajam grafiņam arī ir ārkārtīgi svarīga loma deoksidācijas laikā, reducējot oksīdus ar tiešu un netiešu karbotermiskās atjaunošanas mehānismu izmantojumu [9].

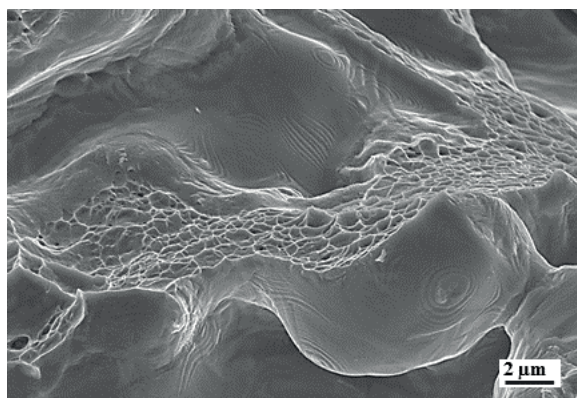
Saķepināšanas sākuma etapos nepieciešamas arī savstarpēji saistītas poras, kas atvērtas virsmai. Atvērtās poras vajadzīgas, lai efektīvi noņemtu smērvielas, kā arī lai nodrošinātu gāzveidīgo produktu (piemēram, ūdens tvaiki) izeju pie agras dzelzs oksīda atjaunošanas, kas svarīgi starpdāļiņu kakliņu veidošanai (1.19. att.).



1.19. att. Kakliņu un poru veidošanās [88].

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

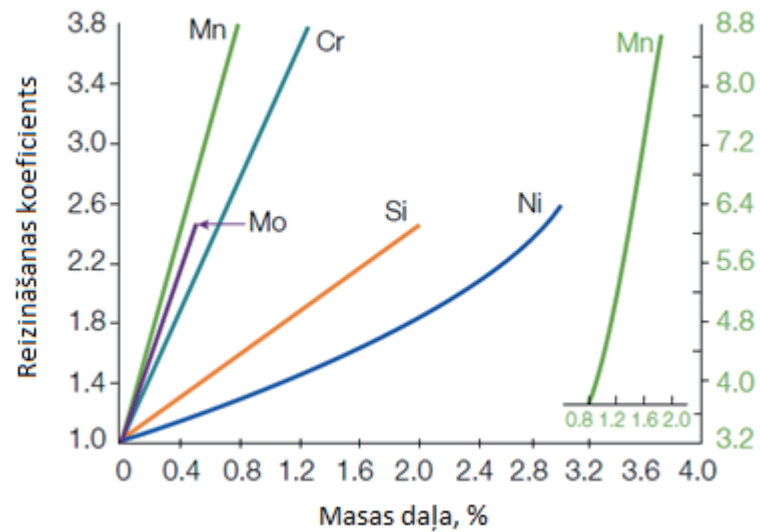
Starpdaliņu kakliņu un poru klātbūtni var novērtēt, analizējot pārbaudāmo saķepināto paraugu plaisas virsmu. 1.20. attēlā parādīta plaisas virsma ar apgabaliem, kur nepilnības un transdaliņas, kā arī labi attīstīti kakliņi kā labi saķepināta materiāla piemērs.



1.20. att. Pulvera detaļas plaisas virsma, kas parāda labi attīstītus kakliņus un starpdaliņu plastisko lūzumu [13].

Kontrolētie aglomerācijas procesi pulvermetallurgijā ļauj iegūt cietākas (martensīta sastāvs) un/vai izturīgākas (martensīta/bainīta sastāvs) detaļas, kontrolējot dzesēšanas ātrumu. Līdz ar to jāpievērš uzmanība leģējošo elementu ietekmei un detaļu dzesēšanai pēc saķepināšanas. Materiāla rūdāmības atkarība no dažādu leģējošo elementu satura ir parādīta 1.21. attēlā.





1.21. att. Leģējošo elementu ietekme uz materiāla rūdāmību [99].

Leģējošā elementa pievienošana pulveru kompozīcijām ļauj palielināt materiāla rūdāmību, un rezultātā leģējošo elementu saturs nosaka materiāla tribotehniskās īpašības. Var secināt, ka Cr un Mn leģējošie elementi salīdzinājumā ar citiem elementiem vairāk ietekmē materiāla rūdāmību [99].

Minētās prasības un parametri tika ņemti vērā, izgatavojot antifrikcijas detaļu eksperimentālus paraugus.

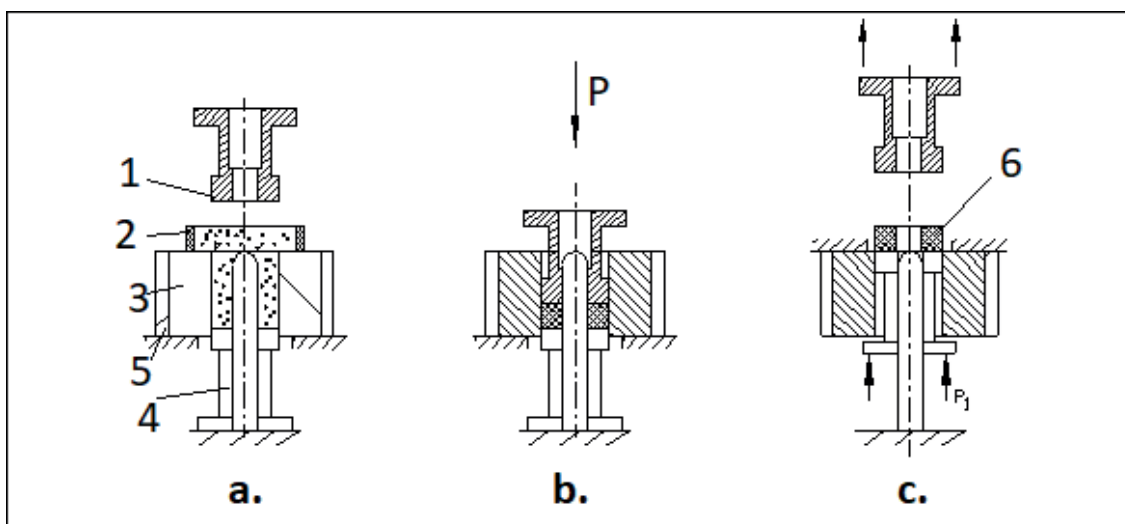
## 2. EKSPERIMENTĀLO METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS PROCESU PĒTĪJUMI

### 2.2. Eksperimentālo detaļu no mazlēģētiem komponentiem tribotehniskie raksturojumi

#### 2.2.1. Eksperimentālo detaļu mehāniskās īpašības

Detalizētai antifrikcijas detaļu tribotehnisko īpašību izpētei tika izgatavoti vagona bremžu sviru sistēmas bukšu eksperimentālie paraugi no mazlēģēta pulvera materiāla uz Fe-C-Cu bāzes ar Ni un Mo saturu līdz 0,3 %. Detaļas tika izgatavotas ar viensusēju statisku presēšanu, kam sekoja saķepināšana.

Vienpusējās bukšu presēšanas tehnoloģiskais process parādīts 2.1. attēlā. Presformas sastāvā ietilpst matrica 3, kas satur presējošo puansonu 1. Detaļas cilindrisko atvērumu veido stienis - ieliktnis 4, bet matricas integrālo stāvokli nodrošina aptvere 5.



2.1. att. Vienpusējās presēšanas tehnoloģiskā procesa principiālā shēma.

a) pulvera iebēršana; b) presēšana; c) izspiešana.

Darbs ar konkrēto presformu ietver sekojošo. Tehnoloģiskās operācijas sākumā tiek veikta presformas salikšana. Matrica tiek savilkta ar aptveri, uz tās tiek uzstādīta iekraušanas kamera 2.

Matricas 3, ieliktni 4 un iekraušanas kameras 2 izveidotajā dobumā ieber dozētu pulvera daudzumu. Uztāda puansonu 1, pārnes salikto presformu uz hidrauliskās preses galdu un veic presēšanu.

Saspiesto briketi 6 no presformas dobuma izņem šādā secībā: presformu uzstāda uz speciāla gredzena, kura atvēruma diametrs ir lielāks par ieliktni 4 ārējo diametru un mazāks par matricas 3 ārējo diametru, pēc tam izspiež ieliktni.

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 % [91].

2.1. tabula

Materiālu raksturojums paraugu izgatavošanai

| Maisījums               | Komponenti,<br>% (masas) |             |             |             |             |             |             |            | Pulvera raksturojums              |                                           |                                   |
|-------------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
|                         |                          |             |             |             |             |             |             |            | Plūsta-<br>mība,<br>s. uz<br>50 g | Uzbēruma<br>blīvums,<br>g/cm <sup>3</sup> | Sablīvējums,<br>g/cm <sup>3</sup> |
|                         | Fe,<br>%                 | Ni,<br>%    | Cu,<br>%    | Mo,<br>%    | S,<br>%     | P,<br>%     | C,<br>%     | Kennolube  |                                   |                                           |                                   |
| 1.<br>maisījums         | 94                       | 2,0         | 2,0         | 0,5         | 0,2         | 0,1         | 1,2         | 1,0        | 38                                | 3,18                                      | 7,05                              |
| <b>2.<br/>maisījums</b> | <b>96,5</b>              | <b>0,22</b> | <b>2,27</b> | <b>0,28</b> | <b>0,04</b> | <b>0,01</b> | <b>0,68</b> | <b>0,7</b> | <b>40</b>                         | <b>3,15</b>                               | <b>6,85</b>                       |
| 3.<br>maisījums         | 94                       | 2,5         | 2,0         | 0,5         | 0,2         | 0,1         | 0,7         | 1,0        | 40                                | 3,05                                      | 6,90                              |

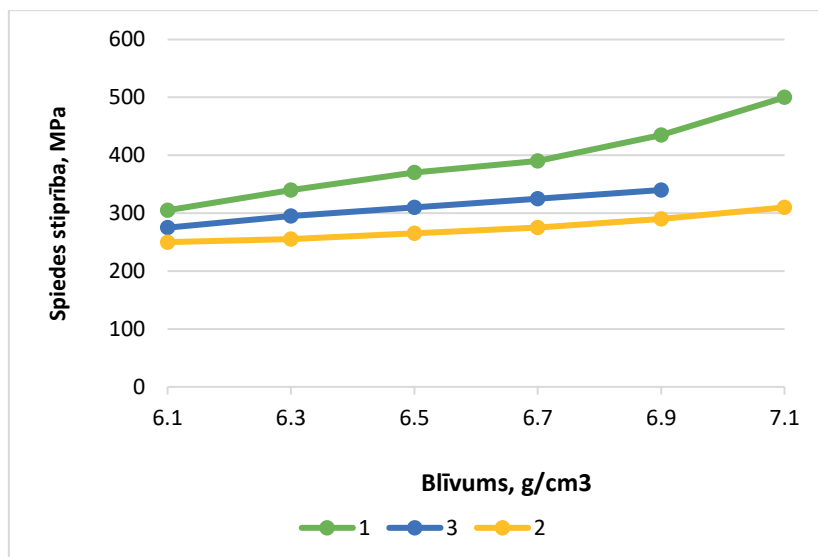
Paraugu presēšana tika veikta cietā presformā uz hidrauliskās preses 600MPa spiediena. Saķepināšana tika īstenota aizsargatmosfērā 60 minūšu garumā 1120° C temperatūrā [37].

2.2. tabula

Paraugu ģeometriskie izmēri un dažas to fizikāli – mehāniskās īpašības

| Ārējais diametrs<br>[mm] | Biezums [mm] | Augstums<br>[mm] | Porainība<br>[%] | Cietība<br>[HB] |
|--------------------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|
| 40                       | 4            | 30               | 15               | 120             |
| 80                       | 6            | 80               | 18               | 90              |

Metālpulveru slīdbukšu paraugu no izmantotajiem maisījumiem fizikāli – mehānisko īpašību izpētes rezultāti parādīti 2.2. tabulā. Paraugu spiedes stiprības robežas tika pārbaudītas atbilstoši standartam *ISO 2739:2012* [96].



2.2. att. Spiedes stiprība un materiāla blīvuma atkarība [37].

Materiālam no mazlēģēta pulvera (2.2. 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], [85], [87], to var rekomendēt metālpulveru slīdbukšu ražošanai.

Eksperimentāla materiāla blīvuma un spiedes stiprības atkarības prognozēšanai, kā arī raksturlielumu kopsakarības rakstura izmeklēšanai tika veikta regresijas analīze, kuras rezultātā ir iegūts regresijas modelis, 2.1. formula.

$$\bar{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (2.1.)$$

kur

$\bar{y}$  – ar regresijas modeli aprēķinātā rezultātīva pazīme;

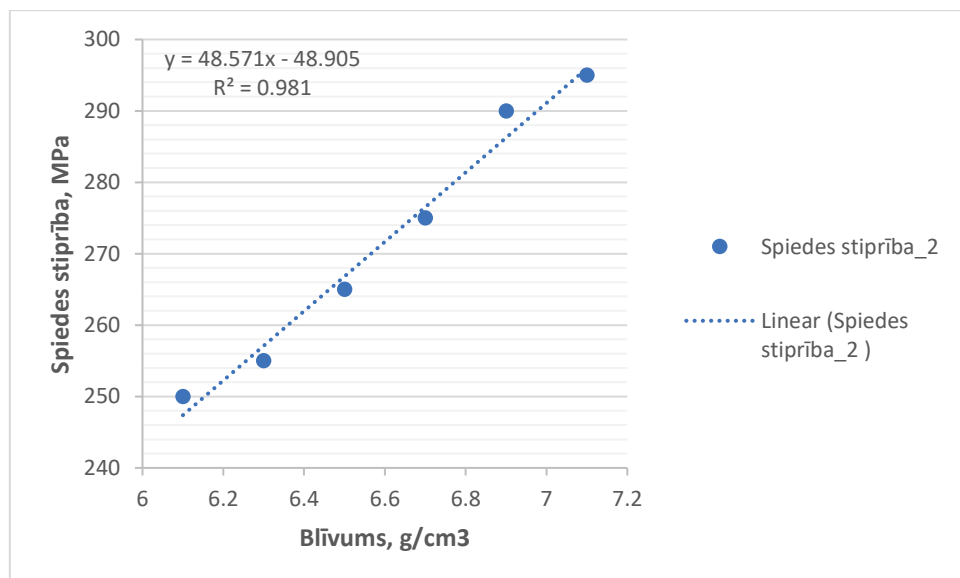
$a_0, a_i$  – regresijas koeficienti;

$x_i$  – faktoriāla ietekmējoša pazīme;

$i$  – faktisko mainīgo lielumu indekss;

$n$  – mainīgo lielumu skaits

Materiāla no mazlēģēta pulvera (2. maisījums) regresijas grafiskais attēlojums redzams 2.3.att.



2.3. att. Mazlēģētā kompozīcijas materiāla (2. maisījums) spiedes stiprības un blīvuma regresijas grafiks.

Ar regresijas metodi izveidoto prognozēšanas modeļa un to faktoru statistiskais nozīmīgums tika novērtēts ar dispersijas analīzes metodi ANOVA (*Analysis of Variance*). Aprēķinu rezultāti programmas *Minitab* vidē ir redzami 2.4. attēlā.

| SUMMARY OUTPUT        |                              |                |                    |            |                |            |
|-----------------------|------------------------------|----------------|--------------------|------------|----------------|------------|
|                       |                              |                |                    |            |                |            |
| Regression Statistics |                              |                |                    |            |                |            |
| Multiple R            | 0.990478004                  |                |                    |            |                |            |
| R Square              | 0.981046676                  |                |                    |            |                |            |
| Adjusted R Square     | 0.976308345                  |                |                    |            |                |            |
| Standard Error        | 2.824215019                  |                |                    |            |                |            |
| Observations          | 6                            |                |                    |            |                |            |
|                       |                              |                |                    |            |                |            |
| ANOVA                 |                              |                |                    |            |                |            |
|                       | df                           | SS             | MS                 | F          | Significance F |            |
| Regression            | 1                            | 1651.428571    | 1651.428571        | 207.044776 | 0.000135571    |            |
| Residual              | 4                            | 31.9047619     | 7.976190476        |            |                |            |
| Total                 | 5                            | 1683.333333    |                    |            |                |            |
|                       |                              |                |                    |            |                |            |
|                       | Coefficients                 | Standard Error | t Stat             | P-value    | Lower 95%      | Upper 95%  |
| Intercept             | -48.9047619                  | 22.30865984    | -2.19218735        | 0.09346362 | -110.8435313   | 13.0340075 |
| Blīvums_2             | 48.57142857                  | 3.37558259     | 14.38905056        | 0.00013557 | 39.19930881    | 57.9435483 |
|                       |                              |                |                    |            |                |            |
|                       |                              |                |                    |            |                |            |
| RESIDUAL OUTPUT       |                              |                |                    |            |                |            |
|                       |                              |                |                    |            |                |            |
| Observation           | Predicted Spiedes stiprība_2 | Residuals      | Standard Residuals |            |                |            |
| 1                     | 247.3809524                  | 2.619047619    | 1.036813499        |            |                |            |
| 2                     | 257.0952381                  | -2.095238095   | -0.829450799       |            |                |            |
| 3                     | 266.8095238                  | -1.80952381    | -0.716343872       |            |                |            |
| 4                     | 276.5238095                  | -1.523809524   | -0.603236945       |            |                |            |
| 5                     | 286.2380952                  | 3.761904762    | 1.489241208        |            |                |            |
| 6                     | 295.952381                   | -0.952380952   | -0.377023091       |            |                |            |

2.4.att. Prognozēšanas modeļa statistiskais nozīmīgums un aprēķinu rezultāti *Minitab* vidē.

Korelācijas koeficienta skaitliskas vērtības atrodas robežās:

$$-1 < R < 1$$

Ja ( $R = 0$ ) starp pētāmām parādībām nav sakarības;

Ja ( $R = 1$ ) sakarība ir funkcionāla un tieša;

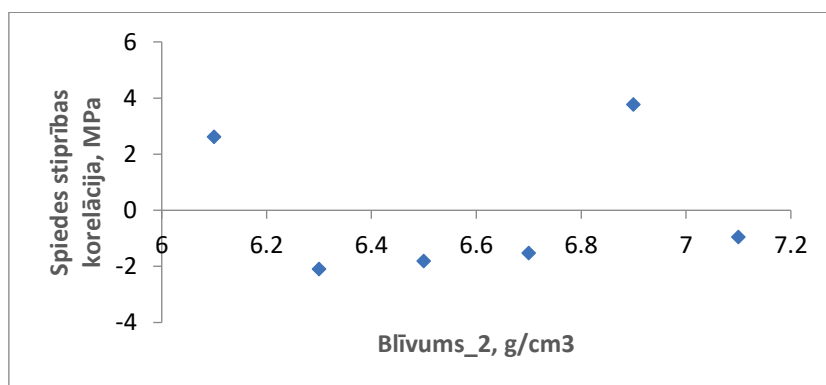
Ja ( $R = -1$ ) sakarība ir funkcionāla un pretēja.

Tika aprēķināti sakarību ciešuma rādītāji:

- korelācijas koeficients ( $R$ ) bija 0,99 %, kas norāda uz ciešam spiedes stiprības un blīvuma sakarībam.

- 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 redzamas 2.5. attēlā.



2.5. 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 tika veikta metalogrāfijas izpēte, lai izzinātu materiāla mikrostruktūru.

Pirms metalogrāfijas jāveic galvenais uzdevums – nepieciešamie priekšdarbi, lai sagatavotu paraugus analīzei zem mikroskopa.

Turklāt attēlojumu mikroanalīzei izvirzītas stingras atbilstošas kvalitātes prasības paraugu virsmai: nedrīkst būt artefakti, malu aizsprotojumi un skrāpējumi, kas bieži ir kvantitātes novērtējuma kļūdu cēlonis. Nepieciešamo mikroslīpējumu iegūšanu metalogrāfijā var garantēt tikai speciāls aprīkojums izmēģinājumu paraugu sagatavošanai.

Mazlēģēta materiāla mikrostruktūras analīzei tika izgatavoti slīpējumi ar metalogrāfijas aprīkojuma *PRESI* palīdzību [98]. *Mecatome 255/300* – paraugu griešanai; *Mecapress II* – slīpējuma iepresēšanai; *Mecatech 334* – slīpējumu pulēšanai (2.6. att.).



a). *Mecatome 255/300*;



b). *Mecapress II*



c). *Mecatech 334*.

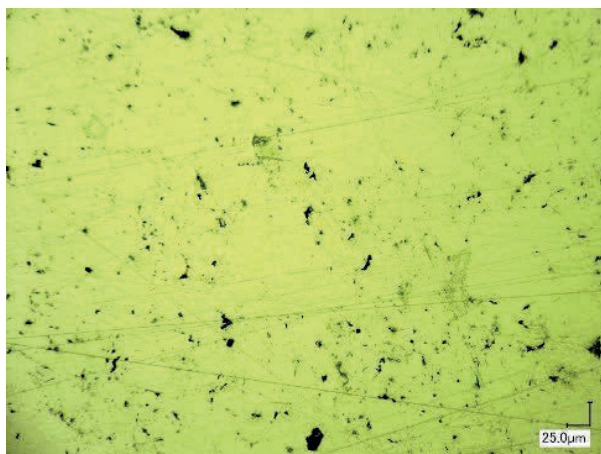
2.6. att. Aprīkojums *PRESI* metalogrāfijai.

Visizplatītākās no dažādām mūsdienu metalogrāfijas analīzes izmēģinājumu paraugu sagatavošanas metodēm ir: mehāniskā slīpējumu sagatavošana (2.6. att. a.), kas sevī ietver parauga griešanu ar abrazīvu vai dimanta disku, karstā un aukstā iepresēšana (2.6. att. b.), automatizētā slīpēšana un fināla pulēšana (2.6. att. c.).

Materiāla mikrostruktūras novērtēšanai tiek izmantots optiskais mikroskops *Keyence VHX-2000* (2.7. att.) [97]. 2. parauga mikrostruktūra atspoguļo vienmērīgi sadalīto porainību (2.8 att.).



2.7. att. Optiskais mikroskops *Keyence VHX-2000*.



2.8. att. Māzlegēta matālpulvera materiāla mikrostruktūra [37].

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.

### 2.2.2. Eksperimentālo detaļu triboloģiskie un virsmas kvalitātes mērījumi

Raupjums – tā ir viena no svarīgākajām kustīgo mehānismu un izstrādājumu ekspluatācijas iezīmēm, tieši no raupjuma atkarīgs berzes koeficients, korozijizturība, dilumizturība un citi detaļu mehāniskie raksturlielumi. Tādējādi uz darba detaļu virsmām pastāvīgi notiek procesi, kas var atstāt negatīvu ietekmi uz tām. Pie tādiem procesiem pieskaita: plaisu parādīšanos, mehānisko nodilumu, kas rodas no berzes, eroziju, metāla koroziju, sakrokojumu, atskarpju parādīšanos. Tādi defekti var atstāt negatīvu iespaidu uz visa mehānisma darbu. Virsmas raupjuma parametri – viens no pašiem svarīgākajiem produkcijas, kas strādā ar lielu nolietojumu, kvalitātes rādītājiem.

Raupjuma novērtēšanai tiek izmantotas optiskās, zondes, elektroniski – mikroskopiskās un citas metodes. Rūpniecisku pielietojumu ieguvusi zondes metode. Tās būtība ir sekojoša: pa virsmu slīd adata ar noapaļojuma rādiusu 2...10 μm, kas būtiski mazāks par mikronelīdzenumu virsotņu noapaļojuma rādiusu. Adata svārstības vertikālā virzienā pārveidojas elektriskos signālos, un tie pienāk mikroprocesorā, kas sniedz ciparu veidā galvenos profila raksturlielumus. Pēdējos gados izstrādātas metodes profilogrammu iegūšanai, izmantojot rastra, elektronu un skenēšanas mikroskopus. Izšķirtspēja šajā gadījumā sasniedz nanometrus. Izdodas reģistrēt molekulāru izmēru raupjumu (submikro raupjums), kā arī kristāliskas struktūras mikrodefektus.

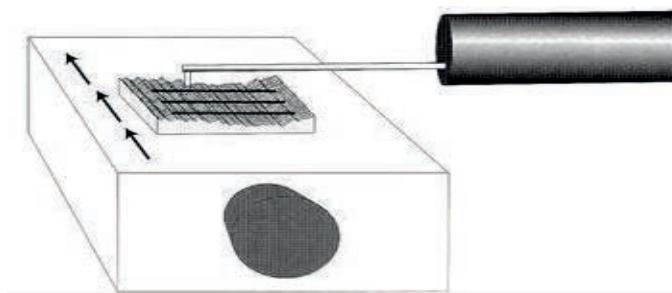
Lai novērtētu mazlēģētu bukšu un pētāmās detaļas virsmas stāvokļa metroloģiskās izpētes kvalitāti, tika izmantota trīsdimensiju mērīšanas sistēma “Taylor Hobson Ltd” (2.9. att.).





2.9. att. Trīsdimensiju mērīšanas sistēma “*Surface Measurement Machine Talyrond 500H*” [89].

Šī sistēma spējīga mērīt raupjumu, viļņainumu, summāro virsmu, kā arī atainot tos ar grafisko attēlu palīdzību. Divdimensiju un trīsdimensiju mērījumi ar irbuli tika veikti, izmantojot pamata “pakāpšanās” metodi (2.10. att). Datu apstrāde tika veikta datorā ar bāzes programmnodrošinājuma palīdzību [59].



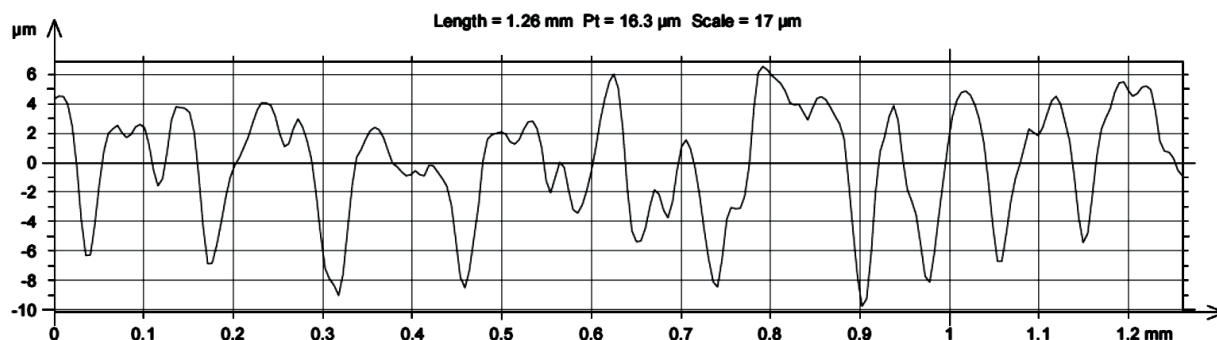
2.10. att. Virsmas raupjuma testēšanas principiāla shēma [90].

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

Profilometra galvenā sastāvdaļa ir koniska dimanta zonde, kas savienota ar pjezoelektrisko devēju, ar zondes palīdzību ir iespējams izmērīt virsmas profilu (raupjumu). Zonde pārvietojas perpendikulāri pārbaudāmajai virsmai, bet devējs ģenerē signālus. Signāli no devēja caur elektronisko pastiprinātāju nonāk elektroniskajā blokā, kas pārrēķina nolasītās pārvietojuma vērtības un atspoguļo tās displejā kā mērījumu rezultātu (2.11. 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)



2.11. 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”*) [93].

- 1) amplitūdas parametri:  $S_a$ ,  $S_{sk}$ ;
- 2) telpiskais parametrs:  $Str$ ;
- 3) funkcionālais (materiāla apjoms) parametrs:  $V_{mc}$ ;
- 4) hibrīda parametrs:  $S_{fd}$ .

Tāda virsmas parametru izvēle balstīta to nozīmībā pulvera detaļu berzes virsmām:

$S_a$  - virsmas vidējā absolūtā novirze, kas ir vispārējs virsmas raupjuma mērs;

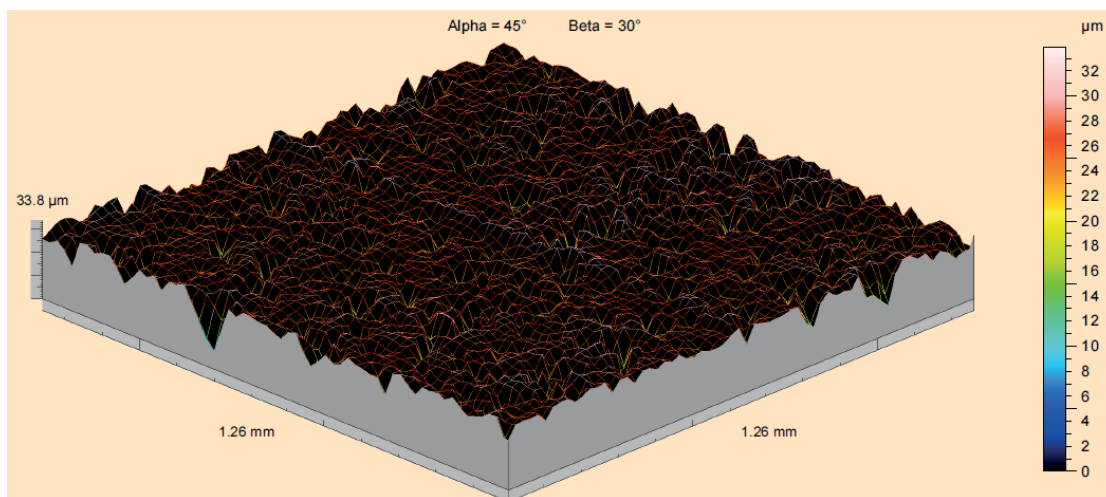
$S_{sk}$  - histogrammas augstumu izvietojuma asimetrija, parāda virsmas augstumu asimetrijas pakāpi attiecībā pret vidējo plakni;

$Str$  – virsmas tekstūras pušu attiecība – mēra virsmas izotropiju;

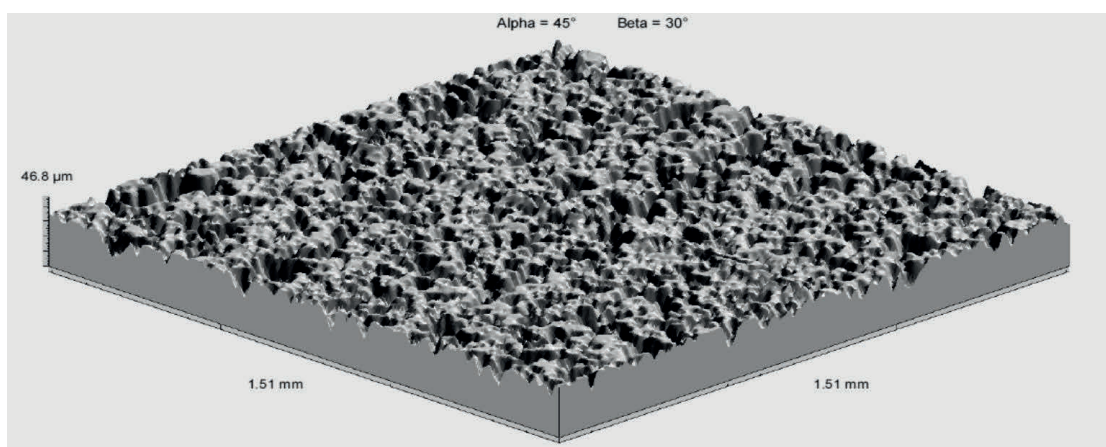
$V_{mc}$  – pēc mēroga ierobežotas virsmas materiāla apjoms, norāda materiāla daudzumu, kas veido virsmu starp dažādiem augstumiem;

$S_{fd}$  - fraktāls virsmas izmērs (virsmas sarežģītība), zemāka vērtība norāda uz periodiskāku virsmu (atšķirīgu no gadījuma virsmas).

Iegūtie trīsdimensiju pulvera detaļas virsmas attēli parādīti attiecīgi 2.12. un 2.13. attēlā.



2.12. att. Trīsdimensiju mazlēģētas pulvera detaļas virsmas attēla skats [37].



2.13. att. Virsmas raupjuma fotosimulācija [37].

Apskatītie pulvera detaļas trīsdimensiju tekstūras parametri pēc mērījumiem, kā arī divdimensionālo mērījumu rezultāti parādīti 2.3. tabulā.

2.3. tabula

Pētāmās mazlēģētas pulvera detaļas raupjuma un virsmas tekstūras parametri [37]

|                                     |                  |        |
|-------------------------------------|------------------|--------|
| 2D amplitūdas nelīdzenuma parametrs | $Ra, \mu m$      | 2.37   |
|                                     | $Rz, \mu m$      | 11.2   |
| 3D amplitūdas tekstūras parametrs   | $Sa, \mu m$      | 2.65   |
|                                     | $Ssk$            | -1.56  |
| 3D telpisks parametrs               | $Str$            | 0.766  |
| 3D funkcionālais parametrs          | $Vmc, mm^3/mm^2$ | 0.0187 |
| 3D 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, 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 lielumam 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.

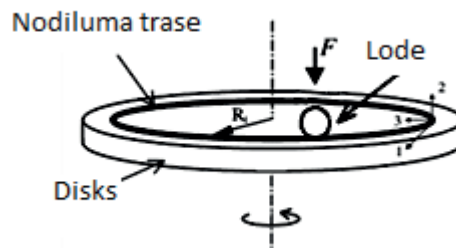
### **Triboloģija**

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”* and *ASTM G133 “Standard test method for linear reciprocating Ball-on-flat sliding wear”* atbilstoša triboloģiskā izpēte tika veikta, izmantojot tribometru “*CSM Instruments*” (Šveice) (2.14. att.).



2.14. att. “*CSM Instrument*” *Ball-on-disk tribometer* [92].

Berzes koeficients tika novērtēts, izmantojot testu “ball-on-disk” bez smērvielām, kad testējamais paraugs tika izmantots kā disks, bet augstas stiprības tērauda lodīte tika izmantota kā pretķermenis. Principiālā testēšanas shēma parādīta 2.15. attēlā. Eksperimenta sākumdati sniegti 2.4. tabulā.



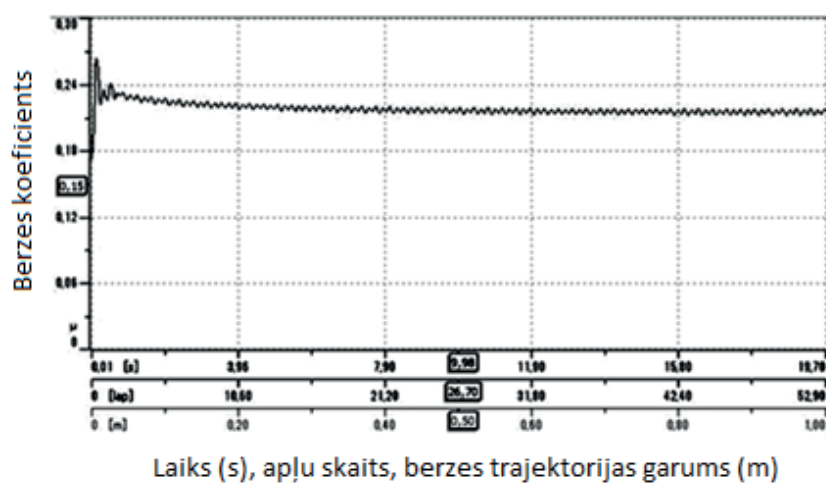
2.15. att. Principiālā shēma “ball-on-disk”:  $F$  – spēks, kāds pielikts lodītei,  $R$  – nodiluma rādiuss [30].

2.4. tabula

Triboloģisko mērījumu sākumdati

|                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Spēks                          | 3 N                           |
| Mērīšanas periods              | 20 s                          |
| Lineārais ātrums               | 0.05 m/s                      |
| Lodes kontakta rādiuss         | 3 mm                          |
| Distance                       | 1 m                           |
| Pretķermeņa (lodītes) diametrs | 6 mm                          |
| Pretķermeņa materiāls          | 100Cr6<br>(DIN EN ISO 683-17) |
| Parauga materiāls              | Fe-C-Cu                       |
| Šķidrums virsmas tīrīšanai     | Alcohol solution              |
| Eksperimentālie apstākļi:      |                               |
| Atmosfēra                      | Air                           |
| Temperatūra                    | 21 °C                         |
| Mitrums                        | 46%                           |

Berzes koeficients kā laika, apļu (griešanās ciklu skaits) un berzes ceļa garuma funkcija pārbaudāmajai detaļai ir redzams 2.16. attēlā.



2.16. att. Berzes koeficients kā laika, griešanās ciklu skaita un berzes ceļa garuma funkcija [37].

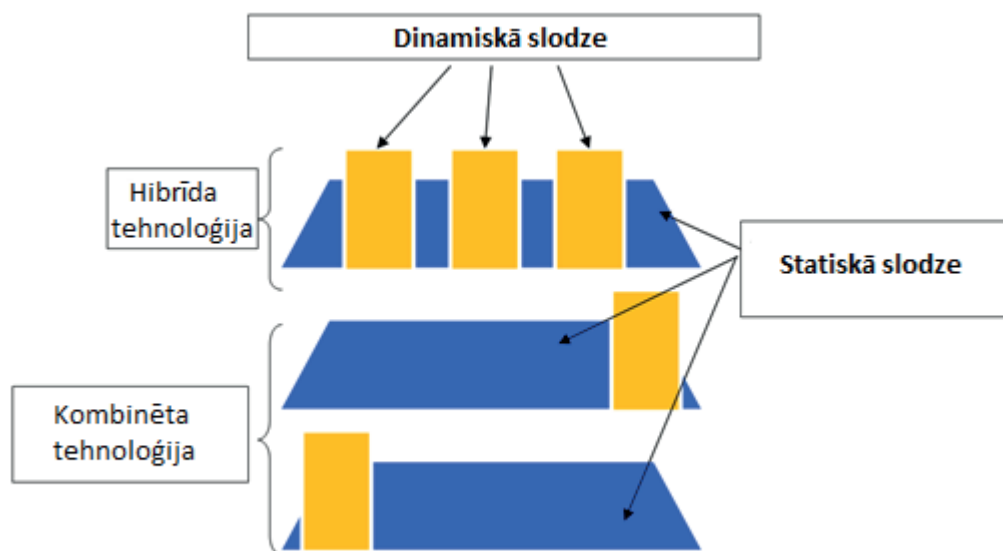
Ar salīdzinoši nelielām svārstībām visā berzes garumā tiek novērota stabila berzes koeficienta līkne. Vizuālā apskate pēc izmēģinājumiem ar mērķi noskaidrot nodiluma vai virsmas plastiskās deformācijas pēdas parādīja, ka izmēģinājumu laikā noticis standarta berzes process. Vidējā berzes koeficienta vērtība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

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

### 2.3. Presēšanas pētījumi ar impulsveida magnētisko lauku

Plaši pazīstamas metāla pulveru sablīvēšanas metodes hidrauliskajās un augstas veiktspējas mehāniskajās presēs, vibrācijas sablīvēšana, velmēšana un citas metodes. Ne mazāk pazīstamas arī dinamiskās pulveru materiālu sablīvēšanas metodes, izmantojot hidrauliskos un elektromagnētiskos impulsus. Jaunu keramisko un kompozītmateriālu un izstrādājumu no tiem radīšana ir cieši saistīta ar sablīvēšanas metožu pilnveidošanu, kas ļauj iegūt augstāku materiāla blīvumu, palielināt izstrādājumu gabarītus, dažādot to iespējamo formu.

Pēdējos gados iezīmējusies paaugstināta interese pret hibrīda un kombinētajām sablīvēšanas tehnoloģijām, kas savieno statiskās un dinamiskās slodzes. Pie hibrīdtehnoloģijām uz materiālu iedarbojas ar diviem un vairāk sloģošanas avotiem vienlaicīgi visā ražošanas cikla garumā. Kombinētajām tehnoloģijām raksturīgi, ka viena sloģošanas avota darbības laikā otrs darbojas vienreiz uzdotajā (biežāk sākuma vai beigu) ražošanas cikla momentā (2.17.att.).



2.17. att. Hibrīda un kombinēto tehnoloģiju ciklogramma [35].

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 [29], [34].

Impulsa metodes atšķiras no plaši izplatītajām statistiskajām metodēm galvenokārt ar daudz augstākiem spiedieniem un deformācijas ātrumiem. Spiediens un ātrums ir noteicošie faktori, kas ļauj ražot izstrādājumus ar lielāko blīvumu.

Konkrētajā pētījumā ir veikta pulvermateriālu presēšanā pielietojot impulsu presēšanas metodes, kurās puansona pārvietošanai tiek izmantots impulsa magnētiskais lauks. Kā šīs metodes priekšrocības minamas: papildus dinamiskās slodzes pielikuma mikro vai milisekundes diapazons, iespēja iegūt garmēra izstrādājumus, iespēja iebūvēt magnētisko impulsu iekārtu tehnoloģiskajā līnijā. Tādas tehnoloģijas realizācija kļūst iespējama, pateicoties noturīgu induktoru izmantojumam, kas savienoti ar magnētisko – impulsu iekārtu, un nepārtrauktas pulvermateriālu padeves ierīcēm. Darbā [11] apskatītas ierīces īpatnības un daudzkārtējas darbības efektīvu induktoru pielietojums. Šī pieredze tika izmantota, veicot arī eksperimentālos pētījumus.

Pētījumi tika veikti ar *Hoganas AB* pulveriem. Dati par materiāliem redzami 2.5. tabulā. Sajaucot, tika pievienota *Kennolube (K)* smērviela.

2.5. tabula

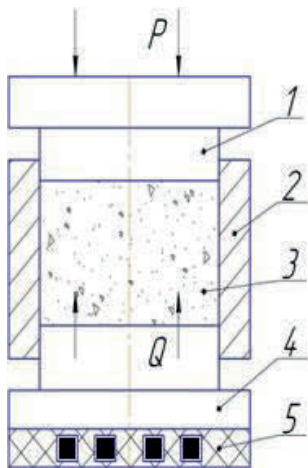
Pulvermateriāli uz dzelzs bāzes

| Nr. p | Dzelzs pulvera zīmols | Ražošanas metode | Papildus 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 leģēts  | 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 (2.18., 2.19. att.), kas pieslēgts impulsa strāvu magnetizētajam “*Impulse magnetizer U-series*” (2.20. att.) ar uzstādītu izlādes enerģiju 2,5 kJ (25 000A).





2.18. att. Pulvera presēšana cietā matricē, magneta-impulsa presēšanas (MIP) hibrīdtehnoloģijas shēma [35]  
1 – puansons; 2 – konteiners; 3 – pulveris;  
4 – apakšējais puansons; 5 – induktors.



2.19. att. Eksperimentālā ierīce [35].

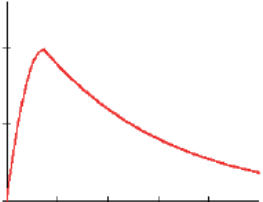
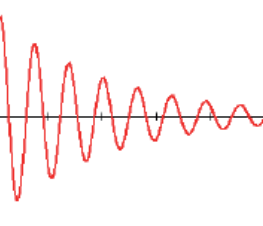
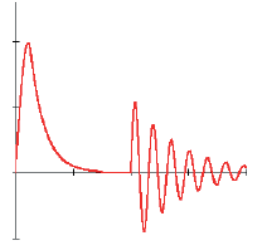
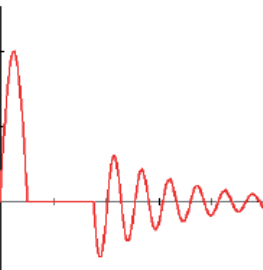
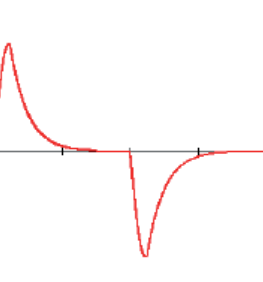


2.20. att. Impulsa magnetizētājs *U-series*

Pulveris sākotnēji tika pakļauts hidrauliskajai presei ar spēku 50 kN, pēc tam vienreizējai vai vairākkārtīgai impulsu iedarbībai, izmantojot induktoru, kam pieslēgts impulsa strāvas magnetizētājs. Impulsa strāvas magnetizētājs ļauj veikt induktora magnetizēšanu un atmagnetizēšanu dažādos režīmos (2.6. tabula). Eksperimenta gaitā tika izmantots režīms – A ar dažādu impulsu skaitu.

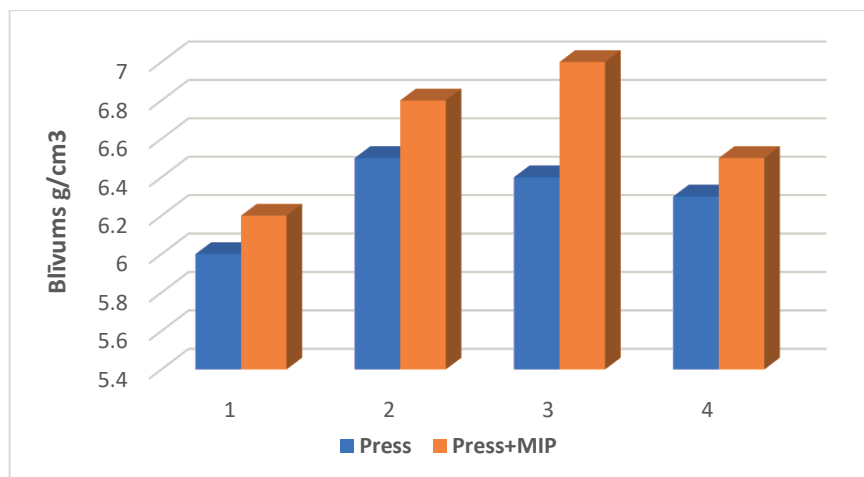


Impulsa strāvas magnetizētāja *U-series* darba režīmi

| Režīma nosaukums                                                                                                                           | Attēls                                                                              | Režīma apraksts                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                          | 2                                                                                   | 3                                                                                    |
| <b>A</b><br>Periodiski slāpēts<br>( <i>Aperiodically damped</i> )                                                                          |    | Magnetizācija                                                                        |
| <b>D</b><br>Noslāpēta svārstība<br>( <i>Damped oscillation</i> )                                                                           |    | Demagnetizācija<br>Stabilizācija                                                     |
| <b>AD</b><br>Periodiski slāpēts ar sekojošu<br>slāpētu svārstību<br>( <i>Aperiodically damped with<br/>subsequent damped oscillation</i> ) |   | Magnetizācija un<br>demagnetizācija<br>(vājināšanās, stabilizācija un<br>regulēšana) |
| <b>SD</b><br>Pusvilnis ar sekojošu slāpētu<br>svārstību<br>( <i>Sine half wave with subsequent<br/>damped oscillation</i> )                |  | Īpaši pielāgošanas procesi                                                           |
| <b>AK</b><br>Periodiski slāpēts, komutēts<br>( <i>Aperiodically damped,<br/>Commutated</i> )                                               |  | Magnetizācija<br>ar polaritātes maiņu                                                |

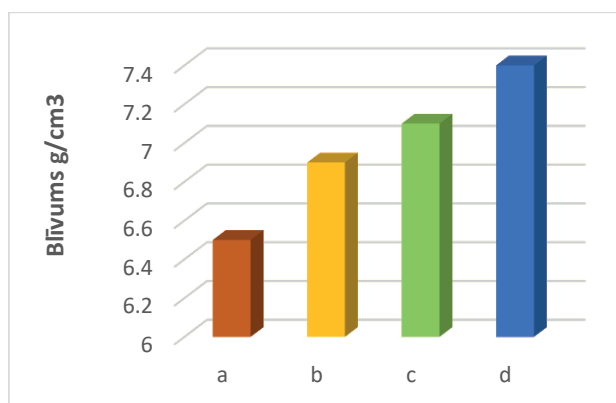
Tika izmantots plakana induktors 5 no vara vada ar 6 mm<sup>2</sup> šķērsgrīzumu un 12 vijumiem. Puansona masa - 98 g, vara plates masa – 25 g.

Presēšanas blīvums  $\delta$  tika novērtēts, mērot puansona nosēdes pakāpi matricē. Eksperimentu rezultāti parādīti 2.21. – 2.23. attēlos.

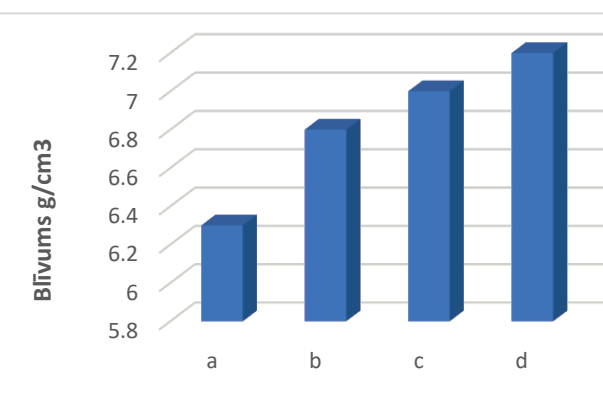


2.21. att. Pulveru kompozīciju (2.5. tab.) blīvuma izmaiņas blīvēšanas laikā [35].

Rezultāti, (2.21. att.) rāda ka triecienimpulsa uzlikšana paaugstina presējuma blīvumu visām pulvera kompozīcijām no 4.5 līdz 9.5% Turklāt lielākais blīvuma pieaugums vērojams magnetizētajā izlādes enerģijas augstākos līmeņos (2.22. att.). Izlādes impulsu skaita ietekme īpaši jūtama, ja to skaits ir neliels. Palielinoties impulsu skaitam vairāk par 10, šī ietekme kļūst mazāk pamanāma (2.23. att.).



2.22. 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 [35].



2.23. att. Blīvuma izmaiņas atkarībā no impulsu skaita ar īpatnējās izlādes enerģiju 0.9 kJ/cm³: a-1; b-5; c-10; d-15. [35].

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.

Minētās metodes izmantošana var būt pieņemama vagona ratiņu antifrikcijas slīdņu ražošanā, kas darbojas sausās berzes režīmā, tā kā šajā gadījumā detaļas paaugstināts blīvums veicinās noturību pret frikcijas un dinamiskām slodzēm pastāvīga spēka gadījumā.

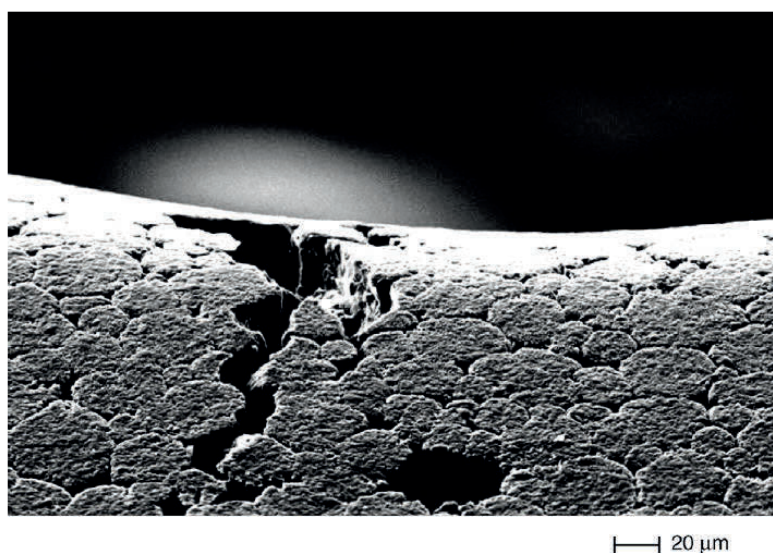
### 3. METĀLPULVERU DETAĻU RAŽOŠANAS BRĀĶIS UN KVALITĀTES KONTROLES PAŅĒMIENI

#### 3.1. Saķepināšanas brāķis un pasākumi tā samazināšanai

Defektu sistēma – detaļas virsmas vājās vietas – ir galvenā, kur, sākot no pašas mazākās deformācijas, attīstās mikroplaisas. Kā sekas defektu esamībai uz virsmas dabiski gaidīt, ka virsmas sairšana berzes laikā notiks tieši šajās vietās, t.i., dilšanas procesam būs selektīvs raksturs.

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, tad 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 [41].

Nepietiekami deformētas pulvera daļiņas izraisīja plaisu zaļajā kompaktā, kas atvērās saķepināšanas laikā.

Tālāk atspoguļoti visbiežāk sastopamie brāķi, kas rodas, saķepinot detaļas [68]:

**Slēptās noslāņošanās** - plaisu rašanās pēc saķepināšanas pulveru formēšanās stadijā, kas veidojas formēšanas režīma neievērošanas rezultātā kā neliels nevienmērīgums, un to nav iespējams noteikt vizuāli.

**Veidnes sagrozīšanās un deformācija** – nepieciešamo pulverizstrādājuma ģeometrisku izmēru neievērošana. Parasti tiek novērots plakanām detaļām, kuru biezums ir neliels attiecībā pret garumu, īpaši izgatavojot izstrādājumus no smalkdispersiem pulveriem. Šī brāķa rašanos sekmē šitas nekvalitatīva samaisīšana un pārāk ātra uzsildīšana saķepināšanas procesā.

**Pārdedzinājums** – pulverizstrādājuma normālas struktūras izjaukšana, kas izpaužas kā porainības paaugstināšanās vai plaisāšana, saķepināšanas temperatūras pārmērīgas paaugstināšanas dēļ.

**Nepietiekoša saķepināšana** – pulverizstrādājuma blīvuma un stiprības prasību pārkāpums sakarā ar nepietiekošu saķepināšanas temperatūru vai ilgstošu izturēšanu uzsildīšanas laikā. Brāķi ir iespējams izlabot ar atkārtotu saķepināšanu.

**Oksidēšana** – uz pulverizstrādājuma virsmas apsūbējuma, plāvas vai korozijas pazīmes. Šis brāķa veids parasti ir saistīts ar aizsargatmosfēras sastāva pārkāpšanu saķepināšanas laikā.

**Garozīna** – pulvera veidnes saķepināšanas defekts, kad uz virsmas slāņa veidojas struktūra, kas atšķiras no uzdotās. Tas var gadīties pēc pulverī ievadītas organiskās saites sadalīšanās. Brāķi nav iespējams izlabot. Lai novērstu tā veidošanos, ir nepieciešama pulvera veidnes lēna un vienmērīga uzsildīšana, kārtīga iebēršana un pietiekams aizsarggāzes patēriņš.

**Uzpūšanās** – burbuļu veidošanās uz saķepināta izstrādājuma virsmas intensīvas gāzu izdalīšanās dēļ saķepināšanas šķidrās fāzes laikā vai sakarā ar vietējiem pārkarsējumiem pulvera veidnes nevienmērīgas uzsildīšanas dēļ, kas izraisa komponentu kušanu saķepināšanas cietās fāzes laikā. Brāķi nav iespējams izlabot. Novērst brāķi iespējams, izmainot saķepināšanas režīmu un pulveru veidnes uzsildīšanas paņēmieni.

**Izsvīšana** – uz pulvera izstrādājuma virsmas šķidrās fāzes izdalīšanās, materiāla kausējuma grūtkūstošās sastāvdaļas sliktas vai pasliktinājušās sasalpināšanas dēļ. Brāķi nav iespējams izlabot. Brāķa novēršanai nepieciešams sakorģēt materiāla ķīmisko sastāvu.

**Difūzijas porainība** – porainība, kas rodas pulvera veidnes saķepināšanas laikā, kad komponentiem ir atšķirīgi savstarpējās difūzijas koeficienti.

**Atogļošana** – oglekļa satura samazinājums pulvera izstrādājumā ārējās virsmas slāņos, pārsvarā krāšņa kārstas zonas atmosfērā oksidētāju paaugstināta satura dēļ. Atogļošanas novēršanai paliktņus ar pulveru veidnēm nosedz ar metāla vai grafīta vākiem, izmanto arī aizsargiebersšanu, kas satur oglekli.

**Kvēpu aplikums** – tumša aplikuma veidošanās uz pulvera veidnes virsmas oglekļa oksīda, metāna vai citu ogļūdeņražu sadalīšanās rezultātā. Šis brāķa veids var rasties uz pulvera veidnes dažādu eļļu un citu vielu dēļ, kas saķepinās uzsildīšanas rezultātā, veidojoties oglekli saturošiem kvēpiem.

**Korozija un virsmas raupjums** – pulverizstrādājuma virsmas veseluma bojājums dažādu ķīmisko savienojumu, kas atrodas uz pulvera veidnes virsmas vai veidojas uz tās saķepināšanas laikā, sadalīšanās vai atjaunošanās rezultātā.

Saķepināšanas brāķis, īpaši tāds, kas nav izlabojams, pamatīgi pasliktina ar pulvermetallurģijas 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. Metālpulveru detaļu kvalitātes pārbaude ar nesagraujošās kontroles metodi**

Metālpulveru detaļu defekti iedalās ārējos – kas konstatējami uz materiāla virsmas, un iekšējos – kas atklājami materiāla vai izstrādājuma iekšienē. Testēšanas rezultātā atklātie defekti var būt divējādi.

Nesagraujošās testēšanas veikšanai izmanto vairākas metodes, kas atkarīgas no pārbaudāmā materiāla specifikas. Visizplatītākās metodes ir:

- ultraskaņas pārbaude (*UT*);
- radiogrāfijas pārbaude (*RT*);
- penetrācijas pārbaude (*PT*);
- vizuālā pārbaude (*VT*);
- magnētisko ferrodaļiņu pārbaude (*MT*).

Turpmākajās sadaļās sīkāk tiks apskatītas un izpētītas divas galvenās metodes - *UT* un *RT*.

#### **Ultraskaņas defektoskopija**

Ultraskaņas kontrole ir veikta ar mērķi atklāt tāda tipa defektus kā izstrādājuma materiāla nepārtrauktības vai viendabīguma traucējumi.

Ultraskaņas kontroles galvenais uzdevums ir defektu atklāšana, to parametru izmērīšana un bīstamības noteikšana, kā arī konkrētā izstrādājuma ekspluatācijas pieļaujamības izvērtēšana. Kontroles veikšanas princips, izmantojot ultraskaņas atbalss impulsa metodi, balstās uz faktu, ka izstarotājs nosūta izstrādājumam īsus ultraskaņas impulsus. Satiekoties ar šķērslī, piemēram, defektu vai atgriešanās (apakšējo) virsmu, daļa no ultraskaņas viļņa enerģijas tiek atspoguļota un atgriežas atpakaļ pie izstarotāja. Ultraskaņas svārstību uztvērējs pārveido atstarotās ultraskaņas svārstības no šķēršļa elektriskajās svārstībās, kas nonāk uz ekrāna – galvenais defektoskopa indikators. Defektoskops reģistrē no defektiem atstaroto atbalss signālu intensitāti un pienākšanas laiku, kas ļauj noteikt defekta apmērus un tā atrašanās vietas koordinātes.

#### **Radiogrāfija**

Iekšējo defektu atklāšana izgaismošanas ceļā balstās uz rentgena staru spēju dažādos veidos iet cauri dažādiem materiāliem un tajos novājināties atkarībā no to biezuma, materiāla tipa un starojuma enerģijas. Plaisu, poru vai svešķermeņu ieslēgumu gadījumā rentgena starojums kļūst vājāks.

Ja fiksēta notikusi starojuma intensitātes sadalīšanās – var noteikt materiāla neviendabīgumu un tā atrašanās vietu. Lai atrastu metināto savienojumu defektus, no vienas kontroles objekta puses tiek novietots starojuma avots (rentgena caurule), bet no otras - detektors (rentgenogrāfiskā filma), uz kura arī tiek reģistrēta informācija par defektu. Starojumam ejot caur metinātiem vai nepārtrauktiem savienojumiem, vietās ar defektiem un vietās bez defektiem tas tiek absorbēts atšķirīgi: starojuma intensitāte defekta vietā, kas aizpildīts ar gaisu, gāzi vai nemetāla ieslēgumiem, vājināsies mazāk nekā viendabīgā metālā. Atšķirības starojuma intensitātē reģistrē detektors, piemēram, defekta vietā rentgenogrāfiskā filma izgaismojas tumšāka [18].

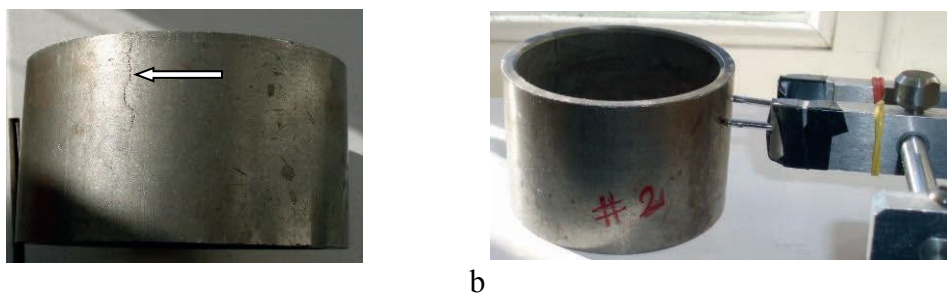
### 3.2.1. Metālpulveru detaļu kvalitātes kontrole ar ultraskaņu

Nemot vērā bremžu sistēmu svarīgumu, nepieciešams uzlabot komponentu kvalitātes nodrošināšanu. Ar nesagraujošās kontroles palīdzību, jo īpaši ar ultraskaņas kontroli, ir iespējams prognozēt antifrikcijas detaļu mehāniskās īpašības, novērtēt poru un defektu klātbūtni. Saņemto produktu galvenā īpašība, kas tos atšķir no pulvermetāliem, ir brīvas poru virsmas klātbūtne kā galvenais fāžu pārvērtību attīstības faktors. Brīvā poru virsma izpaužas, no vienas puses, kā spriegumu relaksācijas telpa, bet no otras puses, kā vieta, kur rodas dažādi defekti. Šajā gadījumā tiek rekomendēts izmantot UT metodes [37].

Lai noteiktu metālpulveru bukšu no mazlēģētiem pulveru maisījumiem viendabīguma pakāpi un iespēju noteikt plaisas, izmantojot ultraskaņu, tika izmantota *TOF* metode (*time-of-flight*). Šī metode jau agrāk nodemonstrēja savu augsto efektivitāti plaisu atklāšanā metinājumu šuvēs un metāla izstrādājumos [32]. Metode ir balstīta uz zonas izskanēšanu starp izstarotāju un uztvērēju un signālu analīzi, ko formē tieša ultraskaņas cauriešana, apakšas atstarojumi un difrakcijas atstarojumi no plaisām, kad tās parādās. Veicamo mērījumu mērķis bija vienlaikus novērtēt materiāla īpašību neviendabīgumu pēc izstrādājuma apjoma un plaisu atrašanās vietas. Kontroles pārbaudei tika izvēlēti paraugi ar garenisku plaisu, kā arī bez redzamiem defektiem (3.2. att.).

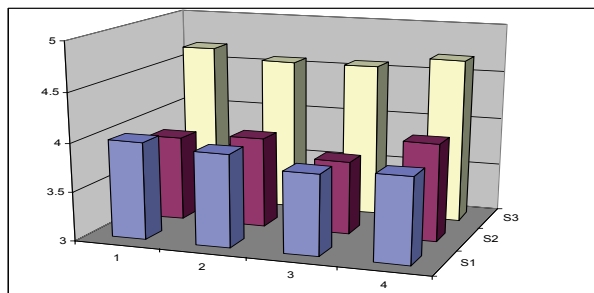
Mērījumi tika veikti ar virsmas izskanējumu pie fiksētas akustiskās bāzes starp izstarotāju un uztvērēju, kas vienāda ar 20 mm. Lai veiktu mērījumus uz cilindriskās virsmas, tika izmantoti punktu kontaktu pārveidotāji ar nelielu daudzumu ziedes.

Ultraskaņas signālus ierosināja divu periodu garuma sinusoidāls impulss ar nesējfrekvenci 1 MHz. Paraugi tika mērīti četros sektoros pa perimetru un trīs augstuma joslās.

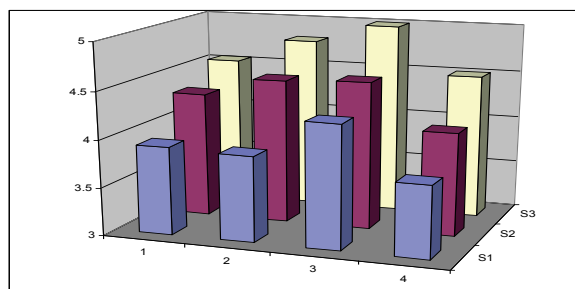


3.2. att. Ultraskaņas mērījumu ilustrācija: a) – paraugs ar plaisu, b) – adapteru pielikšana [37].

Ultraskaņas garenvirziena vadošā viļņa ātruma mērījumu rezultāti paraugu virsmā parādīja, ka tie ir neviendabīgi. Skaņas ātrums pa atsevišķu paraugu zonām var mainīties 3,75-5,00 km/s, kas parāda to sastāva un porainības neviendabīgumu 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.



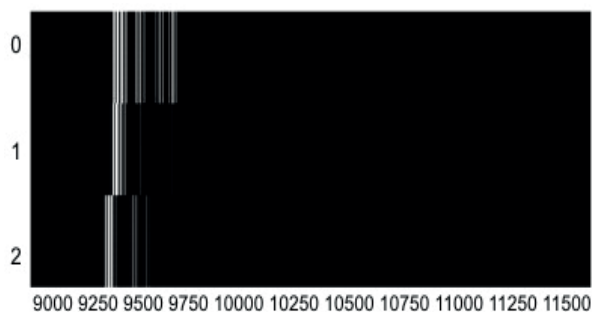
a



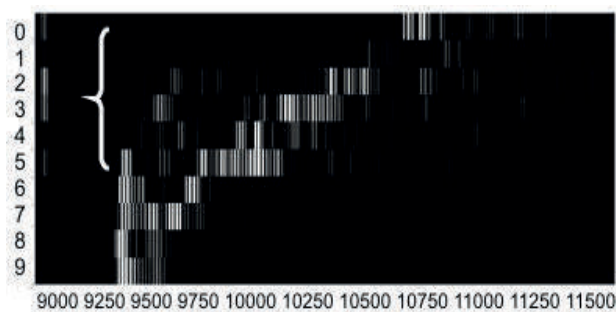
b

3.3. att. Skaņas ātruma sadalījums  $C$  (km/s) pa perimetru (1-4) un pēc augstuma (S1-S3) divos paraugos [37].

Plaisas rajonā ultraskaņas signāli tika noņemti desmit 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.



a



b

3.4. att. Ultraskaņas signālu attēls paraugu augstumā (ordinātu ass): a) bez defektiem, b) paraugā ar plaisu [37].

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.

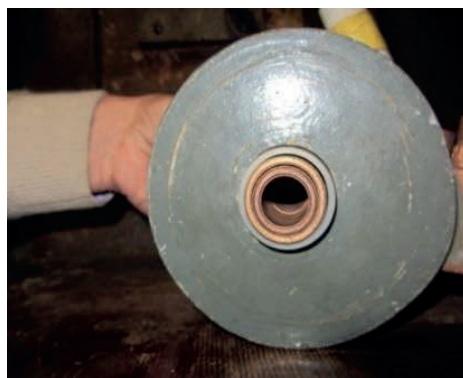
### 3.2.2. MP detaļu savienojumu kontrole ar ultraskaņas (UT) un radiogrāfijas (RT) metodēm

Testēšana ar radiogrāfiju un testēšana ar ultraskaņu ir divas galvenokārt lietojamās nesagraujošās testēšanas metodes, ar kuru palīdzību var sekmīgi atklāt nepilnības, kas ir pilnīgi izstrādājuma iekšienē un atrodas krietni zem virsmas daļas. Katrai metodei ir savas



priekšrocības iekšējo nepilnību atklāšanā: testēšana ar radiogrāfiju ir efektīvāka, ja indikācija nav plakana, bet testēšana ar ultraskaņu ir efektīvāka, ja indikācija ir plakana. Šajā sadaļā izklāstīti pētījumi ar slīdbuksēm uz Cu pamata, tai skaitā slīdbukšu savienojumu kontrole ar ultraskaņas un radiogrāfisko metodi.

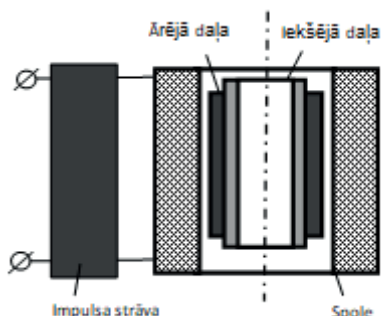
Pētījumu mērķis – salīdzināt divas nesagraujošās kontroles pamatmetodes, pārbaudot metālpulveru detaļu savienojumu. Pētāmo detaļu savienojums tika veikts, izmantojot elektromagnētisko lauku [33] un speciāli izgatavotu induktoru (3.5. att.). Detaļu savienojuma veikšanas shēma (3.6.a) un savienotās slīdbukses ir redzamas 3.6. b,c. attēlā.



3.5. att. Elektromagnētiskais induktors [33].

Bukšu pāri, kas savienoti impulsa magnētiskajā laukā, parādīti 3.6.b-c attēlā. Antifrikcijas bukses tika izgatavotas no bronzas grafīta pulvera ar tipiska pulvermetāla saķepināšanas procesa palīdzību, kur varš bija galvenais materiāls, bet alvas un grafīta saturs – attiecīgi 9 un 3%. Metālpulveru detaļas uz Cu bāzes bieži izmanto slīdbukšu izgatavošanā, kuras pielieto dažādās iekārtās, piemēram, ritošā sastāva gaisa sadalītāja detaļās.

Ārējās un iekšējās bukses izmēri bija sekojoši: garums 30 un 36 mm, ārējais diametrs 32 un 28,5 mm, sieniņas biezums 3,5 mm. 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 3.6.a attēlā. Pieliktā elektromagnētiskā lauka magnētisko un elektrisko komponentu lielumi uz induktora ass sasniedza 835 A/m un 17960 V/m.



a



b



c

3.6. att. a) – principiālā pulvera buksu nopresēšanas shēma; b), c) – savienojums buksē-bukse pēc nopresēšanas.



Paraugi tika pakļauti elektromagnētiskā lauka iedarbībai ar "tuvajai zonai" raksturīgo magnētisko un elektrisko komponentu attiecību un savstarpējo orientāciju, kas veidojas daudz mazākos attālumos par elektromagnētiskā lauka viļņa garumu.

Ultraskaņas kontrole tika veikta atbilstoši standartiem *LVS EN ISO 16810: 2014* Nesagraujošā kontrole - ultraskaņas kontrole. Pārvades tehnika (*ISO 16823: 2012*) un *LVS EN ISO 16811: 2014* Nesagraujošā kontrole. Ultraskaņas kontrole. Jūtība un skaņošanas diapazons (*ISO 16811: 2012*) [94].

Impulsu atbalss metodē tika izmantots ultraskaņas defektoskops *USM 25* no *Krautkramer GE Inspection Technologies GmbH* (3.7. att.). Ultraskaņas defektoskops *USM 25* paredzēts defektu atklāšanai (materiālu nepārtrauktības un viendabīguma traucējumi) pusfabrikātos, gatavos izstrādājumos un metinātos savienojumos, to atrašanās dziļuma un koordinātu mērīšanai, biezuma izmērīšanai, izplatīšanās ātruma un ultraskaņas svārstību vājināšanās noteikšanai materiālā, kontrolējot pēc starptautiskajiem standartiem.

Tas ļauj veikt mērījumus plašā frekvenču diapazonā no 0,5 līdz 20 Mhz materiāliem ultraskaņas ātruma diapazonā no 1 līdz 15 km/s ar plašiem dziļuma un vājināšanas kalibrēšanas diapazoniem materiālā. 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. Devēja atdalīšanas shēma ļāva samazināt *aklo zonu* un pazemināt trokšņa līmeni. Pirms izmēģinājumiem sistēma tika kalibrēta, lai izmērītu sienīņu biezumu bronzas grafīta buksei, izmantojot atsevišķu izmēģinājuma buksi.

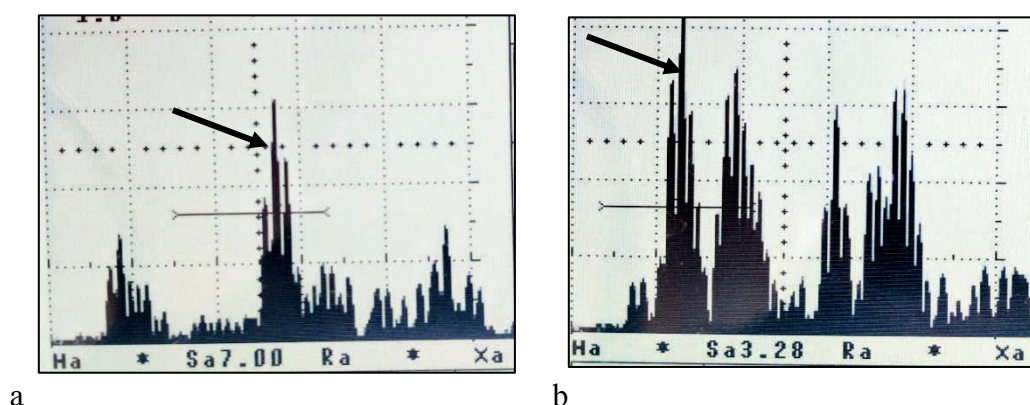


3.7. att. Ultraskaņas testēšanas process ar *USM 25* of *Krautkramer*.

### **Ultraskaņas testēšana**

Tika salīdzināti viļņa atspulgi impulsu atbalss signālos. Ehogrammas piemērs redzams 3.8. attēlā. Pareizas adhēzijas gadījumā starp savienojošajām detaļām ultraskaņas viļņim bija iespēja brīvi iziet cauri robežai starp ārējo un iekšējo daļu un atstaroties no sienīgas iekšējās virsmas. Tādējādi atbalss reakcijai bija kavēšanās, kas atbilst dubultam sienīgas 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 atstarošanos no ārējās daļas sienas virsmas. Tīkmēr, sakarā ar augsto ultraskaņas vājināšanos pulvera metāla bronzas grafitā, zināmiem nepārtrauktības traucējumiem un garāku izplatīšanās ceļu, atbalss signāli detaļu augstas kvalitātes savienojuma vietās ir ievērojami vājināti salīdzinājumā ar mērījumiem, kas veikti vāja savienojuma vietās. Ultraskaņas izkliede bronzas grafitā materiālā izraisīja arī atstarojošo virsotņu paplašināšanos un nepareizāku formu, kas parasti tiek novērots lietajos metālizstrādājumos.

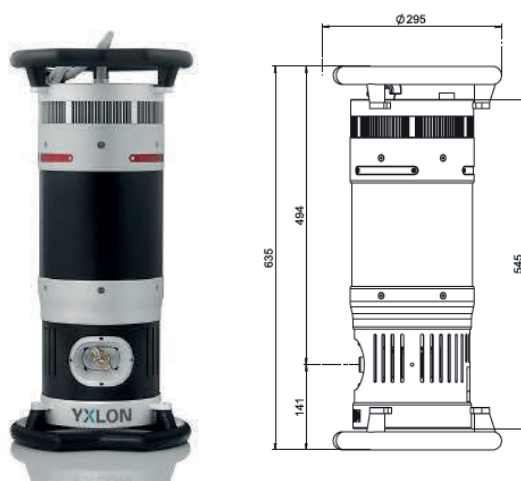


3.8. att. Ultraskaņas ehogrammu paraugi: a) ciešas, b) vājas sastiprināšanas gadījumos. Ar bultām atspoguļoti atstarojumi, kas atbilst 7,00 un 3,28 mm biezumam [54].

Vidējā mērījumu kļūda pārbaudītajos paraugos bija 0,14 mm, kas ir augstas mērījumu pieņemamās precizitātes rādītājs [54]. Tādējādi ultraskaņas testēšana apstiprināja pastāvīgo savienojumu, kas iegūts ar impulsa magnētisko lauku apspāides metodi un atbilst *ISO* standartiem [94] ultraskaņas kontrolei, principiālu lietojamību nesagraujošajā kontrolē. Tomēr metode ierobežota ar to detaļu pārbaudi, kurās virsmas greizums pieļāva plakano pārveidotāju pozicionēšanu. Pētāmās bukses atradās uz šī nosacījuma robežas.

### Radiogrāfijas kontrole

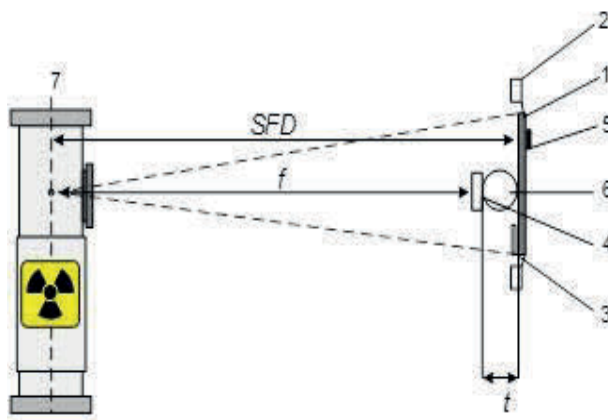
Metālpulvera detaļu savienojumu (bukšu) mehāniskās viengabalainības novērtējuma izpēte pēc apspāides impulsa magnētiskajā laukā tika veikta ar ierīces *X-ray apparatus SMART EVO 200D of YXLON* palīdzību (3.9. att.).



3.9. att. *X-ray SMART EVO 200D of YXLON* izskats un izmēri [101].

### 3.1. tabula

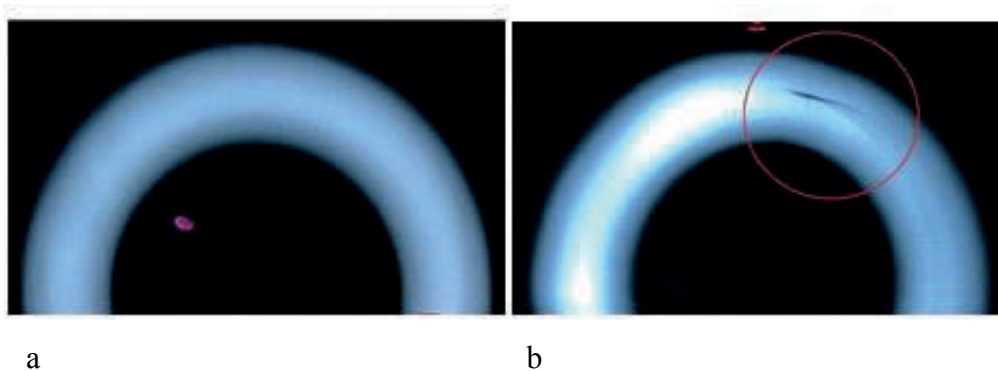
|                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Svars                        | 23 kg           |
| Augstums                     | 635 mm          |
| Fokusa vietas izmērs         | 1.0 mm          |
| Augstsprieguma uzstādīšana   | 30 – 200 kV     |
| mA uzstādīšana               | 0.5-6.0 mA      |
| Maksimālā x-ray jauda        | 750W            |
| Radiācijas noplūde           | Max. 2.0 mSv/h  |
| Darba apstākļi               | IP65            |
| Darba temperatūras diapazons | No -20 līdz +50 |



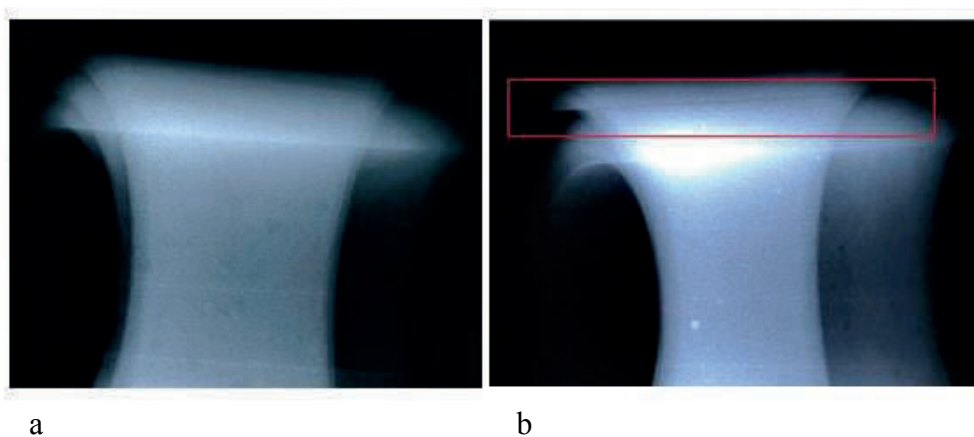
1 – svina ekrāns; 2 - filma; 3 un 4 – objekta un balsta punkta atzīme; 5 – pretējā starojuma indikators; 6 - objekts; 7 – rentgena starojuma avots; f – attālums starp avotu un objektu; SFD – attālums no avota līdz filmai; t – objekta biezums.

Testēšanas rezultāti tika izanalizēti, vizuāli novērojot rentgena filmas pēc standarta ķīmiskās apstrādes. 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 lāva atklāt savienojumu defektus abu tipu detaļās. Tika iegūti gan aplveida, gan arī aksiālie spraugu veidi starp ārējo un iekšējo daļu. 3.11. un 3.12. attēlā salīdzinājumā parādīti blīvi (a) un vāji (b) buksu savienojumi no gala un no sāna. Lai iegūtu skatu no sāniem un labāk apgaismotu spraugas starp buksēm, attēli tika uzņemti aptuveni 30° leņķī.

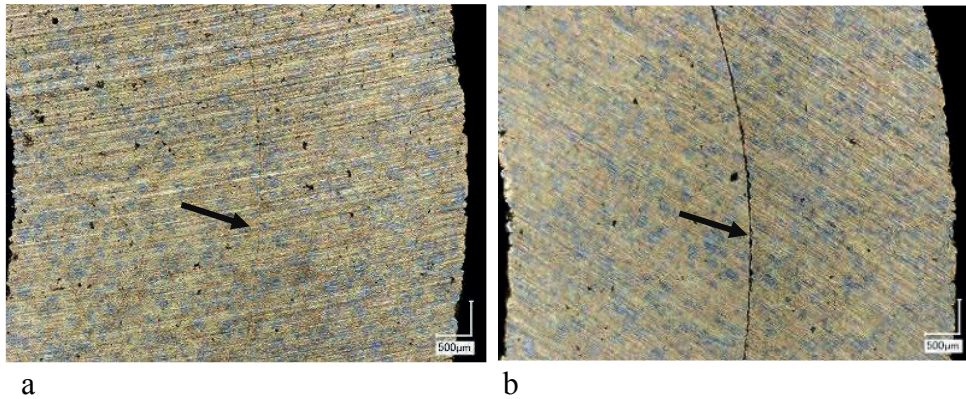


3.11.att. Rentgena filmu paraugi ar blīvās a) un vājās b) apspaides attēlu [54]



3.12. att. Rentgena filmu paraugi (skats no sāna) ar blīvās a) un vājās b) apspaides attēlu [54].

Pēc nesagraujošās kontroles bukses tika sagrieztas šķērsām asij, lai mikroskopiski novērotu robežas starp iekšējo un ārējo daļu. Blīvākas un mazāk blīvas apspaides paraugi, kas noved pie optiski redzamo spraugu atšķirībām starp iekšējo un ārējo buksi un variē no nulles līdz vairākiem desmitiem mikronu, ir parādīti 3.13. attēlā. Stingras apspaides gadījumā adhēzija starp detaļām notiek savstarpējās mikrokristālu iespiešanās līmenī, nodrošinot mehānisku viengabalainību.



3.13. att. Šuvju fragmentu paraugi ar blīvu a) un vāju b) nopresēšanu starp iekšējo un ārējo buksi; bultas parāda savienojuma robežu [54].

### Metožu salīdzinājums

Izmēģinājumos abas nesagraujošās kontroles metodes uzrādīja vienādu jutību, atšķirot detaļas ar blīvu un vāju apspaidi. Atšķirība starp ultraskaņas un rentgenogrāfijas metodēm izriet no to fiziskajiem principiem, kad ultraskaņa atklāja mehānisku plīsumu, kas novērta 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 nesagraujošās kontroles metodi, tā parādīja gan ultraskaņas, gan rentgenogrāfijas metožu jutīgumu, atklājot blīvu un vāju apspaidi. Standarta ultraskaņas kontroles lietošanas sarežģījumus savienojumos buksē - buksē izraisīja augstāks ultraskaņas vājinājums pulverveida bronzas grafiņa savienojumā salīdzinot ar lieto metālu. Apspaide ar PMD 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

Nepieciešamība paaugstināt PM īpašības stimulē dažādu papildus apstrādes veidu izstrādi un pielietošanu PM ražošanas procesa finišā. Šādas finiša operācijas ir dažādi termiskās un mehāniskās apstrādes veidi, korozijaizsardzība, piesūcināšana u.c. [40].

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 MA neiztikt. Visbiežāk saņemtos pulverizstrādājumus pakļauj papildu apstrādei, kalibrējot un sagriežot.

Apstrāde virpojot ir visizplatītākais metāla griešanas process, un tas ir augsti optimizēts process, kas prasa rūpīgu dažādu faktoru apsvēršanu virpošanā.

Šobrīd vairs netiek apšaubīts fakts, ka atsevišķu pulverdetaļu virsmu, tādu kā sēžas virsmas, rievās, vītņos, maza diametra atveres un virkne citu līdzīgu elementu, griešanas mehāniskā apstrāde ir visefektīvākā formas veidošanas metode. Turklāt galējās izmēru precizitātes sasniegšana, neizmantojot mehānisko apstrādi, ne vienmēr ir tehniski un ekonomiski lietderīga, jo tas liek nepamatoti paaugstināt štancēšanas aprīkojuma darba elementu precizitāti un ierobežot tā ekspluatācijas termiņu sakarā ar pārmērīgu nodilumu [6]. Vislabākie pulverizstrādājumu izgatavošanas tehnoloģiskā procesa tehniski – ekonomiskie rādītāji tiek sasniegti, racionāli kombinējot tehnoloģiskās operācijas.

Sistemātiski apstrādājamības pētījumi, griežot saņemtos pulvera materiālus (SPM), tiek veikti kopš pagājušā gadsimta 60. gadu vidus. Pētījumi atspoguļoti A.Artamonova, I.Armarego, B.Belkeviča, V.Konoņenko un citu autoru darbos [4], [10], [74]. Šajos darbos parādīts, ka SPM ir zemāki apstrādājamības rādītāji griežot gan griešanas ātrumā, gan arī griežējinstrumentu izturības ziņā nekā analogiskiem pēc ķīmiskā sastāva karsti velmētiem materiāliem.

Apstrāde griežot tiek veikta uz virpām, frēzmašīnām, urbšanas un citiem metālapstrādes darbgaldiem. Jebkurš PM mehāniskās apstrādes veids izraisa elastības un plastisko deformāciju, ko savukārt pavada berze un siltuma izdalīšanās, virsmas slāņu sablīvēšanās vai sairšana. 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 [46]. Veicot griešanu, tiek izmantoti eļļošanas un dzesēšanas šķidrumi, kas nonāk izstrādājuma porās. Sakarā ar to pēc mehāniskās apstrādes

nepieciešama rūpīga izstrādājumu mazgāšana. Vēl svarīgāks šis apstāklis ir tad, ja pirms mehāniskās apstrādes tiek veikta piesūcināšana ar eļļu, jo īpaši antifrikcijas izstrādājumiem.

Noteiktu ietekmi uz apstrādājamību, griežot SPM, nosaka sākotnējo pulveru īpašības. Labākā apstrādājamība ir materiāliem, kas izgatavoti no pulveriem ar mazāko oksīdu un nemetāla ieslēgumu saturu, kam paaugstināta abrazīvā iedarbība uz griešanas instrumentu. Konstatēts [73], ka apstrādājot homogēnus materiālus, priekšroka dodama instrumentiem no titāna-volframa sakausējumiem un minerālkeramikas, bet apstrādājot heterogēnus, volframa cietajiem sakausējumiem. Pierādīta arī iespēja iegūt uzlabotu apstrādājamību ar griešanu, leģējot SPM ar kalciju un kalciju-fosforu saturošiem savienojumiem, kas sadalās saķepināšanas stadijā, veidojot aktīvus reducējošos elementus. Tādu materiālu apstrādes kvalitāte tika pētīta A.V. Skorikova disertācijas darbā [82].

Darbā [73] pētītas griešanas režīma un griežņa priekšējā leņķa ietekmes likumsakarības uz galvenajiem skaidu veidošanās parametriem, virpojot SPM ar cietsakausējuma instrumentu.

Pirms eksperimentu veikšana mehāniskajā apstrādē tika noteikts īpatnējo griešanas spēku, kontakta slodžu un spriegumu no griešanas režīma, un 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.

Darbā [82] SPM virpošanai ar paaugstinātu porainību tiek rekomendēti sekojoši 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 bukse, kas izgatavota no materiāla Fe-C-Cu. Bukse tika izgatavota no pulvermateriāla, kas satur Ni un Mo mazāk par 0,3% un ir ar zemu fosfora saturu [37]. Ķīmiskais sastāvs un īpašības redzamas 4.1. tabulā.

4.1. tabula

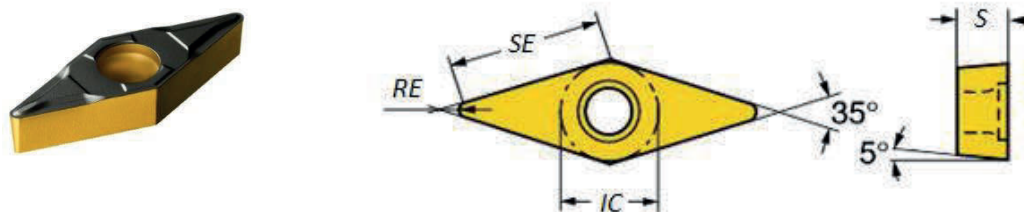
Eksperimentālās detaļas ķīmiskais sastāvs un materiāla īpašības

| Komponenti<br>[masas daļa, %] |      |      |      |      |      |      |           | Pulvera īpašības            |                                             |                                     |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|-----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
|                               |      |      |      |      |      |      |           | Plūsta-<br>mība<br>[s/50 g] | Uzbēruma<br>blīvums<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Sablīvējums<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
| Fe                            | Ni   | Cu   | Mo   | S    | P    | C    | Kennolube |                             |                                             |                                     |
| 96,5                          | 0,22 | 2,27 | 0,28 | 0,04 | 0,01 | 0,68 | 0,7       | 40                          | 3,15                                        | 6,85                                |

### Griežējinstrumenti

Finiša apstrādes operācija nodrošina visapmierinošāko apstrādājamās detaļas virsmas raupjumu. Izvēlēta griešanas plāksne paredzēta detaļu griešanai no materiālu grupām ISO P (tērauds) un ISO M (nerūsējošais tērauds). Griešanas plāksnei kods *ISO:VBM 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 [38].

### Virsmas raupjuma parametri

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

Mašīnu detaļu virsmu raupjums atkarīgs no daudziem faktoriem: apstrādes metodes, griešanas režīmiem, ģeometriskiem parametriem un instrumenta griešanas daļas virsmu kvalitātes, apstrādājamā materiāla plastiskās un elastīgās deformācijas, tehnoloģiskās sistēmas stingrības („darbgalds – palīgierīce – instruments – sagatave”) un ar to saistītajām piespiedu deformācijām, svārstībām un vibrācijām griešanas laikā, eļļošanas un dzesēšanas šķidruma u.c.

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 [38]:

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

kur  $f$  - padeve mm/apgriezi.;  $RE$  – virsotnes rādiuss.

Raupjums var būt griežņa vai cita griezējinstrumenta atstātās pēdas, formas vai štances negludumu kopija, var parādīties kā griešanas laikā radušās vibrācijas sekas, kā arī citu faktoru rezultātā.

Vienādojumu (4.1) 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 sekojošu vienādojumu [27]:

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

kur  $\varphi$  - galvenais griezējšķautnes leņķis, bet  $\varphi_1$  – 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 un 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 [38]:

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

kur

*A* - mērījuma šķērsriezuma laukums,

*Z* (*x*, *y*) - funkcija, kas attēlo virsmas augstumu attiecībā pret montāžas plakni vai cilindru.

Tika arī nolemts izmantot citu trīsdimensiju virsmas raupjuma parametru *Sq*, kas nosaka vidējo kvadrāta virsmas raupjumu. Turklāt, *Ra* (vidējais profila raupjums) tika izvēlēts kā divdimensiju vai profila raupjuma parametrs.

### **Griešanas parametri**

Griešanas režīmi tika izvēlēti griešanas plāksņu ražotāja *Sandvik Coromant* piedāvātā diapazona robežās. Sekojot 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. Dzesēšanas šķidruma izmantošana var piesārņot sagatavi sakarā ar tās lielo porainību. Izmantojot dzesēšanas šķidrumu, nepieciešama papildus operācija (attīrīšana), kas var palielināt izgatavošanas izdevumus un ne vienmēr nodrošina apmierinošu attīrīšanu. Tāpēc tika pieņemts lēmums neizmantot dzesēšanas šķidrumu un attiecīgi regulēt griešanas ātrumu.

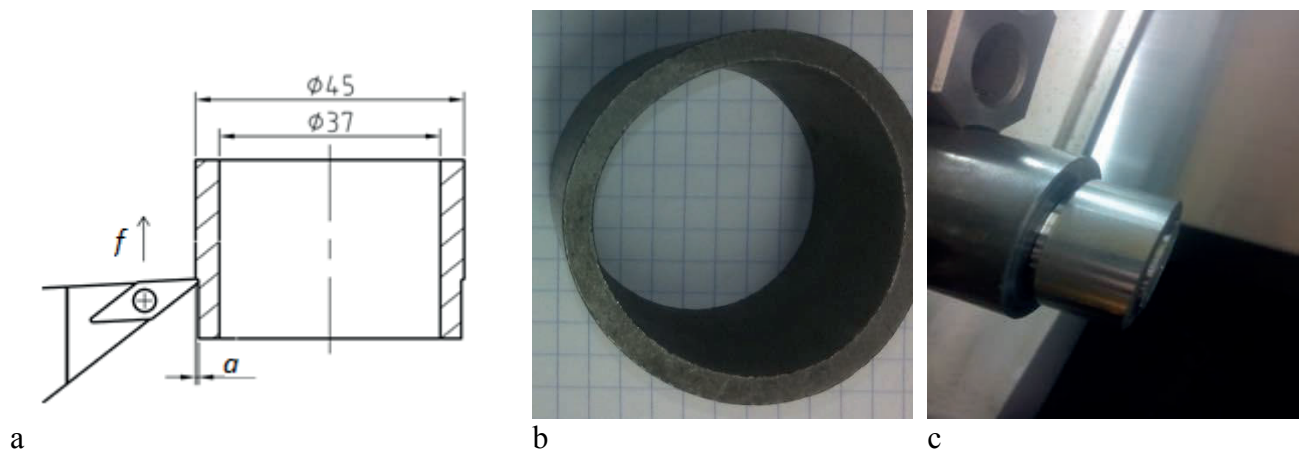
Griešanas dziļums saglabājās pastāvīgs, jo tas nenodrošina tāds pat adaptīvos raksturlielumus kā griešanas ātrums un padeve. Pēc eksperimenta rezultātiem var tikt izstrādāts prognozēšanas matemātiskais modelis. Nākamais modelis var tikt konfigurēts, lai nodrošinātu adaptīvo padeves un griešanas ātruma 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* (4.2. att.). Bukses virpošanas shēma redzama 4.3a. attēlā.



4.2. att. Okuma L200 E-M.

Pārbaudāmā metālpulvera buksē ir detaļa ar plānām sienām un mehāniskās apstrādes laikā pakļauta deformācijām (4.3. b att.), tāpēc tika izgatavota speciāla palīgierīce (4.3. c att.), kas izslēdza deformāciju detaļas virpošanas apstrādes laikā.



4.3. att. a) bukses apstrādes shēma; b) augstā spiediena dēļ no ietveres puses deformētā buksē; c) bukses uzstādīšana virpā, izmantojot speciālo palīgierīci [38].

No teorijas [4] zināms, ka no griešanas režīmiem visbūtiskākā ietekme uz virsmas raupjuma veidošanās procesu ir padevei un griešanas ātrumam.

Pēc izpētes rezultātiem (4.2. 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.

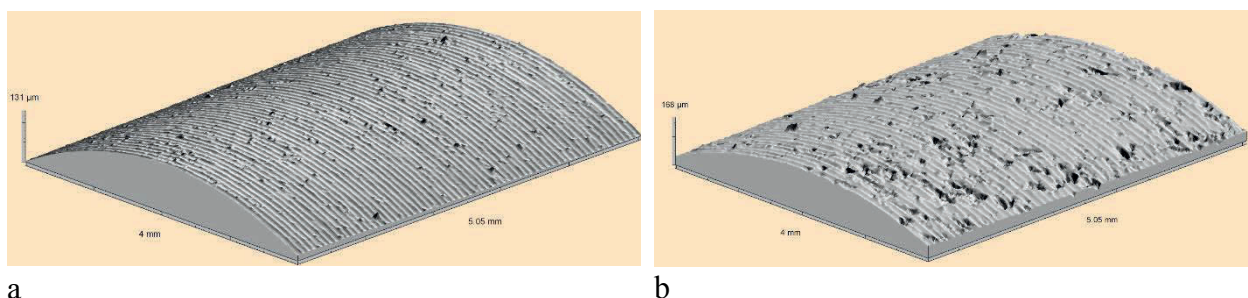
Cita aina rādīsies, ja izmainīs padevi. Kad padeve  $f$  tika izmainīta, to palielinot no 0,08 mm/apgriez. līdz 0,1 mm/apgriez., virsmas raupjums palielinājās gandrīz divkārtīgi. Var secināt, ka padeves izmaiņas vienā apgriezienā  $f$  (mm/apgriez.) ietekmē pulvera detaļu virsmas raupjuma izmaiņas daudz vairāk nekā griešanas ātrums  $v$ .

4.2. tabula

Griešanas optimālo parametru izvēle pēc virsmas raupjuma mērījumiem [38]

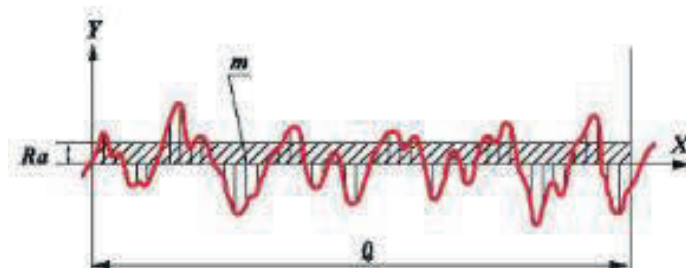
| Eksperimenta Nr. | Vidējais profila raupjums $Ra$ , $\mu\text{m}$ | Vidējais virsmas raupjums $Sa$ , $\mu\text{m}$ | Vidējais kvadrāta virsmas raupjums $Sq$ , $\mu\text{m}$ | Griešanas dziļums $a$ , mm | Padeve $f$ , mm/apriez. | Griešanas ātrums $v$ , m/min |
|------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 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 (4.4 b att.).



4.4. att. Trīsdimensiju virsmas raupjuma grafiskais attēlojums a) 2. eksperimentam un b) 1. eksperimentam [38].

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 izmērāmās līnijas, tad tie tiek ignorēti, sniedzot nepatiesu informāciju par virsmu. Divdimensiju parametra  $Ra$  noteikšanas piemērs parādīts 4.5. attēlā.

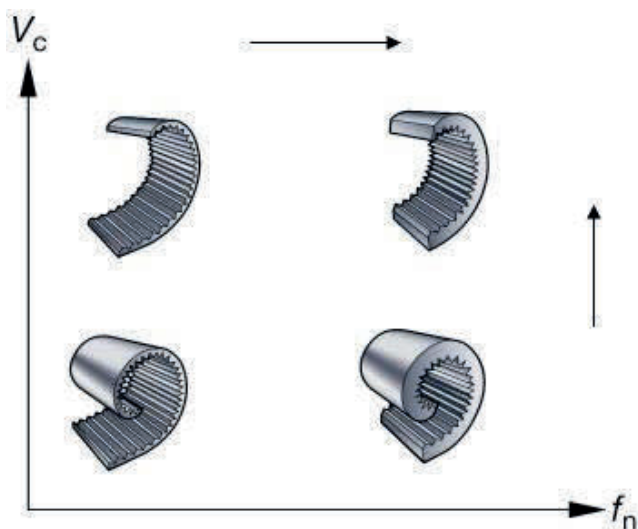


4.5. att.  $Ra$  profila vidējā raupjuma noteikšanas piemērs.

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.

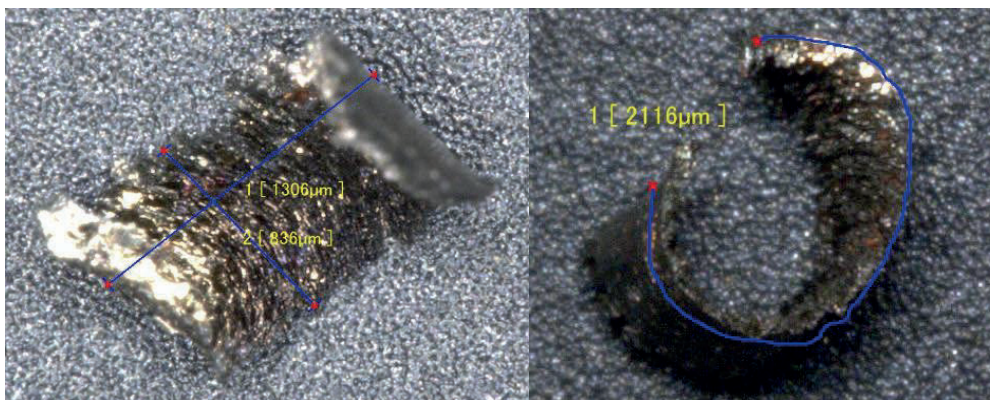
Skaidas forma, ko ir ērti noņemt no tehnoloģiskā aprīkojuma darba zonas, pašlaik ir svarīgs griešanas procesa raksturlielums. Skaidas forma un izmērs parasti ir atkarīgs no apstrādājamā materiāla īpašībām, kā arī no detaļas griešanās ātruma un griežņa padeves dziļuma (4.6. att.).

Rezultātā tika izpētīta skaidas morfoloģija pulvera detaļu apstrādes laikā.



4.6. att. Skaidas morfoloģijas atkarība no ātruma un padeves dziļuma [100].

Iegūtā skaida klasificēta kā diskrēta vai segmenta skaida. Šo skaidu ērti savākt, apstrādāt un izmantot. Ģeometriskie izmēri parādīti 4.7. attēlā. Pēc skaidas izpēti un mērījumiem var izdarīt secinājumu, ka konkrētā pulverdetaļu apstrādes procesa skaidas forma nerada papildus sarežģījumus apstrādei.



4.7. att. Skaidas morfoloģija, kur parādīts 836 µm platais skaidas segments, paredzamais garums 1306 µm un kopējais garums 2116 µm. [38].

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 ( $Sa = 0,41 \mu\text{m}$ ) tika sasniegts, izmantojot šādus režīmus: griešanas dziļums  $a = 0,5 \text{ mm}$ , padeve  $e = 0,08 \text{ mm/apgriez.}$  un griešanas ātrums  $v = 130 \text{ m/min}$  [38].

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 papildus 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**

Berzei, nodilumam un eļļošanai ir būtiska ekonomiska nozīme, jo šie faktori nosaka mašīnu un aprīkojuma kalpošanas laiku. Berzes un nodiluma blakusefekti, kā arī ģeometrijas izmaiņas, vibrācijas noved pie funkcionalitātes zuduma, pēkšņi sabojājoties vai pakāpeniski pasliktinoties triboloģiskās sistēmas īpašībām [50]. Jo īpaši svarīgi to ņemt vērā, izgatavojot detaļas dzelzceļa transportam ar antifrikcijas uzdevumu.

Faktori, kas ietekmē berzi un nodilumu, atkarīgi ne tikai no materiālu īpašībām. Tie atkarīgi no daudziem citiem parametriem. Pat nelielas izmaiņas noteiktos apstākļos var būtiski ietekmēt berzes koeficientu un metālpulvera detaļu nodiluma pakāpi. Šīs izmaiņas attiecas uz daļiņu kontaktu izmaiņām, temperatūras un apkārtējās vides relatīvā mitruma iedarbību [22]. Svarīgi faktori ir slīdēšanas ātruma, smērvielu viskozitātes ietekme un normāla spēka darbība eļļošanas sistēmās.

#### **Eļļas darbības efektivitāte**

No berzes adhēzijas-deformācijas rakstura viedokļa to rada, no vienas puses, adhēzijas mijiedarbības spēku un attiecīgi sakaru tiltiņu stipruma samazināšanās, kas samazina deformējamajā tilpumā attīstošos tangenciālos spriegumus, kā arī paša deformējamā tilpuma lielumu. No otras puses, tas saistīts ar pretestības pazemināšanos pret elastīgo vai plastisko pārvietojumu vai, visbeidzot, ar plānās virsmas kārtas sagraušanu un tās galīgo lokalizāciju, t.i., ar mehānisko īpašību gradienta palielināšanos. Tā atkarīga no eļļošanas materiāla īpašībām, tā molekulu uzbūves, ķīmiskā sastāva, temperatūras un virknes citu parametru, kas saistīti savā starpā. Šajā gadījumā eļļošanas iedarbību nosaka ne tikai no ārpuses ieviesta eļļošanas materiāla īpašības, bet arī tā mijiedarbība ar cietā ķermeņa virsmu un cietajām virsmām savā starpā [40]. Tāpēc eļļošanas materiāla izvēle nedrīkst būt nejauša rakstura un tai jānotiek, ņemot vērā kontaktķermeņu materiālu, tā termoapstrādi, mikroģeometriju un citus projektējamo mašīnu mezglu berzes virsmu konstrukcijas un tehnoloģiskos parametrus. Materiālu virsmas īpašību dominējošā nozīme kļūst īpaši redzama gadījumos, kad cieto

ķermeņu slīdēšana tiek veikta robežēlļošanas apstākļos. Berzes koeficients robežēlļošanas apstākļos var tikt attēlots kā attiecība [64]:

$$f = a \cdot \frac{\tau_0}{C \cdot \sigma_T} + (1 - a) \cdot \frac{\tau_{cm}}{C \cdot \sigma_T}, \quad (4.4.)$$

kur  $a$  – kontakta laukuma daļa, kurā notiek divu cietu ķermeņu tiešs kontakts;  $\tau_0$  berzes virsmu materiāla bīdes pretestība;  $\tau_{cm}$  eļļošanas materiāla plēves bīdes pretestība;  $\sigma_T$  berzes ķermeņu materiāla plūstamības robežas vidējā vērtība;  $C$  – kontakta formas koeficients.

Sakarība (4.4) neņem vērā berzes deformācijas komponenti, kas pazemina tās praktisko vērtību. Tomēr dažos gadījumos tā ļauj izskaidrot, bet dažreiz arī pateikt priekšā cietu ķermeņu berzes koeficienta izmaiņu raksturu robežēlļošanas apstākļos.

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

#### 1. Neorganiskās vielas:

- slāņaini (ugunsizturīgi metāla (molibdēna, volframa, niobija grafiits, fluorēts grafiits, bora nitrīds, talks, vizla u.c.) dihalogenīdi;

- neslāņaini (hlorīdi, fluorīdi, metālu jodīdi, metālu oksīdi, mīkstie metāli Pb, Sn, Cd, Jn, Ga, Ag, Al un citi).

#### 2. Organiskie polimēru materiāli:

- fluora polimēri, poliamīdi, polietilēns un citi [40], [62].

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

Dzelzceļa transportā bremžu iekārtās metālpulvera bukses visbiežāk tiek izmantotas bremžu sviru sistēmās, kur griešanās ātrumi salīdzinoši nelieli. Tomēr berzes koeficients ir svarīgs, jo ietekmē bukses nodilumu, kā arī citus ar BSP stabilu darbu saistītus faktorus [36].

Lai nodrošinātu pašēlļošanas efektu, bukses tiek piesūcinātas ar hidraulisko eļļu ar vai bez modificējošām piedevām. Tādējādi jau kustības sākumā starp vārpstu un gultni ir eļļas plēve, kas rada labvēlīgus darba apstākļus. Palielinoties slīdēšanas ātrumam hidrodinamiskā spiediena dēļ, eļļa tiek iespiesta porainajā materiālā, tāpēc konkrētajā gadījumā netiks novērots izteikts eļļas ķīlis, kas rodas lielos rītes gultņos. Pie maziem griešanās ātrumiem porainie dzelzs - grafiita gultņi, kuriem ir ierobežotas eļļas rezerves, var darboties pašēlļošanas režīmā pietiekami ilgi. [60].

Starp populārākajām modificējošajām piedevām ir karbīdi, borīdi, metālu oksīdi. Vislielākais pielietojums ticis atrasts oglekļa materiāliem (oglekļa nanocaurulēm, fullerēniem un ultradispersām dimanta - grafiita kompozīcijām). Darbā [42] apskatīta triboloģisko īpašību paaugstināšanas metode, izmantojot gultņu smērvielas, kuras aktivētas ar nanoizmēra dimanta - grafiita piedevām. Praktiskam pielietojumam 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. Dispersa vide un dispersie komponenti

Dispersie komponenti naftas smēreļlās pēc to rašanās formas var tikt iedalīti trīs galvenajos veidos:

1. dispersie komponenti, ko ģenerē berzes un eļļas oksidēšanās procesā (nodiluma daļiņas: metāla, oksīdu; parafīni un cerezīni, kas izkristalizēti, pazeminot temperatūru; kvēpu, pelnu, laku daļiņas; gāzu pūslīši, kas izveidojušies mezglā un no mezglas komponentiem utt.
2. dispersie komponenti, kas nonāk berzes mezglā dabiskā veidā no ārpuses vielas un enerģijas apmaiņas laikā ar ārējo vidi (putekļi, smiltis, gumijas daļiņas (sablīvējumu nodiluma gadījumā); ūdens vai cita šķidruma daļiņas, kas nejauši nonāk sistēmā; gāzu pūslīši; mikroorganismi);
3. dispersie komponenti, kas mērķtiecīgi tiek pievienoti berzes mezglā, lai uzlabotu eļļošanas materiālu tribotehniskās īpašības (cieto smērvielu, metālu, bināro sakausējumu daļiņas utt.) [63].

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

Pareiza komponentu attiecība eļļās praktiski nosaka to ekspluatācijas īpašības. Svarīgs disperso komponentu, ko var saturēt naftas smēreļļas, paveids ir tajos mērķtiecīgi ievadītas augstas dispersijas piedevas, kas sastāv no metālu un sakausējumu daļiņām, cietajām smērvielām un citām vielām.

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

1. grupa – liela izmēra cietās daļiņas (virs  $5\mu$ ), 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. Turklāt augstas dispersijas daļiņas izpilda sekojošas, pēc I.Korogodska domām, svarīgas funkcijas [63]:

- a) aizpilda un aizšpaktelē mikroiedobumus, adsorbējoties uz berzes virsmām sienas slāņa molekulu brīvo saišu dēļ, palielina faktiskā kontakta laukumu, bet attiecīgi samazina īpatnējo spiedienu sasaistē;
- b) stingri adsorbējas uz mikroizciļņiem un paaugstina smēreļļas adhēzijas spēju, kas noved pie straujas eļļošanas plēves plīsumu un pilnīgas pazušanas gadījumu samazināšanās, kā arī berzes virsmu kontakta punktu samazināšanās robežnosacījumos, veicinot saistīšanās un ierāvumu gadījumu skaita samazināšanos piestrādes procesā;
- c) paaugstina eļļošanas plēves nestspēju un sakarā ar smēreļļas daudzmolekulāro slāņu veidošanos rada iespēju berzes virsmu relatīvai kustībai smērvielas materiāla sienas slāņu, kam kvazicieta korpusa īpašības un zems berzes koeficients, nobīdes un slīdēšanas dēļ;
- d) nodrošina visplānāko virsmas slāņu plastificēšanu, smalku disperģēšanu un izvirzīto mikronegludumu izlīdzināšanu, pateicoties smēreļļā esošo virsmas aktīvo vielu iekļīlējošajai darbībai.

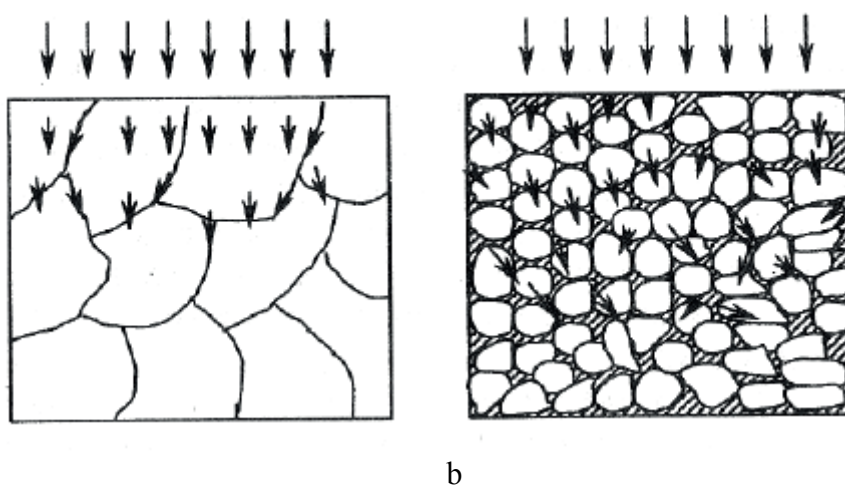


Palielinoties spiedienam, daļiņu konglomerāti peptizējas, palielinot savu dispersitāti. Šīs daļiņas pēc lieluma ir mazākas par eļļas plēves biezumu un neiedarbojas abrazīvi uz berzes virsmām, līdz noteiktām robežām aizkavējot mašīnu un mehānismu detaļu berzes virsmu kontakta rašanos.

Visplašāko izplatību ieguvuši naftas smērēļļās ievadāmie dispersie komponenti no grafīta un molibdēna disulfīda daļiņām. Grafīts ir diamagnētisks, tam ir sešstūra režģa struktūra un anizotropiska elektriskā vadītspēja, kas ir 25 reizes lielāka sešstūra ass virzienā nekā kristāla režģa galvenajā plaknē. Grafītam ir ļoti augsta ķīmiskā stabilitāte un tas ir praktiski inerts pret radioaktīvo starojumu [12].

Molibdēna disulfīdam  $\text{MoS}_2$  (molibdenīts) piemīt slāņaina struktūra un tas kristalizējas sešstūra sistēmā ar trigonālo simetriju. Tā cietība pēc Moosa skalas ir 1,0 – 1,5 un jau vairāk kā 50 gadus tas tiek izmantots kā cietais eļļošanas materiāls. Molibdēna disulfīdam piemīt ļoti augsta ķīmiskā stabilitāte, tas ir izturīgs pret lielāko daļu skābju un nav jutīgs pret radioaktīvo starojumu. Molibdēna disulfīda eļļošanas darbība, tāpat kā grafītam, ir balstīts uz tā kristālisko struktūru [28].

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 4.8. attēlā [68].



4.8.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. Pēc fizikāli – ķīmiskajiem rādītājiem *MS-20* jāatbilst prasībām un normām, kādas norādītas 4.3. tabulā [63].



Eļļas MS-20 fizikāli-ķīmiskie rādītāji

| Rādītāja nosaukums                                                  | Vērtība |
|---------------------------------------------------------------------|---------|
| Kinemātiskā viskozitāte 100° C, mm <sup>2</sup> /s. (cSt), ne mazāk | 20,05   |
| Viskozitātes indekss, ne mazāk                                      | 80      |
| Koksējamība, %, ne vairāk                                           | 0,29    |
| Pelanainība, %, ne vairāk                                           | 0,003   |
| Uzliesmošanas temperatūra °C, ne zemāk                              | 265     |
| Sastingšanas temperatūra, ne augstāk                                | -18     |
| Termooksidācijas stabilitāte 250° C, ne mazāk                       | 18      |
| Blīvums 20° C, g/cm <sup>3</sup> ne vairāk                          | 0,897   |

Smēreļļās parādotes 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<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> WSe<sub>2</sub> u.c.) saglabā eksploatacijas īpašības plašā temperatūru diapazonā no -100°C līdz +1000°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 (0,4–0,5 MPa) ar relatīvo nobīdi, lai smērvielas daļiņas savienotos ar virsmu, veidojot kopēju plēvi [64]. Saspiešanas laikā ar nobīdi cieto smērvielu materiālu daļiņas sasaistās ar cietā ķermeņa mikro nelīdzenumiem un orientējas ar bāzes plaknēm paralēli virsmai. Dažu slāņaino cieto materiālu fizikāli – mehāniskās īpašības parādītas 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Dažu slāņaino cieto materiālu fizikāli – mehāniskās īpašības [61].

| Rādītājs                    | Dabīgs grafiņš | MoS <sub>2</sub>      | WS <sub>2</sub>       | MoSe <sub>2</sub> | WSe <sub>2</sub> | NbSe <sub>2</sub> | BN  |
|-----------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----|
| Kristāliskā režģa parametri | a              | 1,42                  | 3,16                  | 3,187             | 3,28             | 3,29              | 2,5 |
|                             | c              | 3,35                  | 12,29                 | 12,525            | 12,97            | 12,97             | 5   |
|                             | c/a            | 2,4                   | 3,9                   | 3,92              | 3,92             | 3,94              | 5   |
| Blīvums kg/cm <sup>3</sup>  | 2100           | 4700                  | 7400                  | 6900              | 9220             | 6250              | 22  |
| Moosa cietība               | 1,0...1,5      | 1...2                 | 1,0                   | -                 | -                | -                 | 1,0 |
| Elastības modulis MPa       | 5050           | 8500                  | -                     | -                 | -                | -                 | 228 |
| Oksidēšanas temperatūra C°  | 400            | 350...400             | 500                   | 400               | 350              | 350               | 700 |
| Sadalīšanās temperatūra C°  | 3500           | 1000...1300 (vakuumā) | 1300...1500 (vakuumā) | -                 | -                | -                 | 300 |

### 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 materiāla, kura pamatā dzelzs – grafiits – varš.

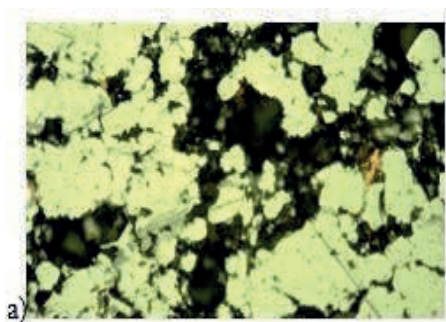
Kā dispersa vide tika izmantota eļļa *MS-20*, kā dispersas piedevas – volframa dihalogēnu pulveri - disulfīda  $WS_2$  un diselenīda  $WSe_2$ .

Bukses no konkrētā sakausējuma tika izgatavotas ar pulvera metalurģijas metodi, izgatavošanai tika izmantots daudzkomponentu pulveru maisījums  $AHC100.29 + 2,27\% Cu + 0,22\% Ni + C$  [37]. Ģeometriskie izmēri un fizikāli – mehāniskās materiāla īpašības redzamas 4.5. tabulā. Bukšu mikrostruktūra un ārējais izskats redzami 4.9. attēlā.

4.5. tabula

Fizikālās un mehāniskās materiāla ( $AHC100.29 + 2,27\% Cu + 0,22\% Ni + C$ ) īpašības

| Parametri                                | Vērtības                |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Blīvums, g/cm <sup>3</sup>               | 6,0 – 6,4               |
| Atklāta porainība, %                     | 10 - 19                 |
| Cietība HB,                              | ne mazāk par 900        |
| Stiprības robeža radiālā saspiešanā, MPa | ne mazāk par 470        |
| Mikrostruktūra                           | Perlīts, sulfīdi, poras |



a

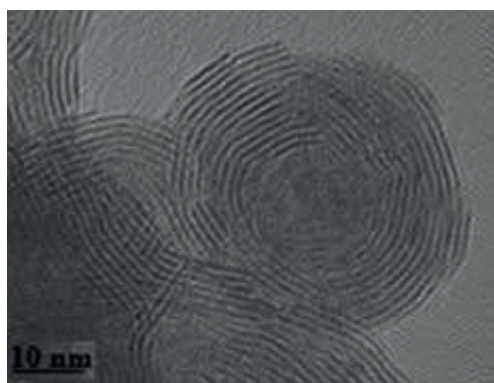


b

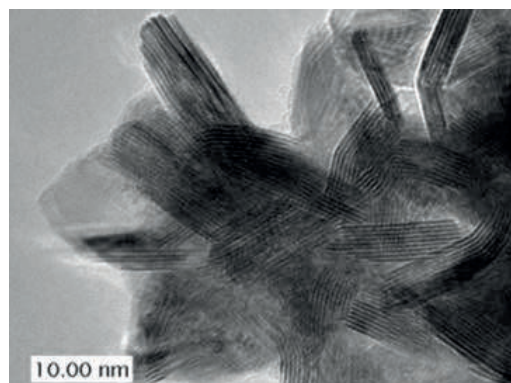
4.9. att. a) bukšu mikrostruktūra un b) ārējais izskats [53].

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

Volframa disulfīda nanodaļiņām ir sfēriska forma ar diametru 30-50 nm (4.10. a att.), savukārt volframa diselenīda daļiņām ir plakana forma ar vidējiem izmēriem 5 nm × 70 nm, (4.19. b att.) [56; 57].



a

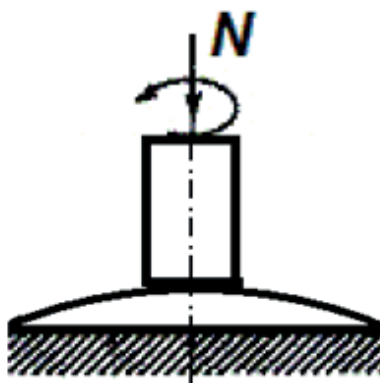


b

4.10. att. TEM mikrogrāfija a) ar  $\text{WS}_2$ , un b)  $\text{WSe}_2$  nanodaļiņām [53].

Ar eļļu *MS-20*, *MS-20+WS<sub>2</sub>*, *MS20+WSe<sub>2</sub>* 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*. Pārbaudāmā materiāla cilindriskais paraugs 10 mm diametrā tika saspiests frikciju mašīnas darbvārpstā. Triboloģiskā testa shēma parādīta 4.11. attēlā. Izmēģinājuma buksē tika ievietota zem parauga un nostiprināta speciālā spailē uz grozāmas pamatnes, kas no pagriešanās tika atturēta ar metāla vadu, kas nostiprināts uz tenzodevēja. Papildu pārbaudes paplašinātā temperatūras diapazonā tika veiktas izmantojot iekārtu materiālu triboloģisko īpašību novērtēšanai (LV Patents Nr.15225, 7. Pielikums) [45], [79].



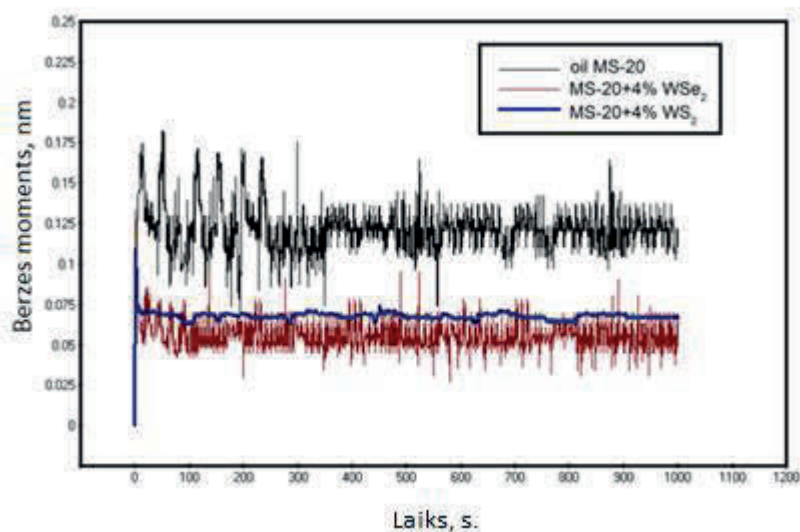
$N = 210 \text{ N}$   
 $n = 200 \text{ apgriez./min}$

4.11. att. Triboloģiskā testa shēma.

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 parādīta 4.12. 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 plēvēm.



4.12. att. Berzes momenta atkarība no laika, izmēģinot ar eļļu *MS-20* un eļļošanas kompozīcijām, ar 4%  $\text{WSe}_2$  un 4%  $\text{WS}_2$ , piesūcinātus paraugus [53].

Grafiks 4.12. attēlā parāda, ka berzes momenta atkarībai no laika, buksēm kas piesūcinātas ar eļļu *MS-20* un eļļošanas kompozīciju ar  $\text{WSe}_2$ , ir “lēčieni” berzes momentā, kas var būt saistīti ar kontaktu un oksīda plēvju sairšanu. Vēlāk pēc smērēļļas izspiešanas no porām griezes momenta svārstības samazinās. Tā kā nominālais kontakta laukums ir mainīgs, berzes procesā piedalās jauni apgabali ar oksīdu plēvēm, kuras arī sairst, atverot ceļu smērēļļai uz virsmām.

Testējot paraugus ar eļļošanas kompozīciju izmantojumu, pēc berzes notiek krasa berzes momenta pazemināšanās dēļ eļļošanas kompozīcijas izspiešanas uz berzes virsmas un nanodaļiņu, kas ievadītas eļļošanas kompozīcijās, mijiedarbības ar berzes virsmu. 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 [53].

Visstabilāko berzes momentu uzrādīja bukses, kas piesūcinātas ar eļļošanas kompozīciju *MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>*. Var atzīmēt, ka eļļošanas kompozīcijai, kas satur sfēriskas volframa disulfīda nanodaļiņas, berzes sākuma momentā raksturīgie ar oksīda plēves sairšanu saistītie „lēčieni” 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, bet nonāk kontaktā. Šajā gadījumā ievadāmo daļiņu sfēriskā forma var veicināt stabilākus antifrikcijas rādītājus.

Balstoties uz veiktajiem pētījumiem, autors secinājis sekojošo:

Buksēs, kas piesūcinātas ar eļļošanas kompozīciju *MS-20 + 4% WSe<sub>2</sub>* un *MS-20+ 4% WS<sub>2</sub>*, vidējais berzes moments samazinās attiecīgi par  $\approx 53\%$  un  $\approx 44\%$  salīdzinājumā ar buksēm, kas piesūcinātas ar eļļu *MS-20* [53].

Visstabilāko berzes momentu uzrādīja bukses, kas piesūcinātas ar eļļošanas kompozīciju *MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>*.

## 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, tika 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<sub>2</sub>* un *MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>*, 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 radiografijas 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<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> nanodaļiņām, berzes koeficienta samazināšanai un tribotehnisko īpašību paaugstināšanai.

## 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. Ahsan, M., Pinkerton, A., Ali, L. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. In: *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research*, Leiria, Portugal. 28. november 2011, pp.625-633.
3. Angelo, P.C., Subramanian, R. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2015. 300p. ISBN. 978-81-203-3281-2.
4. 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>
5. Beiss, P. Principles of Metal Powder Compaction. In: *European Powder Metallurgy Association Training Course*, Germany, Aachen, Sept, 2005, pp.109–134.
6. 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.
7. Bortzmeyer, D. Dry pressing of ceramic powders. In: *Ceramic Processing* (ed. Terpstra, R.A.), London: Chapman & Hall, Weinheim, 1995, pp. 102-146. ISBN 978-94-011-0531-6.
8. *Ceramics Science and Technology*. Vol.3: Synthesis and Processing, First Edition, Ralf Riedel (Editor), I-Wei Chen (Editor) ISBN: 978-3-527-31157-6 December 2011 554p.
9. 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. 90p.
10. 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.
11. Cui, Xiaohui & Mo, Jian-hua & Li, Jianjun. Research on homogeneous deformation of electromagnetic incremental tube bulging. 2014, in *6th International Conference on High Speed Forming – 2014*. pp. 293-301. Available from: doi: 10.17877/DE290R-851.
12. 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
13. Dudrova, E., Kabátova, M. A review of failure of sintered steels: fractography of static and dynamic crack nucleation, coalescence, growth and propagation. *Powder Metall*, Vol. 59, no. 2, pp. 148–167, 2016. Available from: doi: 10.1080/00325899.2016.1145786

14. European Powder Metallurgy Association (EPMA). *Introduction to Powder Metallurgy The Process and its Products*. 2008, Shrewsbury, U.K.
15. Freeman R., Cooke, J., Schneider, L.. Measuring shear properties and normal stresses generated within a rotational shear cell for consolidated and non-consolidated powders. *Powder Technology*. 2009, Vol. 190, no. 2, pp.65-69. Available from: doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.084>.
16. German, R.M. *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing*. Princeton NJ USA: Metal Powder Industries Federation, 2005. 522p. ISBN 0-9762057-1-8.
17. Glass, S.J. and Ewsuk, K.G. (1997) Compaction science and technology. *MRS Bull.*, 22 (12), 24–28.].
18. Goldstein, J., Newbury, D., Michael J, Ritchie N, at al. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* 4th Edition, Springer, 2018. 550 p. ISBN:978-1-4939-6674-5.
19. Hasegawa, I., Uchida. S. Braking Systems. Kanji Wako (ed). 1999 *Japan Railway Technology Today*. pp.52-59.
20. Hawkins, A. E. *The Shape of Powder-Particle Outlines*. London, England: Research Studies Press Ltd, 1993. 158p. ISBN. 978-0863-80-142-6.
21. Hernández, J.A., Oliver, J., Cante, J.C., Weyler, R. Numerical modeling of crack formation in powder forming processes. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, Vol.48, no.2, pp. 292–316
22. Ilyshenko A. 2013. Powder Metallurgy – effective method of strategical industrial tasks solutions. *Powder Metallurgy: Collection of Scientific Papers*, National Academy of Sciences of Belarus, N. 36, Minsk, Belarus, pp 7 - 30.
23. Jabur, A. Effect of powder metallurgy conditions on the properties of porous bronze. *Powder Technology* 2013, Vol.237, pp.477–483.
24. Jillavenkatesa, A. *Particle Size Characterization*. London, England: Forgotten Books, 2018. 174p. ISBN 978-1396-059-77-3.
25. Joy, D., Lyman, C., at al. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer: 2002. 689 p. ISBN 978-0-3064-7292-3.
26. 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.
27. 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.
28. Klamann D. *Lubricant and related products*, Weinheim: Wiley-VCH, 1984. 489.p. ISBN 978-3527260225
29. 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.

30. Leitans, A., Boiko, I., Lungevics, J., Mironovs, V. The Influence of the Technological Process on the Surface Quality and Tribological Properties of Powder Detail. In: *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. Vol.1, Latvia, Rēzekne, 18-20 June, 2015. Rēzekne: Rēzekne Higher Education Institution, 2015, pp.116-120. ISBN 978-9984-44-171-9. ISSN 1691-5402. e-ISSN 2256-070X. Available from: doi:10.17770/etr2015vol1.202
31. 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
32. Manjula, K., Vijayarekha, K., Venkatraman, B., Karthik, D. Ultrasonic Time of Flight Diffraction Technique for Weld Defects: A Review. 2013, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol.4, pp.5525-5533.
33. Mironovs, V., Glushchenkov, 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.
34. Mironovs, V., Korjajkins, A., Tatarinovs, A., Barone, E., Glushchenkov, 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
35. Mironovs, V., Stankevich, P., Beljaeva, I., Glushchenkov, 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
36. 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.
37. 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
38. 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.
39. 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



40. Muson, B.R., Okiishi, T.H., Huebsch, W.W., Rothmayer, A. P. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7<sup>th</sup>.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 747 p. ISBN 978-1-118-11613-5.
41. 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.
42. Paula Ussa Aldana. *Tungsten disulfide nanoparticles as lubricant additives for the automotive industry*. Université de Lyon: 2016. 164.p.
43. 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. 24p.
44. Rahaman, M.N. (2003) *Ceramic Processing and Sintering*, 2nd edn, Marcel Dekker, New York, Basel.
45. 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.
46. Robert-Perron. E., Blais. C. Green Machining: Parametrs, Applications, And Sintered Properties. 2008, *International Journal of Powder Metallurgy*. Vol.44, no.2. pp.41-53.
47. Salak, A., *Ferrous Powder Metallurgy*. Cambridge CB1 6AZ, England: Cambridge International Science Publishing, 1997. 395 p. ISBN. 978-1898326038
48. Schatt, W., Wieters, K. P., Kieback, B. *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. 2<sup>nd</sup> ed. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2007. 552 p. ISBN 978-3-540-23652-8.
49. Seifi, A., Salem A., Beuth, J., Harrysson, O., et al. Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing. *JOM*. 2016, Vol. 68, no 3, pp.747–764. Available from: doi:10.1007/s11837-015-1810-0.
50. 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.
51. 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.
52. *Standard Terminology of Powder Metallurgy*. Metal Powder Industry, 2012. ISBN 978-0981-94-968-0. Available from: doi: 10.1520/B0243-11.
53. 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
54. 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.
55. Van der Schueren, B., Kruth, J.P. Powder deposition in selective metal powder sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 1995. Vol.1, no.3, pp.23-31, Available from: doi: 10.1108/13552549510094241
  56. 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.
  57. Vasilyeva, E., Nasibulin, A., Tolochko, O., Rudskoy, A., et al. Application of WSe<sub>2</sub> Nanoparticles Synthesized by Chemical Vapor Condensation Method for Li-Ion Battery Anodes. *Zeitschrift fur Physikalische Chemie* 2015, Vol.229, no.9, pp.1429-1437. Available from: doi: 10.1515/zpch-2015-0573.
  58. Wikman, Bengt. *Modelling and Simulation of Powder Pressing with Consideration of Friction*. Doctoral Thesis. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology, 1999. 114 p.
  59. Zawada-Tomkiewicz, A. Analysis of surface roughness parameters achieved by hard turning with the use of PCBN tools, *Estonian Journal of Engineering*, Vol. 17, 2011, no. 1. pp. 88-99, Available from: doi:10.3176/eng.2011.1.09
  60. Zhang, W., Ma G., Wu, C.W. Anti-friction, wear-proof and self-lubrication application of carbon nanotubes. *Advanced Materials Science*. 2014, Vol.36, no.1. pp.74-87.
  61. Анциферов В. Н., Акименко В. Б., Гревнов Л.М. Порошковые легированные стали. – М.: Металлургия, 1991. – 318 с.
  62. Бирюков В.П. *Смазочные материалы, топлива и технические жидкости*. М.: МИИТ. 2008. 183 с. ISBN 978-5-7876-0023-0
  63. 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
  64. 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.
  65. Витязь, П. А. *Порошковые материалы на основе железа и меди. Атлас структур* Минск: Беларус. наука, 2008. 155 с. ISBN 978-985-08-0980-3
  66. Галай, Э.И., Галай, Е.Э. *Тормозные системы железнодорожного транспорта. Конструкция тормозного оборудования*. Гомель: БелГУТ, М-во образования Респ. Беларусь, Беларус. гос.ун-трансп. 2010. 315с. ISBN978-985-468-687-5
  67. Гегузин, Я. Е. *Физика спекания*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука., 1984. 312 с.
  68. Гиршов, В. Л., Котов, С. А., Цеменко, В.Н. *Современные технологии в порошковой металлургии*. Санкт-Петербург.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. 385 с.

69. Гропянов А.В., Теплухин Г.Н. *Материаловедение*. СПб: СПбГУПТД 2017. 78с.
70. Гропянов, А.В., Ситов, Н.Н., Жукова, М.Н. *Порошковые материалы*. Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2017. 74 с.
71. Гуляев, А. П. *Металловедение* М.: Металлургия, 1986. 544 с.
72. Данилов, И. И. Обработка резанием порошковых материалов. *Наука и образование* 2011. Vol.10. ISSN 1994-0408.
73. ДиаллоУмар. *Закономерности процесса резания и формирования поверхностного слоя*. Автореф. дисс. д.т.н. – Мн., 1995. -28 с
74. Дьячкова Л.Н., Керженцева Л.Ф., Маркова Л.В. Порошковые материалы на основе железа.. – Минск.: Тонпик, 2004. 228 с.
75. Казармщиков, И.Т. *Производство основных конструкционных материалов*. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. 279 с.
76. 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.
77. Крылов В. И., Крылов В. В., Ефремов В. Н. *Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава*. М.: Транспорт, 1989. 487 с.
78. Либенсон Г.А. Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. Т. 2. Формование и спекание. - М.: МИСИС, 2002. - 320 с.
79. 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. Белорусская наука, 2018, 351-354 с. ISBN 978-985-08-1838-6.
80. Полюшкин, Н.Г. *Основы теории трения, износа и смазки*.. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т. 2013. 192 с. ББК 40.72-082я73.
81. Ржевская, С.В. *Материаловедение*. М.: Логос, 2004. - 424 с. ISBN: 5-94010-307-3.
82. Скориков, А. В. *Теоретические предпосылки обеспечения заданного качества порошковых изделий и рекомендации по их практической реализации*. Автореф. Дисс. д.т.н., 2003.-186 с.
83. Хренов, О.В., Афанасьев Л.Н., Лешок А.В., *Материалы и технология порошковой металлургии*. Минск. Белорусский национальный технический университет. 2010. 37 с.
84. 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](http://russian.impulse.by/?page_id=356)
85. Fine Sinter Co., Ltd. - Powder Metallurgy Products, [online]. *Railroad application*. [viewed 21 April 2019]. Available from: <http://www.finesinter.com/english/products/pmp/railway/>

86. ScienceDirect, *Metal Powder Report*, [online]. Volume 63, Issue 2, February 2008, Pages 20-23, 25-26. [viewed 11 April 2019]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026065708700213>
87. *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>
88. Abbott Furnace Company. [online]. [viewed 11 April 2019]. Available from: <https://www.abbottfurnaceco.com/sintering-fundamentals>
89. Ametek.Inc. *Taylor Hobson releas* [online]. [viewed 26 January 2019]. Available from: <https://www.taylor-hobson.com/pressreleases/news/2013/march/new-roughness-standard-for-the-talyrond-500-series>
90. Exploring Surface Texture, *Taylor Hobson Ltd 4th Edition Leicester*, [online]. 2003. [viewed 20 January 2019]. Available from: <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorthobson/files/learning%20zone/exploring%20surface%20texture%202014.pdf?la=en>
91. 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](https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/handbooks--all-documents/handbook-1-material_and_powder_properties_december_2013_0674hog-interactive.pdf)
92. International company Smtnet CSM, *Tribometer for linear and Rotational Testing*. [viewed 2 February 2016]. Available from: [https://smtnet.com/company/index.cfm?fuseaction=product\\_catalog&company\\_id=53901](https://smtnet.com/company/index.cfm?fuseaction=product_catalog&company_id=53901)
93. 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>
94. 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>
95. 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>
96. 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>
97. 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>

98. Presi Metallography. [online]. [viewed 6 January 2019]. Available from: <https://www.presi.com/en/>
99. *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](https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/handbooks---all-documents/handbook-2_production_of_sintered_components_december_2013_0675hog_interactive.pdf)
100. Sandvik coromant. [online]. Metal cutting knowledge [viewed 10 February 2016]. Available from: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/pages/default.aspx>
101. 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](https://www.yxlon-portables.com/YxlonPortables/media/pdf/product_catalog/YXLON_Product_Catalog_v1.pdf)

## **PIELIKUMI**

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.

ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018)

## Tendencies in the field of application of metal-powder materials for repair and maintenance of railway equipment

Viktors Mironovs<sup>a,\*</sup>, Pavel Stankevich<sup>b</sup>, Janis Eiduks<sup>b</sup><sup>a</sup>Laboratory of Powder Materials, Riga Technical University, Kalku 1, LV-1006, Latvia<sup>b</sup>Institute of Transport, Riga Technical University, Kalku 1, LV-1006, Latvia

---

### Abstract

Logistics strategy in railway transport provides for a comprehensive solution of four tasks: technical, technological, economic and management. At the same time the technical task is one of the most important, because it ensures reliability of the equipment, an uninterrupted delivery of goods, a reduction of the idle time of locomotives and wagons, which in turn depends on the quality of the repair and the parts used. In the article the main tendencies in field of application of modern metal-ceramic materials for production, repair and operation of railway transport equipment are considered, modern directions in powder technologies and applied materials are shown, as well as possibilities of increasing reliability and safety of used powder parts. The basic properties and advantages of parts from powder materials are estimated. The possibilities of using powder details in various units of rolling stock are shown, as more reliable, safe and economically profitable. Among them: metal-powder slide bearings based on iron-copper, the main advantage of which is the presence of residual porosity, which contributes to the formation of a stable oil film in the bearing; bushings of valves of diesel motors, gears of oil and water pumps possessing high wear resistance; friction discs and brake pads designed to work in brakes and friction clutches in conditions of dry and liquid friction.

© 2019 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Peer review under responsibility of the scientific committee of the ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE2018).

*Keywords:* Railway transport; Metal-powder materials

---

\* Corresponding author. Tel.: +37129146944.

E-mail address: [viktors.mironovs@rtu.lv](mailto:viktors.mironovs@rtu.lv)



## 1. Introduction

In order to achieve utmost efficiency and safety when transporting cargoes, one must constantly look for and implement innovations. It applies also to technical field, mainly — mechanisms of the rolling stock. Innovative directions include also application of recent technologies of powder metallurgy (PM) to manufacture key parts and assemblies.

PM includes certain set of production methods of metal powder and composites and also production of parts from these materials. This type of part production has several advantages, giving a competitive advantage in the market, often more expensive methods of metal processing (casting, smiting and compaction). Some advantages to mention are cost-effective production, diversity of geometric shapes, high accuracy of detail dimensions, almost no post-processing and consequently low percent of material leftovers [1, 2].

Specifics of railway transport (RT) calls for a need to ensure high reliability of assemblies and parts, work under conditions of high unit load and significant temperature fluctuations. Metal-powder parts intended for RT commonly have a larger mass and dimensions than those used in other industries. They can be put into several main groups: structural, antifrictional, frictional, electrotechnical.

Structural parts are commonly made of iron-based materials with added black-lead, brass, nickel and molybdenum with density of 6-7 g/cm<sup>3</sup> and hardness of 55...100 HRB (55...130 HBS). Attainable purity of the surface — Ra 2.5, and dimensional accuracy — 7-8 quality class. Gears of water and oil pumps, distance bushings are some of them (see Fig. 1 and Fig. 2) [3].

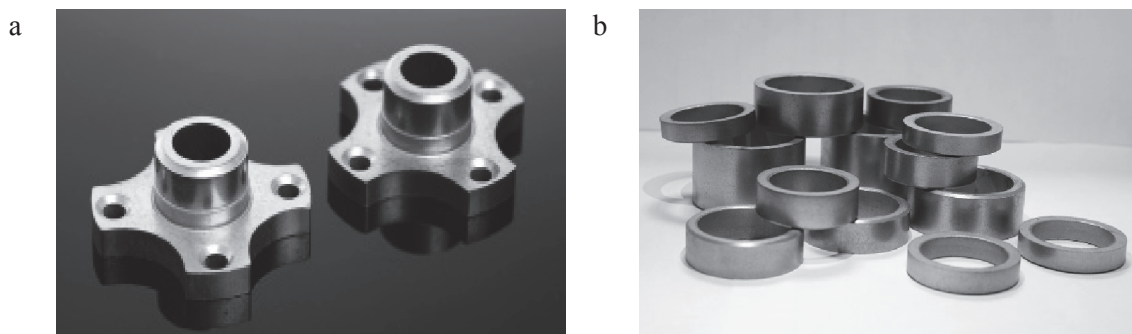


Fig. 1. Iron-based structural parts: (a) gears of water pump of an engine; (b) distance bushing of brakes.

Other group of structural parts is comprised of brass-based parts with added iron. Their density is considerably higher (7.9...8.7 g/cm<sup>3</sup>), and hardness exceeds 45 HBS. Attainable dimensional accuracy — 10 quality glass, and purity of the surface — Ra= 3.2.

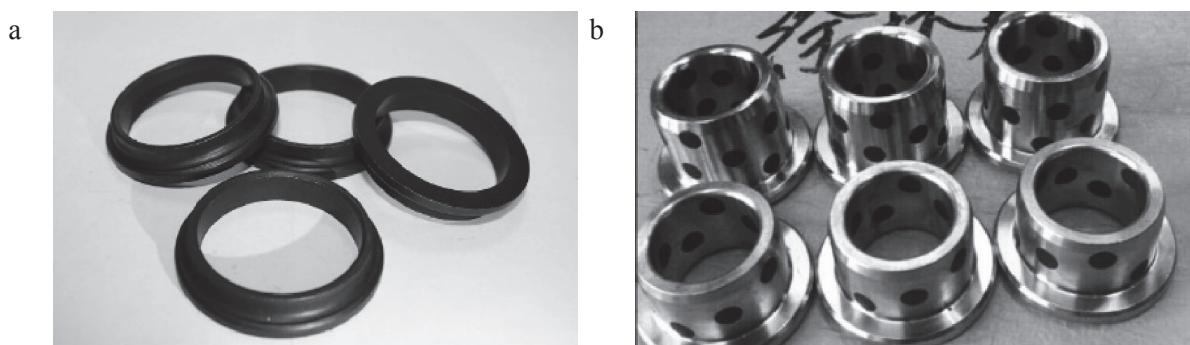


Fig. 2. Iron-based structural parts: (a) rings; (b) bushings.

Bushings of plain friction bearings are most common in RT from the range of antifrictional materials. Their application allows reducing oil consumption, replacing of expensive bronze and babbitt in the iron-copper powder material and increasing wear-resistance due to self-lubrication. Antifrictional properties are enhanced by adding black-lead and similar components, which has high self-lubrication properties [4]. A wider group is comprised of

frictional parts for locomotives and wagons (see Fig. 3). They are manufactured as discs, links and hobs from iron and copper-based materials intended for brake assemblies, friction clutches and other devices working under dry and liquid friction conditions. Such parts are manufactured by compaction in hydraulic presses with an increased work load of 20,000 kN. Agglomeration is performed in electric shaft-type furnaces in a hydrogen atmosphere where temperatures reach even  $+1050^{\circ}\text{C}$ . [5]. Powder friction materials (PFM) stand out with a high efficiency and reliability under heavy-duty loads and virtually under any weather conditions. Useful life of PFM is 3 times more than other friction materials, and level of wear of counterface is from 1/3 to 1/10 of other materials. Heat cracks and burns are reported much more seldom. Due to the high heat resistance PFM can be used in temperatures between  $800\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ .

Japanese railways widely use different brass and iron-based parts, partially for arrangement of electric overhead wiring: adjustable slides, side bearings etc. (see Fig. 3). For example, known material FINE SINTER [6].

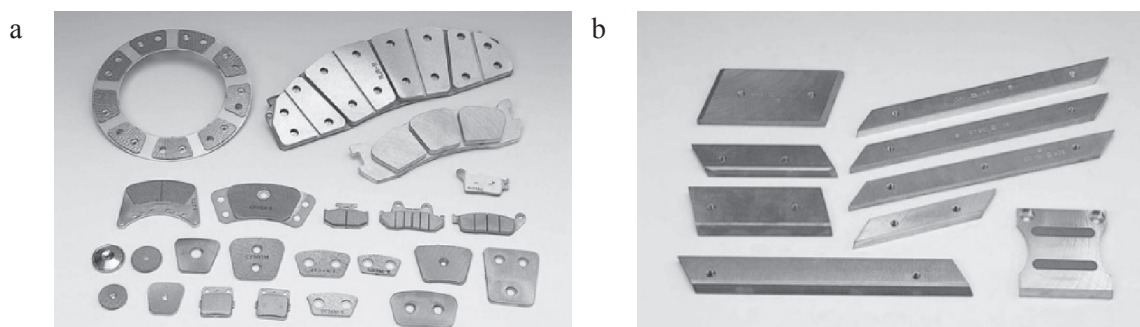


Fig. 3. Copper and iron-based details: (a) frictional; (b) electrocontact.

Manufacture of PFM based parts has recently seen an especially rapid development in China. Rapid development of Chinese economy and more intense competition in the transport market have increased requirements towards railway transport industry in China. General increase of speed in the main railway lines demands more stringent requirements regarding using of friction materials for high-speed trains, with a great emphasis of reliability and high thermal stability. It is produced by using a method of powder metallurgy where composite material is produced from metals and non-metals with high friction factor [7, 8].

Powders used for manufacture of parts must have certain properties that influence their producibility. It is related to high pour density (to ensure increased body mass and density), flow ability (to quickly fill the mould when pressing) and high plasticity (to ensure maximum densities). Therefore, it must be noted that due to proneness of spontaneous ignition of powders, this dangerous production factor requires more scrupulous compliance with the labour safety techniques. The major manufacturer of iron powders worldwide is Swiss company Höganas AB [9].

In Russia, after 2009, a stable railway powder production was manufactured at industrial scale only at the machine building centre “CCM-Tyazhmash”, PJSC “Severstal” [10]. For more than 25 years it has produced air dispersion metal powders on the basis of method RZ — process (see Fig 4a). The powder enhances durability of raw compacted materials in comparison to water sprayed materials and high compactibility in comparison to renewable powder.

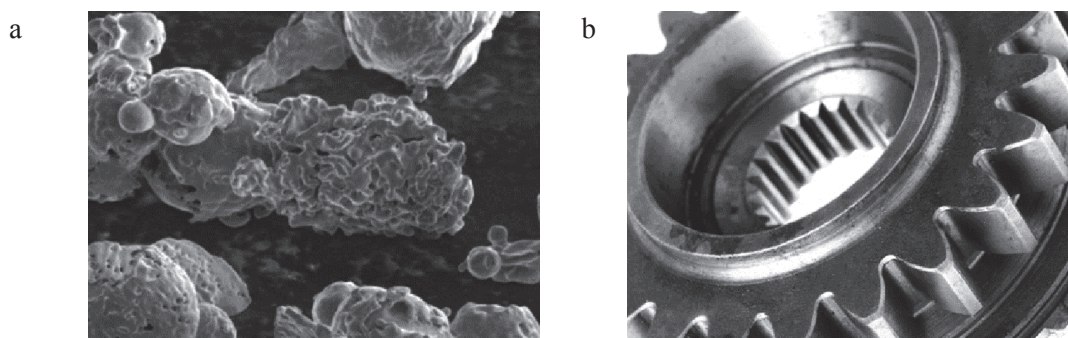


Fig. 4. Microphoto of dispersed powder: ПЖБП (rus) produced by (a) PA Serversal; (b) articles made from it.

It is made of blast furnace iron by means of dispersion, differs in chemical purity and high compactability (up to  $7.20 \text{ g/cm}^3$  at pressure 700 MPa), which ensures higher durability of raw press until 25 MPa if sample density is  $6.5 \text{ kg/cm}^3$ . In order to produce articles from powder for RT, hydraulic press with high capacity, rolling and slip casting are used. Articles obtained in a press have poor structural performance, therefore they need to be thermally processed and finished with agglomeration of powders [11]. When melted, metal particles form strong interatomic bonds, making the part homogeneous. Noteworthy, that often compaction and agglomeration are combined into a single operation — hot compaction:

- Increase in masses of parts (up to 5 kg and more)
- Increase in dimensions of parts (up to 200 mm and more)
- Increase in density (for high density parts) and porosity (for highly porous articles)
- Wider operational temperature range (from  $-40$  to  $+50^\circ\text{C}$ )
- More complicated geometry of parts
- Improved tribological characteristics
- Reduced prime cost of parts

## 2. Materials and methods

In the Laboratory of Powder Materials of Riga Technical University, considering aforesaid trends, a research is conducted to develop a technology of producing highly porous self-lubricating slide bushings [12]. General type of experimental samples is presented in Fig. 5.

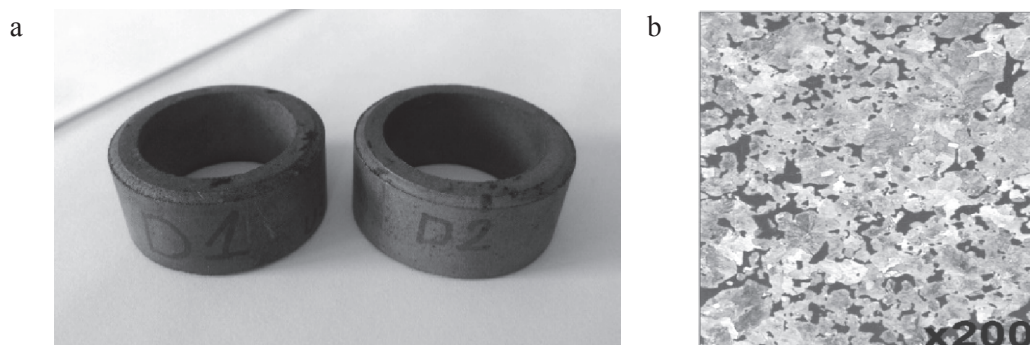


Fig. 5. (a) Experimental Fe-C-Cu based bushings; (b) Microstructure of a Fe-C-Cu sintered part.

Use of low-alloyed iron-copper-black lead-based powder material. The chemical content and properties are given in Table 1.

Table 1. Chemical content and properties of material of the AB.

| Chemical content (weight %) |      |      |      |      |      |      |           | Properties      |                                             |                                         |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|-----------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Fe                          | Ni   | Cu   | Mo   | S    | P    | C    | Kennolube | Flow<br>[s/50g] | Apparent<br>density<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Compressibility<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
| 96.5                        | 0.22 | 2.27 | 0.28 | 0.04 | 0.01 | 0.68 | 0.7       | 40              | 3.15                                        | 6.85                                    |

In order to produce long components with length and diameter ratio 1:5, a method of combining statistic-dynamic compaction was developed, combining presswaging with electromagnetic impulses applied to the powder in thinwalled metallic sheath followed by drawing [13, 14]. In order to remove tribological properties of slide bushings, a technology was developed where one introduces tungsten disulfide nanoparticles in the article. In the [15] study, the bushings were impregnated with transmission oil of Russian grade MS-20, as well as the same oil with additions of tungsten disulfide WS2 and diselenide WSe2 nanoparticles. Tribological testing of the product was

provided. Sintered bushings impregnated with commercial oil and with suspension of nanoparticles were tested in the spinning friction conditions in the couple with bearing steel at the load of 210 N and spinning rate of 200 rpm.

### 3. Results and discussion

As the experiments showed, the use of combined methods of static-dynamic compaction helps to increase density of a powder material. For products of small height the method of compaction of a powder in a rigid die with imposition of electromagnetic pulses is most convenient. With step-type compaction the quality of the obtained product depends on many factors: density of prior filling of the powder into the tube, magnitude of angle of the draw die, plasticity of the material and properties of the powder.

Sintered bushings impregnated with commercial oil and with suspension of nanoparticles were tested in the spinning friction conditions in the couple with bearing steel at the load of 210 N and spinning rate of 200 rpm. WSe<sub>2</sub> and MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>, the average frictional torque decreases by  $\approx 53\%$  and  $\approx 44\%$  respectively in comparison with the bushings impregnated with MS-20 lubricating oil. The most stable moment of friction was shown by bushings impregnated with lubricating composition MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>.

### 4. Conclusion

We can assume that in the near future, interest to the static and dynamic methods of compaction of powder materials, especially ceramic powder, will increase. Research authors demonstrated that, when applying PM technology, partially to produce slide bushings for the rolling stock, there are several methods allowing to increase reliability and durability of details and consequently, provide the necessary level of safety in using similar parts in key assemblies of machines in railway transport.

### References

- [1] Hrenov, O. et al. (2010) "Materials and technology of powder metallurgy". in Russian, Minsk. UDK 621.762, 37.
- [2] Zaripov, R., and P. Gavrilovs. (2017) "Research Opportunities to Improve Technical and Economic Performance of Freight Car through the Introduction of Lightweight Materials in their Construction". *Procedia Engineering* **187**: 22-29.
- [3] Upadhyaya, G. S. (1997) "Powder metallurgy Technology". *Cambridge Int Science Publishing*, 158.
- [4] Vasilyeva, E, O. Tolochko, B. Kim, D. Lee, and D. Kim. (2009) "Synthesis of Tungsten Disulphide Nanoparticles by the Chemical Vapor Condensation Method". *Microelectronics Journal* **40** (4-5): 687 – 691.
- [5] Hasegawa, I., and S. Uchida. (1999) "Braking Systems" Kanji Wako (ed). *Japan Railway Technology Today*. 52-59.
- [6] Fine Sinter company. Available: <http://www.fine-sinter.com/english/products/pmp/railway/>. [Accessed: September 1, 2018].
- [7] Shang, F. et al. (2011) "Application of Metal Powder Metallurgy Technology in Preparation of Friction Materials of the Railway Vehicles", *Advanced Materials Research*, **287-290**: 2987-2990.
- [8] Gavrilovs, P., A. Dmitrijevs. (2016) "Research in Passenger Car Bogie Central Suspension Roller and Rod Base Metal and Welded Metal Structure", . ISSN 1691-5976, in *Proceedings of 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development* **15**: 618 - 623.
- [9] Hoganas, AB. Available: <https://www.hoganas.com/en/Industries/>. [Accessed: September 11, 2018].
- [10] Severstal annual report 2017. Available: [https://www.severstal.com/files/21415/Severstal\\_Annual\\_report\\_ENG\\_2017.pdf](https://www.severstal.com/files/21415/Severstal_Annual_report_ENG_2017.pdf). [Accessed: September 16, 2018].
- [11] Chen, D, D. Li, and J. Peng et al. (2017) "The Effect of Rolling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Surface-Densified Powder Metallurgy Fe-Based Gears Prepared by the Surface Rolling Process". *Metals* **2017**, *7*, 420.
- [12] Mironovs, V., P. Stankevich, and Tatarinovs et al. (2015) "Mechanical and Acoustical Properties of Bushings Made of Low-Alloyed Materials and Used in Brake Systems of Transport Vehicles". *Materials Science and Engineering* **96**, (1), 1-9. ISSN 1757-8981.
- [13] Mironovs, V, P. Stankevich, I. Beljaeva, and V. Glushenkov. (2016) "Static-Dynamic Powder Material Compaction Methods", ISSN 1691-5976, in *Proceedings of 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*, Latvia, Jelgava, 25-27 May. University of Agriculture, 1128-1132.
- [14] Gavrilov, P, and V. Ivanov. (2018). Analysis of rail profile 610 E1 joints welded by means of mobile rail welding machine, in *Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, Jelgava, Latvia, 23-25 May. Code 137032. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N02
- [15] Stankevich, P., V. Mironovs, and E. Vasileva et al. (2017) "The possibility of modifying the elements of the bearing assembly with nanoparticles in order to reduce the friction coefficient". IMST 2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* **251**. 012084 doi:10.1088/1757-899X/251/1/012084/



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.

# Mechanical and Acoustical Properties of Bushings Made of Low-Alloyed Materials and Used in Brake Systems of Transport Vehicles

V Mironov<sup>1,3</sup>, P Stankevich<sup>1</sup>, A Tatarinov<sup>1</sup>, V Zemchenkov<sup>1</sup> and I Boiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Riga Technical University, Laboratory of Powder Materials, Kalku Str. 1, Riga, LV-1658, Latvia

<sup>2</sup>Riga Technical University, Faculty of Transport and Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Ezermalas Str. 6k, Riga, LV-1006, Latvia

E-mail: viktors.mironovs@gmail.com

**Abstract.** The increasing freight volumes and the speed of transport, as well as increasing demands with regard to safety have made the search and development of new anti-friction materials a topical task. The main requirements to the bearing assemblies include reliability, durability, simplicity and ease of maintenance. The paper considers the features of the manufacture of braking sliding sleeves/ bushings for transport vehicles made from sintered low-alloy powder materials based on Fe-C-Ni with Ni and Mo contents of 0.3%. The paper presents data on the microstructure of the sintered samples of the products and research of some physical and mechanical properties. Surface quality and friction coefficient were evaluated by surface profiling and tribological tests, correspondingly. Particular attention is paid to the use of ultrasonic testing for quality control of the products.

## 1. Introduction

Sliding sleeves and bushes made of sintered powder materials are widely used in the manufacturing of machinery, railway and various vehicles. Braking assemblies with the braking leverage transmission have specific operating conditions. It presents a system of levers that transmit forces arising from the pressure of the compressed air on the piston of the brake cylinder to the friction units of the brake system. The connection units of the brake system experience great dynamic and vibration loads. In addition, increased friction increases in the connection units during braking and brake release. In order to reduce friction, bearing bushes with heightened anti-friction properties are used. The use of metal powder

<sup>3</sup> To whom any correspondence should be addressed.



bushings(MPB) allows extension of the service life of bearing units several times at the same time reducing operational, maintenance and repair costs [1,2].

Given the importance of braking system assemblies, it is necessary to improve the quality assurance of the components. By means of non-destructive testing, in particular, ultrasonic testing (UT), it is possible to predict the mechanical properties of the braking elements, to assess the presence of pores and defects. It was shown in [3] that the main feature of sintered products distinguishing them from powder metals is the presence of free surface of the pores as a major factor in the development of phase transformations. The free pore surface manifests itself, on the one hand, as the stress relaxation space, and, on the other hand, as a place where various defects emerge. In this case, it is advisable to use UT methods.

One of the main advantages of MPB is the presence of pores on their surface that facilitates the formation of a stable oil film. As a result of the pre-dip of MPB in hot oil, the friction surface is provided by the lubricating film for a long time. MPB are effective substitutes of bearing products made of bronze and brass. The optimal physical and mechanical properties were established to be the following: porosity in the range of 15 – 20%, oil absorption – not less than 1.8%, the compression strength –180 MPa. To improve the strength properties, alloy powder materials containing nickel and manganese in the range from 1.5 to 2.5% are commonly used [4]. This provides an increase in strength and hardness. However, it should be emphasized that these additives significantly increase the cost of metal powder products [5].

The purpose of this paper was to examine the possibility of manufacturing of MPB for leverage brake system in transport using low-alloy powder compositions [6] with the contents of Ni and Mo up to 0.3% and to assess the impact of residual porosity on the mechanical and tribological properties of MPB. It has been tasked to evaluate the use of UT to control the degree of porosity and the presence of defects.

## **2. Experimental studies**

### *2.1. Mechanical properties and microstructure*

Powder mixtures containing the alloying elements Ni, Cu, and Mo were used to produce the samples (table 1). Mixtures AHC100.29 + Cu + Ni + C produced by Hoganas AB (mixture 1) and the same mixture with an increased Cu content (mixture 3) [7] were assumed as basic materials. MPB samples were made also from the low-alloy experimental mixture with Ni and Mo content less than 0.3% and reduced phosphorus content (mixture 2).

**Table 1.** Specification of materials for manufacturing of MPB samples.

| Mixture      | Components<br>[mass fraction by weight, %] |      |          |          |      |      |      |                | Powder properties    |                                         |                                        |
|--------------|--------------------------------------------|------|----------|----------|------|------|------|----------------|----------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
|              |                                            |      |          |          |      |      |      |                | Fluidity<br>[s/50 g] | Bulk<br>density<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Compactibility<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
|              | Fe,%                                       | Ni,% | Cu,<br>% | Mo,<br>% | S, % | P, % | C, % | Kenno-<br>lube |                      |                                         |                                        |
| Mixture<br>1 | 94                                         | 2.0  | 2.0      | 0.5      | 0.2  | 0.1  | 1.2  | 1.0            | 38                   | 3.18                                    | 7.05                                   |
| Mixture<br>2 | 96.5                                       | 0.22 | 2.27     | 0.28     | 0.04 | 0.01 | 0.68 | 0.7            | 40                   | 3.15                                    | 6.85                                   |
| Mixture<br>3 | 94                                         | 2.5  | 2.0      | 0.5      | 0.2  | 0.1  | 0.7  | 1.0            | 40                   | 3.05                                    | 6.90                                   |

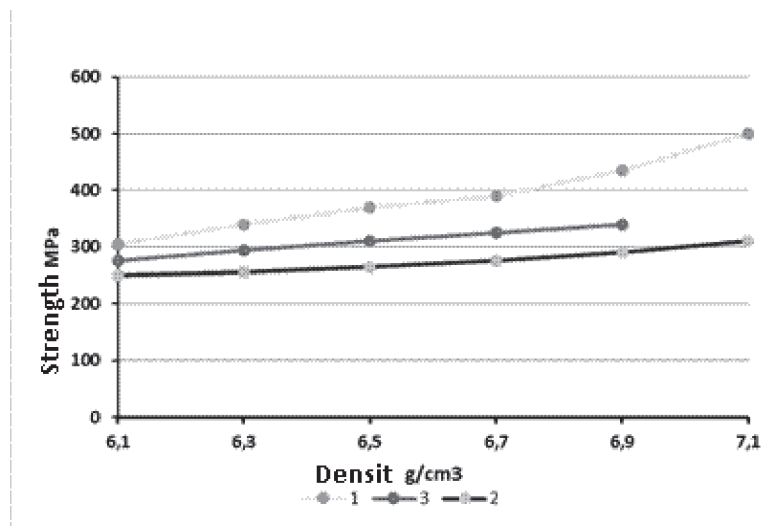
Pressing of MPB samples specified in table 2 was carried out in a rigid mold using a hydraulic press at a pressure of 600 MPa. Sintering was performed in a protective atmosphere during 40 minutes at a temperature of 1120<sup>0</sup>C.

**Table 2.** Main geometrical parameters and some physical and mechanical properties of MPB.

| Outer diameter<br>[mm] | Wall thickness<br>[mm] | Height<br>[mm] | Porosity<br>[%] | Hardness<br>[HB] |
|------------------------|------------------------|----------------|-----------------|------------------|
| 40                     | 4                      | 30             | 15              | 120              |
| 80                     | 6                      | 80             | 18              | 90               |

The results of the study of physical and mechanical properties of the MPB samples made of mixtures specified in table 1 are shown in figure 1. The compression strength of the samples was determined according to ISO2739: 2012 [8].

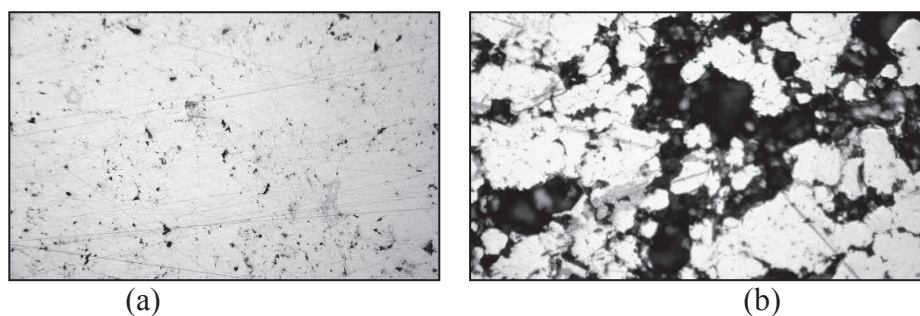




**Figure 1.** Compression strength of MPB samples vs. density.

The sintered material of low-alloy powder (mixture 2) has a strength somewhat lower than the control material (mixture 1). However, given the significantly lower content of costly components in mixture 2, it can be recommended for the MPB production.

The microstructure of a sample from mixture 2 reflects the uniformly distributed porosity (figure 2).

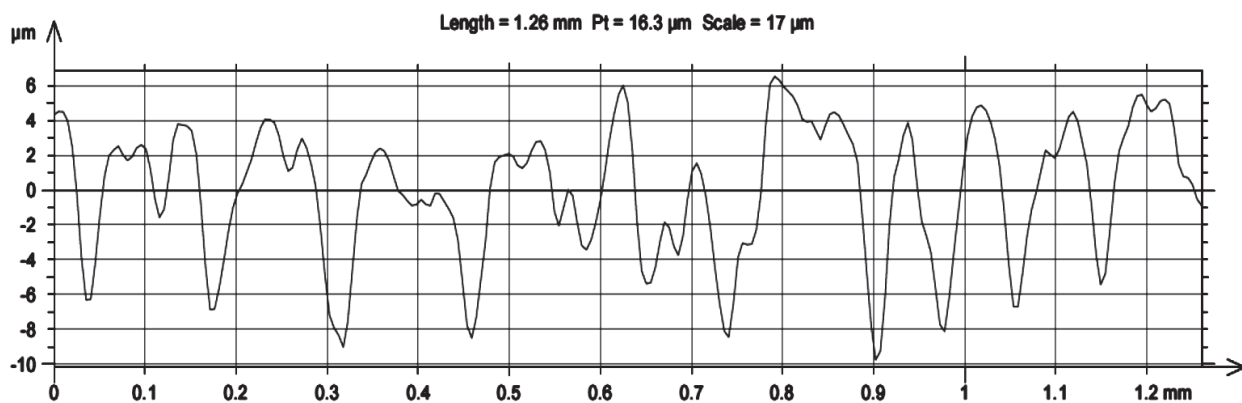


**Figure 2.** Microstructure of MPB of low-alloy powder (Mixture 2): A -x50; B – x500.

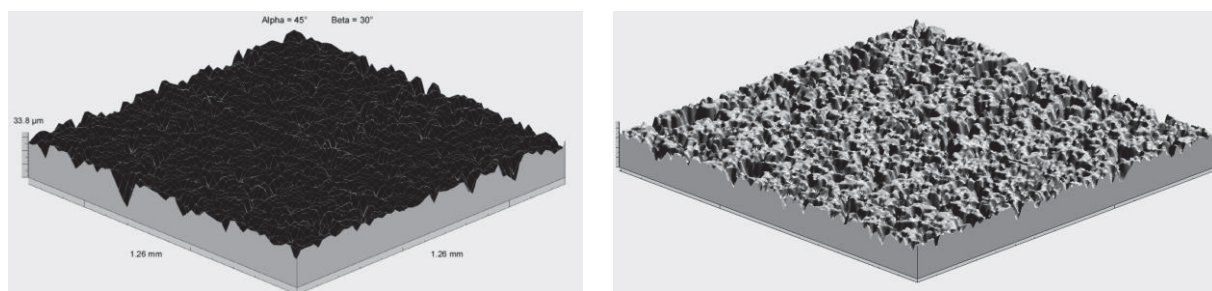
Studies have shown that when mixtures 1 and 3 are used for MPB production, the problems with obtaining homogeneous samples by their chemical composition and structure appear, since the mixtures are produced by mixing the starting powders. Mixture 2 is made by spraying a steel melt with the predetermined chemical composition followed by the addition of solid lubricant. Therefore, to obtain MPB for brake systems designed to operate in the conditions of impact loading and complex stress, it is advisable to use a low alloy powder composition, such as mixture 2. However, the final conclusion can be drawn based on the tribological properties.

## 2.2. Surface quality and tribological properties

Surface quality of the low-alloyed MPB was investigated by using “Taylor Hobson Ltd” 3D measurement system. 2D and 3D measurements with stylus instrument were achieved by basic “stepping” method (figure 3, figure 4). Main roughness and surface texture parameters according to ISO 4287 “Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters” and EN ISO 25178-2 “Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters” respectively are given in table 3.



**Figure 3.** Surface profilogram of a low-alloyed powder part.



**Figure 4.** View of 3D surface image and photo simulation of the low-alloyed powder part.

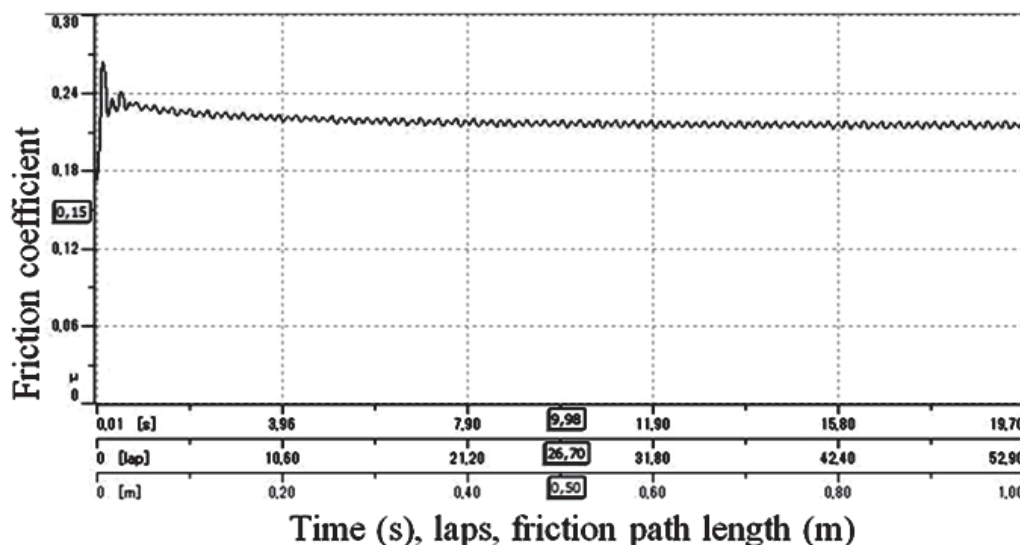
**Table 3.** Roughness and surface texture parameters of the low-alloyed powder parts.

|                                   |                                          |        |
|-----------------------------------|------------------------------------------|--------|
| 2D amplitude roughness parameters | Ra, [μm]                                 | 2.37   |
|                                   | Rz, [μm]                                 | 11.2   |
| 3D amplitude texture parameters   | Sa, [μm]                                 | 2.65   |
|                                   | Ssk                                      | -1.56  |
| 3D spatial parameter              | Str                                      | 0.766  |
| 3D functional parameter           | Vmc, [mm <sup>3</sup> /mm <sup>2</sup> ] | 0.0187 |
| 3D functional parameter           | Sfd                                      | 2.56   |

The results of the measurement confirm that powder part of the new low-alloyed powder material has a relatively high surface quality. It should be mentioned that the surface is sufficiently close to isotropic since the value of parameter Str (texture aspect ratio of the surface, measures the isotropy of the surface) is close to 1 (maximal value of Str). The highest value of functional parameter Vmc (core material volume of the scale-limited surface, indicates a measure of the material forming the surface between various heights) proves a good bearing ability of the surface due to great core material volume in contact during normal exploitation time (after wear-in). The negative value of amplitude parameter Ssk (skewness of the scale-limited surface, represents the degree of symmetry of the surface heights about the mean plane) confirms good lubricant retention ability.

Tribological study was done using tribometer of “CSM Instruments” (Switzerland). The friction coefficient was evaluated using “ball-on-disk” testing without lubrication, when the tested example was used as a disc, but a high-strength steel ball with the contact radius 3 mm was used as a counter-body. The main parameters of testing were: force – 3 N; measurement period– 20 s, linear velocity – 0.05 m/s.

The friction coefficient as a function of time, laps (number of rotation cycles) and length of friction path for compacted and sintered powder parts are shown in figure 5. The stable curve of friction coefficient with a relatively small fluctuation along the length of friction is observed. The visual examination after testing in order to reveal any traces of wear or plastic deformation of the surface revealed that the standard friction process occurred during testing. The average value of friction coefficient for low-alloyed MPB was  $\mu = 0.22$ .

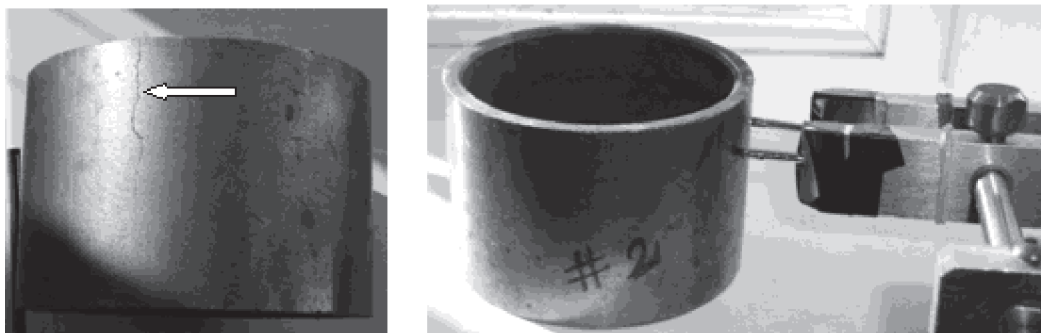


**Figure 5.** The friction coefficient as a function of time, laps and length of friction path for sintered powder part.

### 2.3. Ultrasonic testing of MPB

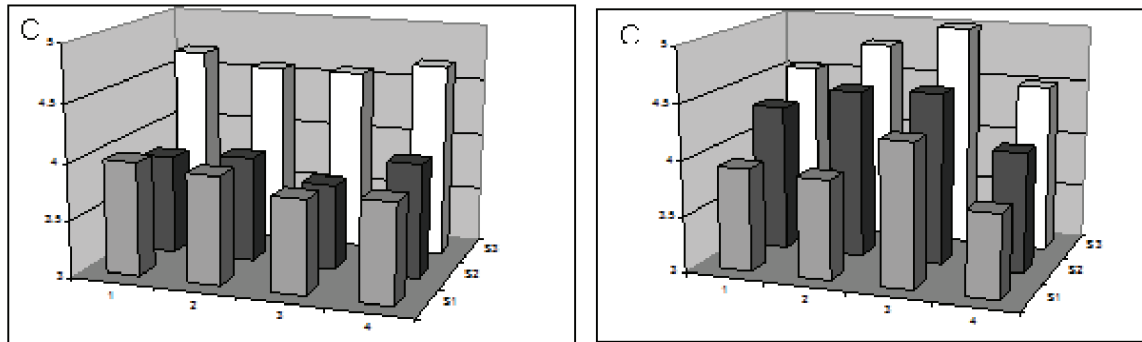
To assess the degree of homogeneity of MPB and the possibility of determining the possible cracks by means of ultrasound, the TOF (time-of-flight) method was used. Traditionally, the method demonstrates its efficacy in the detection of cracks in welds and metal products [8]. The method is based on sounding the zone between the transmitter and the receiver, and the analysis of signals generated by direct propagation of ultrasound, bottom reflections and diffraction reflections from the cracks if they appear. The purpose of our measurements was simultaneous estimation of heterogeneity of material properties of the PMB products and locations of cracks. For comparative examination, PMB samples with longitudinal cracks by height and PMB without visible defects were chosen.

Measurements were carried out in the surface transmission mode at a fixed acoustic base between the transmitter and the receiver of 20 mm (figure 6). The base was oriented perpendicular to the longitudinal axis of MPB to be perpendicular to the direction of the crack. To perform the measurements on the cylindrical surface, transducers with point contact were used requiring a small amount of liquid lubricant. Ultrasound excitation signals were sinusoidal pulses with duration of 2 periods at a carrier frequency of 1 MHz. The samples were measured in 4 sectors around the circumference and in 3 zones by height.

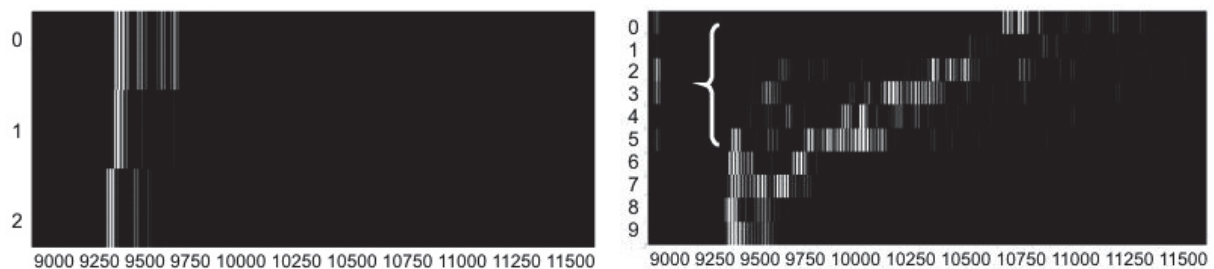


**Figure 6.** Illustration of ultrasonic measurements: on the left – a sample with a crack; on the right – the application of the sensors.

The results of ultrasonic measurements on the MPB surface showed that the samples were heterogeneous. The ultrasound velocity related to the longitudinal wave varied in different zones of the samples from 3.75 to 5.00 km/s, showing this heterogeneity related to the composition and porosity distribution and caused by the technological process. The distribution of ultrasound velocity of in the samples (figure 7) indicates a greater variability of properties by height than in the zones of perimeter. There was a sharp increase of ultrasound velocity in one of the end zones caused by the non-uniform powder compaction during manufacturing.



**Figure 7.** Distribution of ultrasound velocity  $C$  (km/s) in the perimeter (zones 1-4 by axis  $X$ ) and by height (zones S1-S3 by axis  $Y$ ) in two MPB samples.



**Figure 8.** Plots of ultrasonic signals by samples' height (see description in the text): in the left—the sample without defects, in the right—the sample with a longitudinal crack. Brace marks the height of the crack.

In the area of the crack, ultrasonic signals were recorded in 10 zones by the sample's height, in order to observe the changes of ultrasonic signals related to the development of cracks. Figure 8 shows the two-dimensional plotting of plurality of ultrasonic signals obtained by height, where the abscissa axis is time of ultrasound propagation, the axis of ordinates is the zone of the sample's height, and the brightness corresponds to the signal amplitude. The two-dimensional plot of the ultrasonic signals shows a clear detection of the cracks by the lack of the direct propagation signal and the relative gain of delayed echoes from the opposite end of the sample. Thus, a simple analysis of signal plots can indicate the appearance of cracks very illustratively.

### 3. Conclusions

1. The use low-alloyed iron-based powders can improve strength characteristics of products without increasing their cost.
2. The achieved 2D surface roughness parameters, 3D texture parameters and the friction coefficient (average value 0.22) confirmed the appropriateness of the new low-alloy metal powder material on the iron base for producing bushing for braking systems.
3. TOF method of ultrasonic testing is able to detect cracks in the PMB, and also is promising to control the spatial deviations of the material properties in the PMB products.

#### 4. References

- [1] Ermakov S S and Vyaznikov N F 1990 Powdered steels and products *Mashinostroyenie*
- [2] Dorofeev Y G, Geydarov Y G and Mamedov A T 1987 Peculiarities of obtaining of low-alloyed powder steel for constructional and anti-friction purpose *Poroshkovaya Metallurgiya* **9** 42 – 47
- [3] Bernstein M L, Felgina S B, Kostyrko L N, Napara-Volgina S G and Radomyselskiy I D 1976 Investigation of properties of low-alloyed sintered steels *Sintered Construction Materials* (Kiev) pp 93 – 98
- [4] Causton R J and Brian J W 1991 Performance characteristics of a new sinter-hardening low-alloy steel *Industrial Heating* **58** 38 – 41
- [5] MPIF Standard 35, Materials Standards for PM Structural Parts, 2007 Edition, MPIF
- [6] Brian W J, Lindsley B, Howard G.R and Narasimhan K S 2009 Lean Hybrid Low-Alloy PM Molybdenum Steels *Hoeganaes Corp. USA* [Available]: [www.gkn.com/hoeganaes/](http://www.gkn.com/hoeganaes/)
- [7] Hoganas Iron and Steel Powders for Sintered Components 2002 *Hoganas AB* p 394
- [8] Manjula K, Vijayarekha K, Venkatraman B and Karthik D 2012 Ultrasonic Time of Flight Diffraction Technique for Weld Defects: A Review *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology* **4** (24) 5525 – 33

#### Acknowledgements

This work has been partially supported by the European Social Fund within the project “Development of multifunctional nanocoatings for aviation and space techniques constructive parts protection” No.2013/0013/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/027. In this work, RTU students Armands Leitans and Janis Lungevics were involved.

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.



## Non-Destructive Testing of Joints of Antifriction Parts Crimped by Pulsed Magnetic Deformation

Alexey Tatarinov<sup>a</sup>, Victor Mironov<sup>b</sup>, Dmitry Rybak<sup>c\*</sup> and Pavel Stankevich<sup>d</sup>

Laboratory of Powder Materials, Riga Technical University, Latvia

<sup>a</sup>alta2003@apollo.lv, <sup>b</sup>vicror.mironov@gmail.com, <sup>c</sup>armorlcs@gmail.com, <sup>d</sup>mail020580@gmail.com

**Keywords:** powder metal joints; ultrasonic testing; radiography; electromagnetic crimping.

**Abstract.** Possibilities of non-destructive testing (NDT) methods to assess the quality of permanent joints of powder metal parts were evaluated. Antifriction bushing-bushing couples used in transport braking systems were investigated. The parts made of bronze graphite were crimped by pulsed magnetic deformation by means of electromagnetic equipment with a maximum discharge energy of 30 kJ. The gap between joint parts in the couples was assessed by ultrasonic and radiographic methods. A standard ultrasonic flaw detector Krautkramer USM-25 with an Olympus 4MHz dual-element echo transducer and an industrial x-ray apparatus YXLON EVO 200D were used, correspondingly. In first trial, both methods were equally sensitive to tight and weak connection of joints.

### Introduction

Antifriction parts made of powder metal for use in transport can be joints composed of two or more bushings. To obtain permanent joints of powder metal parts, different technological methods are widely used in mechanical engineering, including axle pressing, radial crimping, welding, soldering, and etc. [1]. The connection of the powder metal parts can be carried out both in the solid phase and liquid-phase sintering. For parts with a low density, the diffusion soldering method can be effectively used. Parts with a higher density and minimum porosity are usually treated as fully dense deformable materials and connected by means of arc, gas, electron beam and laser welding.

To connect tubular and ring parts with a small residual porosity on the basis of copper and iron-copper alloys, the most effective methods are radial crimping using isostatic, hydro-mechanical or pulsed magnetic deformation. The method of pulsed magnetic deformation (PMD) realized by a pulsed electromagnetic equipment is the most expedient for use with parts with a sufficiently high electrical conductivity, based on copper and aluminum [2].

Non-destructive testing (NDT) of bonds between metal-metal, metal-polymer and composite-composite parts is an established field of industrial research and practice [3,4]. Ultrasonic testing embraces a variety modality, including through-transmission, pulse-echo, phased array, linear and non-linear spectroscopy and other techniques, sensitive to diverse defects of connectivity and inclusions. The most developed, commercialized and standardized inspection techniques relate to welding, including ultrasonic testing, eddy current and radiography [5].

Joints obtained by PMD crimping are not such solid as welding since is not dealt with mutual penetration of surface layers of joint parts. Besides, specific structure of powder metal material of antifriction parts, particularly such compounds as bronze graphite, causes high attenuation of high frequency ultrasonic waves. It causes difficulties in application of standardized NDT approaches. The purpose of work was to test the sensitivity of ultrasonic and radiographic methods for discrimination of tight and weak PMD crimping using standard NDT techniques with its necessary adjustment.

### Materials and Methods

The testing objects were joints of antifriction bushings for transport. Bushing pairs joined by PMD are shown in Fig. 1. The antifriction bushings were produced of bronze graphite powder by a typical process of powder metal sintering, where copper was the basic material and tin and graphite



contents were approximately 9 and 3 %. The sizes of outer and inner bushings were: length 30 and 36 mm, outer diameter 32 and 28.5 mm, wall thickness 3.5 mm. The PMD crimping was realized by means of a spiral inductor with height 90 mm and diameter 80 mm connected to a pulsed current discharger. The pairs were placed in the axial zone of inductor as shown in Fig. 1. The magnitudes of the magnetic and electric components of the applied electromagnetic field in the inductor's axis reached 835 A/m and 17960 V/m. The reproducibility of the operating modes of the generator was not worse than 0.5 %. The samples were subjected to an electromagnetic field with a ratio and mutual orientation of the magnetic and electrical components characteristic to the "near zone" formed at distances much smaller than the wavelength of the electromagnetic field.

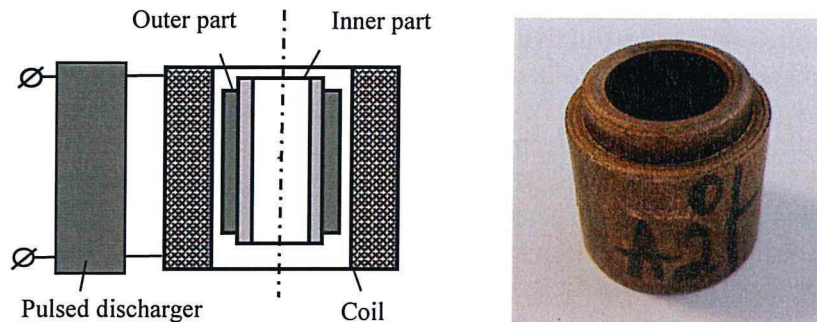


Fig. 1. Schematic principle of PMD crimping and bushing-bushing joint obtained by PMD

Ultrasonic testing was conducted in accordance to the standards of LVS EN ISO 16810: 2014 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Transmission technique (ISO 16823: 2012) and LVS EN ISO 16811: 2014 Non-destructive testing – Ultrasonic testing – Sensitivity and range setting (ISO 16811: 2012) [6]. Pulse-echo method was carried out using a standard ultrasonic flaw meter USM 25 of Krautkramer GE Inspection Technologies GmbH (Fig. 2 a). USM 25 is designed to detect defects, such as discontinuity and non-uniformity of materials, in semi-finished products, finished products and welded joints, to measure the depth and coordinates of their occurrence, thickness measurement. It allows measurements in a broad frequency range from 0.5 to 20 MHz in materials ranging by ultrasound velocity from 1 to 15 km/s with broad ranges of calibration by depth and attenuation in the material. The dual-element transducer Olympus 01JJ4L at a working frequency of 4 MHz was selected taking into account the specificity of the bronze graphite material, its porosity, and with that the large attenuation of the signal. The split sensor scheme allowed minimization of the blind zone and the noise reduction. Before trials, the system was calibrated for measuring wall thickness in a bronze graphite bushing using a separate sample bushing.

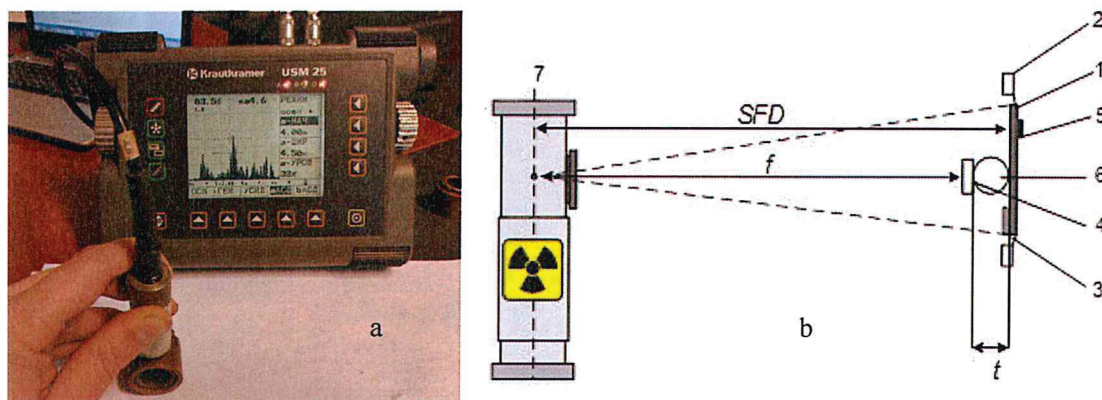


Fig. 2. Ultrasonic (a) and radiographic (b) testing of bushing-bushing joint: 1 – lead shield; 2 – film; 3 and 4 – marks of object and reference point; 5 – indicator of back radiation; 6 – object; 7 – x-ray source;  $f$  – distance between source and object; SFD – source-film distance;  $t$  – object thickness

For radiographic testing, a mobile industrial X-ray apparatus SMART EVO 200D of YXLON was chosen. The apparatus has a focal spot of 1.0 mm and a radiation power with a constant



potential of 750 W, providing high performance, short exposure time and high resolution. The principal diagram of testing is shown in Fig. 2 b. The testing procedure was done according to the standards LVS EN ISO 17636-1:2013 Non-destructive testing of welds: Radiographic testing [7]. The translucence regime was set experimentally using a sample of bushing-bushing joint. The adjustment was carried out by consequent irradiating sides of larger thicknesses moving subsequently to smaller ones. The initial regime was calculated for the monolithic structure of the bronze graphite material. Four control exposures were performed with a decrease in the time interval. Due to this, regularity was found between the coefficient of image darkening and the exposure time, which differed from 4 to 6 times depending on the irradiated thickness.

After nondestructive testing, the bushings were cut transverse to the axis in order to make microscopic observation of the boundary areas between inner and outer parts. Samples of a tighter and a less tight crimping resulting in differences of optically visible gaps between the inner and outer bushings varying from zero to several tens of micron are shown in Fig. 3. In the case of tight crimping, adhesion between parts occurs at the level of mutual microcrystalline penetration that provides the mechanical integrity.



Fig. 3. Samples of joints fragments with tight (a) and weak (b) PMD crimping: 1 – inner bushing; 2 – outer bushing; arrows show boundary between inner and outer parts

## Results and Discussion

**Ultrasonic Testing.** Bottom reflections in pulse-echo signals were compared. Sample echograms are shown in Fig. 4. In the case of proper adhesion between joint parts, ultrasonic wave had an opportunity to pass unhindered through the boundary between outer and inner parts and reflect from the inner wall surface. Thus, the echo response had a delay corresponding to double wall thickness in both directions. In the case of weak crimping, the air gap between outer and inner parts prevented through propagation and the echo response had a twice shorter delay due to the full reflection from the wall surface of the outer part. Meanwhile, due to high attenuation of ultrasound in powder metal bronze graphite, a certain disturbance of continuity and a longer propagation path, echo signals in the proper joint are much more attenuated comparing with the weak joint. The dissipation of ultrasound in the bronze graphite material caused also broadening and more irregular form of the reflection peaks that are typically observed in cast metal products.

Average measurement error in tested samples was 0.14 mm that is an indicator of the highly acceptable measurement accuracy. Thus, ultrasonic testing testified principal applicability to NDT of permanent joints obtained by PMD crimping meeting the ISO standards for ultrasound control. However, the method is limited to testing parts, where the surface curvature allowed positioning of flat transducers. The examined bushings were at the margin of this condition



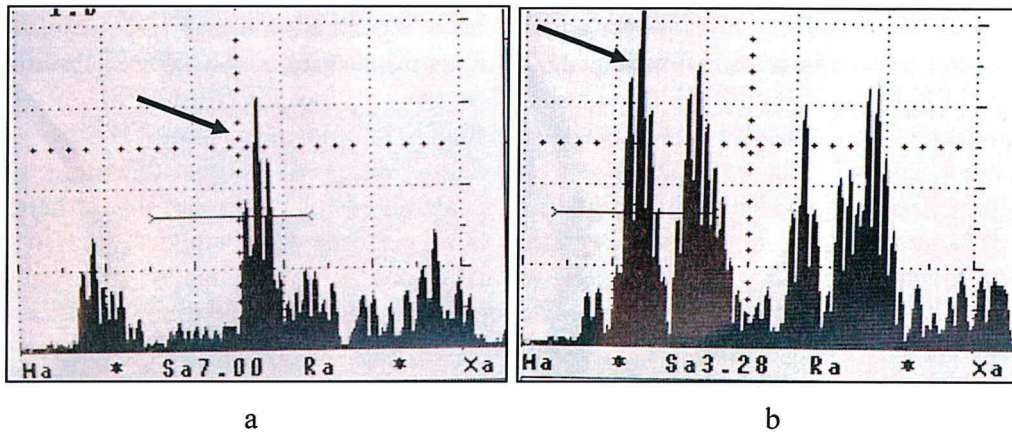


Fig.4. Samples of ultrasonic echograms for cases of tight (a) and weak (b) PMD crimping. Arrows show reflections corresponding to 7.00 and 3.28 mm thicknesses in these cases, i.e. from double and single walls

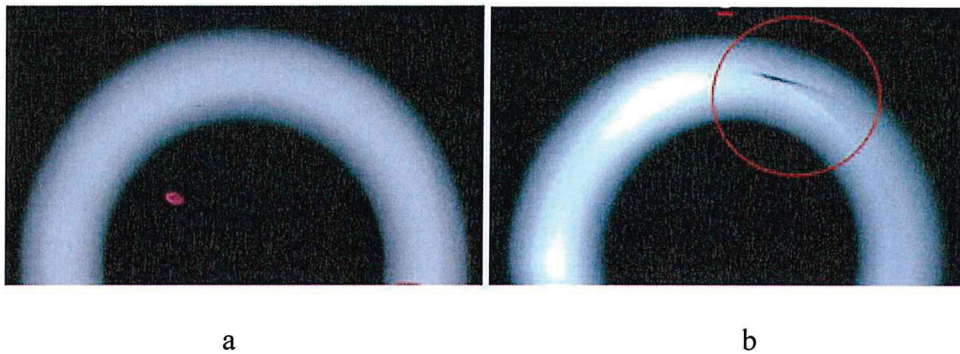


Fig. 5. Samples of X-ray films for cases of tight (a) and weak (b) PMD crimping for bushing-bushing joints. Circle shows the area of improper connection. Images were obtained from the end face of bushing

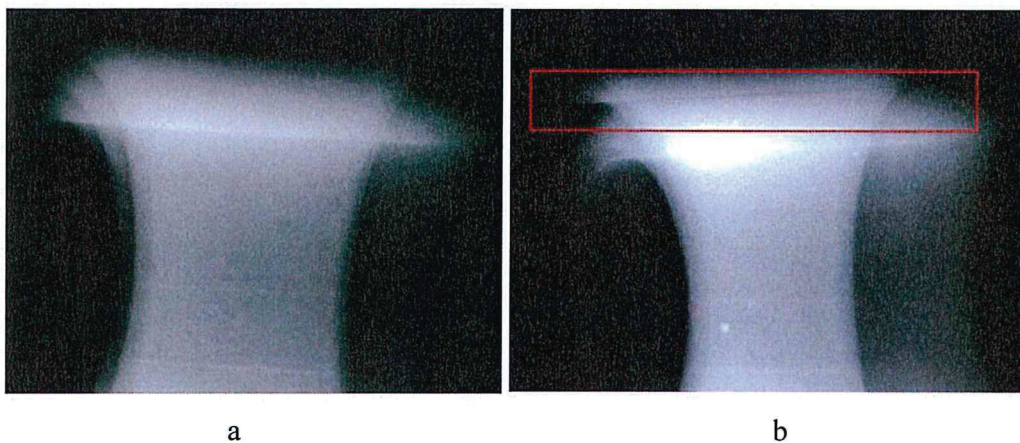


Fig. 6. The same as in Fig. 5, axial view. Images were obtained at an angle approximately  $30^\circ$  to bushing axis. Rectangle shows gap of improper crimping

**Radiographic Testing.** Testing results were analyzed by visual observation of X-ray films after standard chemical processing. To make results comparable, an approximate dependence between the amount of gamma radiation for the same metal in a monolithic structure and in a powder one was found. The optical density of films varied in the range from 2.3 to 3.5.

The films allowed revealing of connection defects in parts of both types. Both circumferential and axial views of the gaps between outer and inner parts were obtained. Figures 5 and 6 comparatively demonstrate tight and weak connections in bushing-bushing joints from the end face



and side. To obtain side views with better highlighting of gaps between bushes, the pictures were taken at the angle approximately  $30^{\circ}$ .

**Comparison of Methods.** In the first trials, both NDT methods showed equal sensitivity in discriminating tight and weak crimping of powder metal parts produced by PMD. The difference between ultrasonic and radiographic methods stemmed from their physical principles, where ultrasound revealed a mechanical discontinuity preventing propagation of the elastic wave and X-rays sensed the presence of a void in the material between the parts. Regarding the prospective industrial application, ultrasound has advantages of more simple and low cost hardware, fast operation and quick data interpretation. The advantages of radiographic method are noncontact testing and imaging. Complications related to films processing can be overcome by use of digital radiography. Further studies are necessary to estimate resolution limits of the both methods and explore possibilities of quantitative evaluation of the mechanical integrity of joints.

### Summary

The first attempt to assess non-destructively connection quality of antifriction powder metal bushings joined by pulsed magnetic deformation (PMD) showed sensitivity of both ultrasonic and radiographic methods in discriminating the conditions of tight and weak crimping. Complications of application the standard ultrasonic testing to bushing-bushing joints were caused by a higher attenuation of ultrasound in bronze graphite powder compound comparing to cast metal. Crimping by means of PMD produced a tight connection conducting ultrasound without disturbance and generating no echo response at 4 MHz. Areas of weak connection were revealed as early ultrasonic echoes coming from the wall of outer part and visible gaps in X-ray films. Both methods have a perspective for the industrial implementation in quality assurance of PMD crimping of powder metal parts.

### References

- [1] C. Selcuk, S. Bond, P. Woollin, Joining processes for powder metallurgy parts: a review, *Powder Metallurgy*, 53(1) (2010) 7-11.
- [2] V. Mironovs, I. Boiko, M. Kolbe, Application of Pulse Electromagnetic Field for Joining of Powder Details, 9th International Conference "Mechatronic Systems and Materials (MSM-2013), Vilnius, 1-3.07.2013, Vilnius Gediminas Technical University. (2013) 170-172.
- [3] D. Roach, K. Rackow, R. Duvall, C. Nelson, D. Moore, Nondestructive Inspection of Adhesive Metal-to-Metal Bonds, U.S. Automotive Materials Partnership Report DE-FC26- 02OR22910 on Project NDE601 to Department of Energy, Washington, D.C., December 2009.
- [4] R.D. Adams, P. Cawley, A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints, *NDT International*. 21(4) (1988) 208-222.
- [5] B. Raj, C.V. Subramanian, T. Jayakumar, *Non-Destructive Testing of Welds* (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies), Alpha Science International Ltd., Oxford, 2000.
- [6] ISO 16811:2014. Non-destructive testing. Ultrasonic testing. Sensitivity and range setting, 2014.
- [7] ISO 17636-1:2013. Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 1: X- and gamma-ray techniques with film, 2013.

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.

## STATIC-DYNAMIC POWDER MATERIAL COMPACTION METHODS

Victor Mironov<sup>1</sup>, Pavel Stankevich<sup>1</sup>, Irina Beljaeva<sup>2</sup>, Vladimir Glushenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Riga Technical University, Latvia; <sup>2</sup>Samara State Aerospace University, NIL-41, Russia  
viktors.mironovs@gmail.com, mail020580@gmail.com, belyaeva-ommr@yandex.ru, vgl@ssau.ru

**Abstract.** The paper discusses the basic methods of combined static-dynamic compaction of powder materials. According to the authors, one of the important directions is a method that combines axial compaction of powder, carried out with the help of a hydraulic press, and pulse-magnetic compaction (MPC). Experimental studies were carried out on metal powder materials based on Fe-C-Cu. Particular attention is paid to the production of long length products using step-type compaction; the effect of specific pressing energy on a compressibility of materials is shown. It has allowed giving advice on the choice of compaction modes and on designing of inductor devices.

**Keywords:** static-dynamic compaction, powder materials, electromagnetic pulse.

### 1. Introduction

Methods of compaction of ceramic powders in hydraulic and high-performance mechanical presses, vibratory compacting, rolling and other methods are widely known. Dynamic methods of powder material compaction using hydraulic and electromagnetic pulses are not less known. The development of new ceramic and composite materials as well as products from them is closely linked to improvement of compaction methods, which allow obtaining a higher density of materials, increasing the size of products, diversifying their possible form. In recent years, there has been increased interest in hybrid and combined technologies of compaction, which combine static and dynamic loads. In hybrid technologies a material is acted on by two or more sources of loading simultaneously throughout the production cycle. For the combined technologies, it is characteristic that while one source acts the second source operates once at a given (usually at the start or end) moment of the production cycle (Fig. 1).

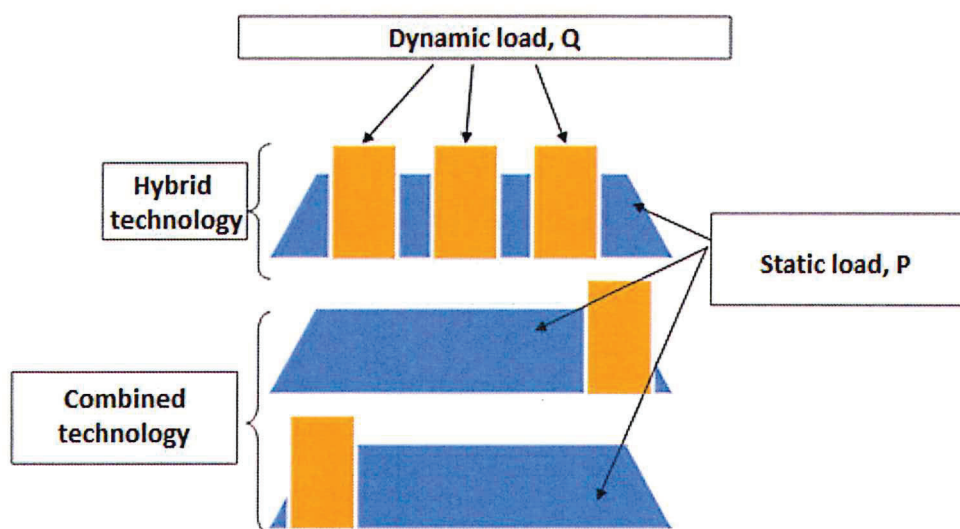


Fig. 1. Cyclograms of hybrid and combined technologies

To combined technologies may be assigned the combination of vibration shaking down and pulse compaction [1], radial dynamic compaction of long-length products with their step-type moving [2], static compaction on a hydraulic press and pulse compaction [3].

The combined technologies are of considerable interest for treatment of suspensions and solutions in a pulsed electromagnetic field [4].

Factors of pulse-magnetic action (induced pulsed currents, stress waves, acceleration of the material) change the structure, mechanical and technological properties of materials. This technology is particularly interesting for processing of suspensions containing metal ferromagnetic particles [5].



Pulse-magnetic processing can be used in preparation of suspensions or directly in implementation of processes of slip casting in devices where inductors are mounted in the mold.

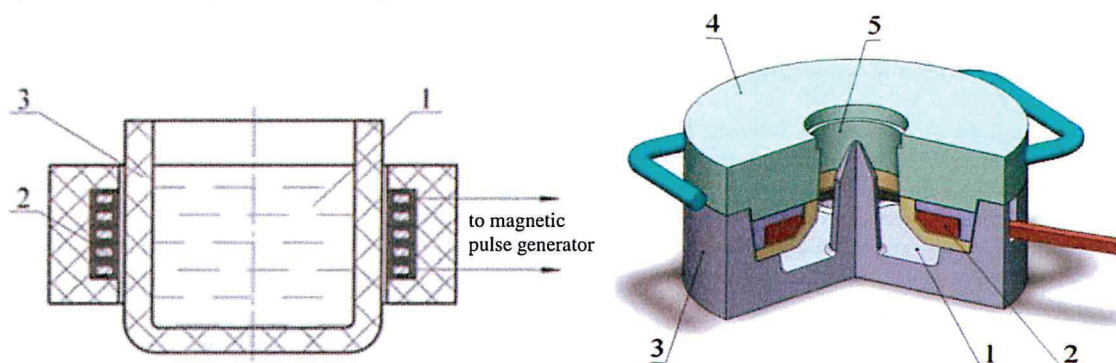


Fig. 2. Technological scheme of pulse-magnetic processing of solutions and suspensions:  
1 – material; 2 – inductor; 3 – heating device; 4 – mold; 5 – location of the cover

This paper considers the methods of pulse-magnetic compaction (PMC) of powder materials in which a pulsed electromagnetic field (PEMF) is used to move a punch or shell. Advantages of these methods are: a micro or millisecond range of application of additional dynamic load, the possibility of obtaining long-length products, the ability to integrate a pulse-magnetic installation into a processing line. The implementation of such technology is made possible by the use of resistant inductors, connected with the pulse-magnetic installation, and devices for continuous feeding of the powder material. Features of the design and application of effective re-usable inductors are considered in the work [6]. This experience was used also in experimental research.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Combined compaction of a powder material in a rigid die.

The studies were carried out on powders Hogan AB [8]. The data for the materials are given in Table 1. When mixing, 0.6 % lubricant Cennlube was added.

Table 1

Powder materials based on Fe-C and Fe-C-Cu

| No. | Iron powder brand | Production method                             | Additional components |
|-----|-------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| 1   | NC 100.24         | reduced                                       | 4 % Cu + 0.6 % C      |
| 2   | ASC 100.29        | atomized                                      | 1.5 % Cu + 0.15 % C   |
| 3   | SC 100.26         | reduced                                       | 2.0 % Cu + 0.15 % C   |
| 4   | Distaloy AB       | pre-alloyed Cu (1.5 %), Ni (1.75%), Mo (0.5%) | 0.15 % C              |
| 5   | MH 80.23          | reduced                                       | 2.0 % Cu + 0.5 % C    |

For compaction a hydraulic press with a maximal force 100 kN was used. A steel mold 10 mm in diameter was placed on the frame of the press. Depth of the filling chamber was 20 mm. The lower punch, provided with a conductive plate, is mounted on the plane inductor connected to a generator of pulse currents MT-1 with maximal energy of 2.5 kJ (Fig. 3, 4).

Previously the powder is acted on by the static pressure of the hydraulic press with the force of 50 kN with subsequent single or multiple pulse action through the use of the inductor connected to the generator of pulse currents. A plane inductor 5 from copper wire 6 mm<sup>2</sup> in section, with a number of turns 12 was used. Mass of the punch was 98 g, mass of the copper plate – 25 g.

The density of pressing  $\delta$  was estimated by measuring the degree of settlement of the punch into the die. The results of the experiments are shown in Fig. 6-7. The experiments were performed on powder compositions 1-4 (Table 1) under the same parameters of compaction.

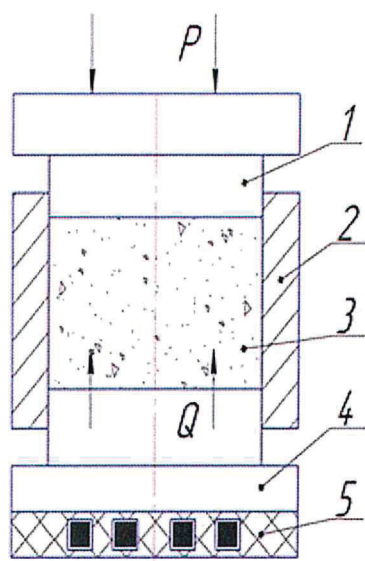


Fig. 3. Scheme of the hybrid technology of PMC of powders in a rigid die: 1 – upper punch; 2 – container; 3 – powder; 4 – lower punch; 5 – inductor

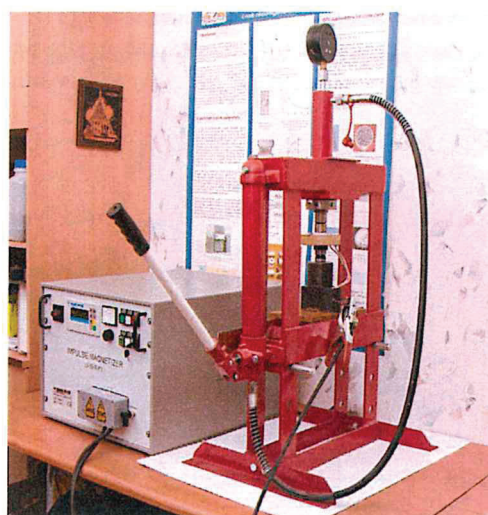


Fig. 4. Experimental device for PMC of powders

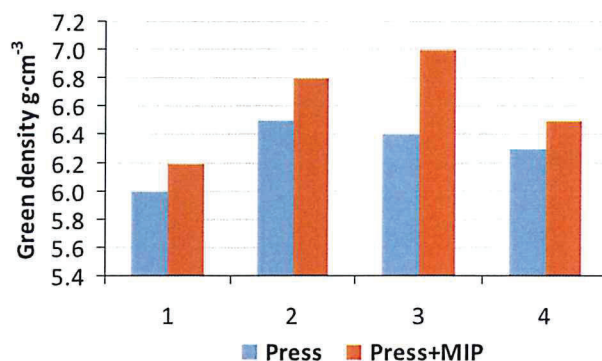


Fig. 5. Change in the density of different powder compositions under static and static-dynamic compaction

The results show (Fig. 5) that imposition of a shock pulse adds the density of pressing for all powder compositions in the range of 4.5 to 9.5 %. In this case the biggest increase of pressing density is observed at higher levels of energy of discharging of the generator (Fig. 6). The studies were conducted on the powder composition 2 based on the powder ASC 100.29.

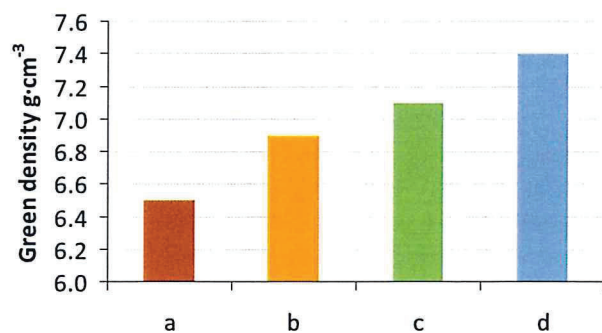


Fig. 6. Change in the pressing density depending on the specific energy of discharge 0.8; 0.9; 1.0 and 1.2 kJ·cm⁻³



The influence of the number of discharge pulses is especially noticeable when the number of them is small. As the number of pulses increases over 10 this effect becomes less noticeable (Fig. 7). Studies were performed on the powder compositions 2 and 4 based on the powder ASC 100.29.

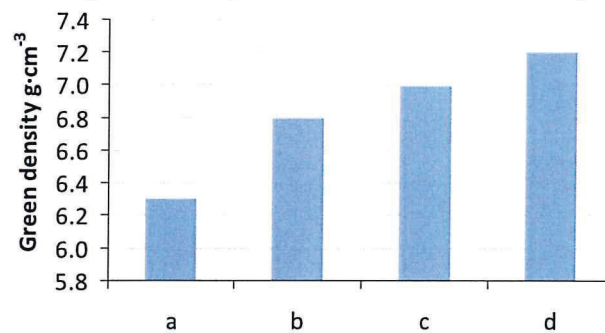


Fig. 7. Change in the pressing density depending on a number of pulses: a – 0; b – 5; c – 10; d – 15 at the specific energy of discharge  $0.9 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$

## 2.2. Combined technology of step-type static-dynamic compaction of powders

This technology appears to be promising for production of long-length products. The scheme of the process is shown in Fig. 8, the experimental device – in Fig. 9. Compaction was conducted in a tubular shell from copper. Previously the tube 1 was compressed on the mandrel 4 with the help of the inductor 1. Further, by means of the actuator 5 the tube with the powder moved through the draw die 3 (Fig. 8).

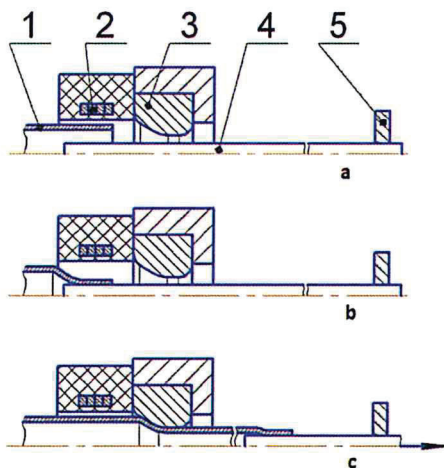


Fig. 8. Scheme of compaction (a – starting state; b – stage of press-forging; c – stage of drawing): 1 – billet; 2 – inductor; 3 – drawing die; 4 – mandrel; 5 – puller

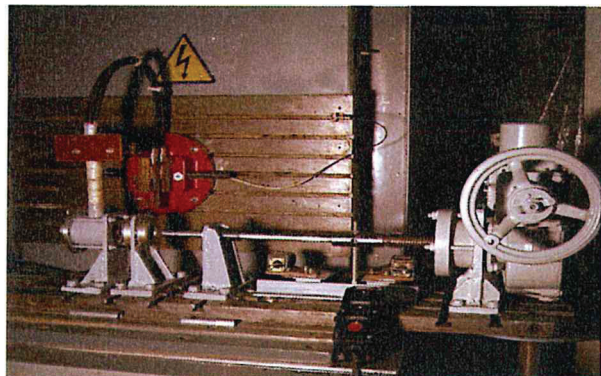


Fig. 9. Device with the inductor on the table

## 3. Results and discussion

As the experiments showed, the use of combined methods of static-dynamic compaction helps to increase the density of a powder material. For products of small height the method of compaction of powder in a rigid die with imposition of electromagnetic pulses is most convenient. With step-type compaction the quality of the obtained product depends on many factors: density of prior filling of the powder into the tube, magnitude of the angle of the draw die, plasticity of the material and the properties of the powder. With the simultaneous turning on of the drawing mill, both operations (pulse-magnetic press-forging of an end of the tube and pulling the tube through the draw die) are performed at a single site and by a single operator. Productivity increases, total energy consumption decreases.

#### 4. Conclusions

We can assume that in the near future, interest to the static and dynamic methods of compaction of powder materials, especially ceramic powder, will increase. This can be explained by the development of a new generation of pulse current generators in recent years: with a higher specific capacity, small-sized and with the increased frequency of bit pulse repetition. However, for successful development of the technology, it is necessary to create sustainable development of inductor systems and improve the safety of the equipment.

#### References

1. Mironov V. Forming of powder materials by pulse electromagnetic field, Riga, Zinatne, 1980, 190 p. (In Russian).
2. Lapkovsky V. et al. Processing of powder materials by Pulse Elektromagnetic Field, in: Proceeding of PM2010 World Congress (2010), Florence, Italy. pp. 519-524.
3. Mironovs V. et al. Combined Magnetic Pulsed Compaction of Ceramic Powder Materials. Eng. Materials and Tribology, 2015, Tallin, Estonia pp. 88-93.
4. Gluchonkov V., Karpuhin V. Tehnology of magnetic-pulsed Processing. Samara (2014), 208 pp. In Russian.
5. Patent LV 14383. Aut: Mironovs V., Lapkovskis V., Šiskins A., Baroniņš J. Method and device for mixing of powder materials (2011), RTU, Riga, Latvia.
6. Xiaohui Cu;, Jianhua Mo; Jianjun Li. Research on homogeneous deformation of electromagnetic incremental tube bulging. In 6<sup>th</sup> Intern.Conf.on High Speed Forming-2014, pp. 293-301.
7. Yurlova M.S., et al.. Electric pulse consolidation: an alternative to spark plasma sintering //Journal of Materials Science, 2013, pp. 1-34.
8. Hōganās Eisen und Stahlpulver für Sinterformteile. Hōganās AB (2004), (In Sweden)

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.



## **Influence of Machining Parameters on 3D Surface Roughness of Powder Bushings**

**Viktors Mironovs, Pavels Stankevics, Artis Kromanis and Janis Lungevics**

Riga Technical University, Kalku 1, LV-1006, Latvia

viktors.mironovs@rtu.lv, pavels.stankevics@rtu.lv, artis.kromanis@rtu.lv, janis.lungevics@rtu.lv

**Keywords:** powder bushings, surface roughness, machining, turning.

**Abstract.** The paper presents the results on research of machining anti-friction bushings of lever brake systems of rail transport, wherein the bushings are made of powder material based on iron and copper. Powder composition contains Fe-C-Cu with Ni and Mo content of less than 0.3%, and with reduced phosphorus content. The porosity of the bushings were in the range of 15 – 20 %. The main objective of the work was to determine the optimal machining parameters, as well as to evaluate the quality of the machined surface. The bushing were machined with cutting speed in the range of 130 – 150 m/min. To assess the quality of the machined surfaces the 3D roughness parameters were used, which allow to asses the surface roughness in more accurate details. The microstructure of the samples indicated the presence of pores onto the machined surfaces. It was found that to improve the quality of the surface it is necessary to adjust the parameters of the powder processing of parts with high porosity in the direction of their reduction. Studies of the microstructure and morphology of chips showed that the shape and structure of the chip is highly dependent on the porosity of the material and its processing conditions.

### **Introduction**

Among many products of powder metallurgy (PM) an anti-friction bushings (AB) such as slide bearings are well known [1]. Powder metallurgy is considered to be one of the most effective production methods because of the following features: almost no waste; performance; relative accuracy as well as possibility to achieve wide range of properties for the material.

Not so long ago it was considered that the parts made by powder metallurgy process are not subject to further processing, especially to mechanical machining. Nowadays, the industry requests more precise parts to be produced.

The studies of mechanical machining of powder metallurgy parts already started in sixties. The main conclusion from the studies was that powder metallurgy parts have low machinability referring to a cutting speed and resistance of a cutting tool. Parts with similar material, but not made by powder metallurgy, showed better results [2]. Another influential factor of machinability is porosity of material to be machined. Due to the residual porosity cutting process occurs intermittently, which accelerates wear of the cutting tool [3]. It is considered that better machinability can be achieved by using PM materials made of small content of oxide powders and non-metallic inclusions that have an increased abrasive effect on the cutting tool.

In research of Danilov [4] it was concluded that tool wear at processing RV-20 powder material is 2-3 times greater than that for the same material not made as PM product.

Aim of the research is to study a machining of AB, which is PM product, and its machining parameters influence of the surface roughness, especially of the 3D surface roughness. The main aim of the experiment is to analyse an influence of cutting regimes on a surface roughness of machined AB. Similar experiments on analysing influence of cutting regimes on the surface roughness are describer in other research paper [5]. Another aim of the experiment was to analyse the cutting process of PM components as such (for example, formation of chips).



## Materials and Methods of Experiments

**Material.** The part to be machined was anti-friction bushing (AB) from brake system of a railway wagon. The AB is made of PM material Fe-Cu-Cu [6]. The following AB is designed to withstand short dynamic overloads and able to withstand the sliding speed up to 3 m/s. Recommended temperature of exploitation in a regime of self lubrication is in range of -25 to +40 °C. The AB is made from mixture of powder materials containing Ni and Mo less than 0.3 % and with low content of phosphorous. The powder itself was made by Hoganas AB. The chemical content and properties are given in the table 1.

Table 1. Chemical content and properties of material of the AB.

| Chemical content (weight %) |      |      |      |      |      |      |           | Properties      |                                             |                                         |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|-----------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                             |      |      |      |      |      |      |           | Flow<br>[s/50g] | Apparent<br>density<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Compressibility<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
| Fe                          | Ni   | Cu   | Mo   | S    | P    | C    | Kennolube |                 |                                             |                                         |
| 96.5                        | 0.22 | 2.27 | 0.28 | 0.04 | 0.01 | 0.68 | 0.7       | 40              | 3.15                                        | 6.85                                    |

Compacting of AB was performed on hydraulic press using a pressure of 600 MPa. Sintering of AB was performed in protective atmosphere at the temperature of 1120 °C for 40 min. The properties of obtained AB are as follows: porosity in the range of 15 to 20%; oil impregnation not less than 1.8%; tensile strength in the range of 350 to 550 MPa; Brinell hardness in the range of 70 to 120.

**Cutting tool.** A cutting tool insert for finishing operation was chosen for machining operation. Finishing operation provides most satisfactory surface roughness for a workpiece to be machined. The chosen cutting tool insert is designed for cutting the workpieces of ISO P (steel) and ISO M (stainless steel) material groups. The cutting insert has the following ISO code: VBMT 11 03 04-PF (see Fig. 1). The AB can be considered as M group material and therefore the chosen cutting tool insert is suitable for machining operations.

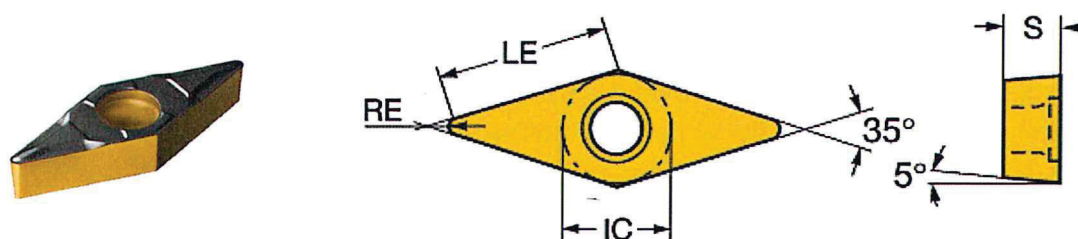


Fig. 1. Cutting insert, where RE is radius of the tip of 0.3969 [mm], LE is a cutting edge length of 11.0709 [mm], IC is an inscribed circle diameter of 6.35 [mm] and S is an insert thickness of 3.175 [mm]. Courtesy of Sandvik Coromant®.

**Surface roughness parameters.** The first studies in prediction of surface roughness were carried purely based on geometric correlations – geometry of cutting insert and its displacement along the workpiece. Based on geometric correlations a maximum surface profile roughness  $Ra_{max}$  can be determined using the following equation:



$$Ra_{\max} = f^2/8RE \quad (1)$$

where  $f$  is feed in mm/rev. and  $RE$  is a radius of the tip. The following equation can be used only when depth of cut is less than the radius of the tip  $RE$ .

If the radius of the tip  $RE$  is ignored and cutting edge angles are taken into account, then the maximum surface profile roughness  $Ra_{\max}$  is expressed using the following equation [7]:

$$Ra_{\max} = f/4(\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi_1) \quad (2)$$

where  $\varphi$  is a major cutting edge angle and  $\varphi_1$  is minor cutting edge angle. This equation can be used when the depth of cut is larger than the radius of the cutting insert tip  $RE$ , and larger feeds are used. It was decided to use 3D surface roughness parameters as primary parameters and 2D or profile roughness parameters as secondary parameters. The 3D surface roughness parameters are defined in the standard ISO 25178. The standard defines many parameters but most extensively used parameter is an arithmetical mean height of the surface  $Sa$  ( $\mu\text{m}$ ) defined by the following equation:

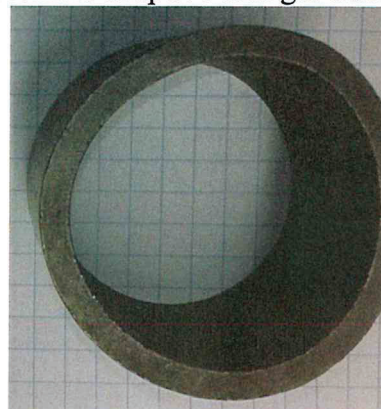
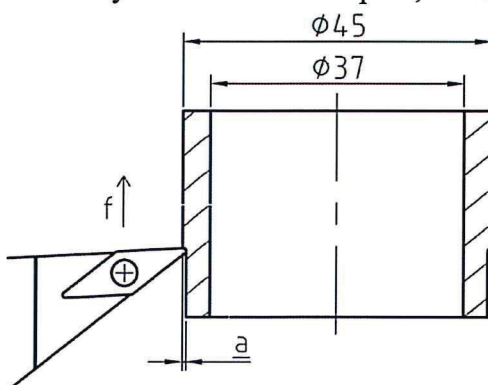
$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A Z(x,y) dx dy, \quad (3)$$

where  $A$  is a cross-sectional area of the measurement,  $Z(x,y)$  is the function representing the height of the surface relative to the best fitting plane or cylinder.

It was also decided to use another 3D surface roughness parameter  $Sq$ , which defines root mean square surface roughness. Additionally, the  $Ra$  (average profile roughness) was chosen as 2D or profile roughness parameter.

**Cutting parameters.** The cutting regimes were chosen within the suggested range of the cutting insert manufacturer Sandvik Coromant. Following the suggestions of cutting insert manufacturer, the following finishing operation data were chosen: depth of cut ( $a$ ) is 0.5 mm, feed ( $f$ ) is 0.08 mm/rev. and 0.1 mm/rev. and cutting speed ( $v$ ) is 130 m/min and 150 m/min. The depth of cut and feed was chosen within the suggested range, except the cutting speed. It was chosen outside suggested range because the cutting will be performed in dry regime – without using cooling fluid. Use of cooling fluid can contaminate the workpiece, because of its high porosity. Dry cutting is another feature which distinguishes PM components from ordinary components. If it is decided to use a cooling fluid, then additional operation (cleaning) is required, which can rise the costs of manufacturing, and does not always provide satisfactory cleaning. Therefore, it was decided not to use the cooling fluid and accordingly adjust the cutting speed. It is practice to divide the suggested cutting speed by two if no cooling fluid is used. Accordingly, the cutting speed range is from 102.5 to 147.5 m/min. For experiment the cutting speed of 130 m/min and 150 m/min was chosen.

The depth of cut was kept constant, because it does not provide the same adaptive characteristics as cutting speed and feed. Based on the results of experiment a mathematical prediction model can be developed. The following model can be configured to provide adaptive adjustment of feed and cutting speed during the machining, therefore providing necessary surface roughness adjustments. It is more complicated to achieve adaptive characteristics based on the depth of cut. The depth of cut is closely related to the toolpath, which restricts adaptive changes during the machining process.





a) b) c)  
 Fig. 2 a) schematic of turning AB; b) deformed AB due to high pressure from the chuck; c) set up of the AB in the lathe using tailored fixture.

Fig. 2a) illustrates a schematic of turning AB. The turning was performed on the lathe *Okuma L200 E-M*. The AB is a thin walled component, therefore a custom made fixture was created. Without the tailored fixture, the AB is subject to deformations (see Fig. 2b).

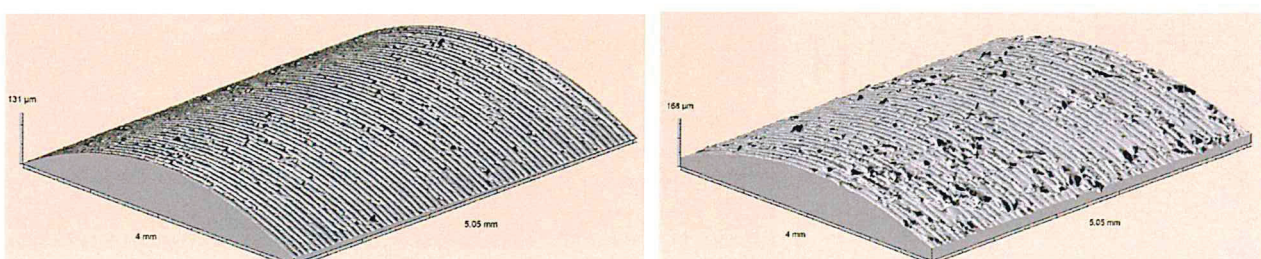
## Results and Discussion

From the results it can be concluded that the best surface roughness can be achieved using a feed of 0.08 mm/rev. and cutting speed of 130 m/min (see Table 2). Almost the same result can be achieved by increase of the cutting speed by 20 m/min, which is 150 m/min. Another picture arises when the feed is changed. When the feed ( $f$ ) was changed by increasing it from 0.08 mm/rev. to 0.1 mm/rev., then the surface roughness increased almost twice. It can be concluded that the change of feed ( $f$ ) influences the change of surface roughness much more than the cutting speed ( $v$ ).

Table 2. Profile and surface roughness parameters according to cutting parameters.

| No. of experiments | Ra – average profile roughness [ $\mu\text{m}$ ] | Sa – average surface roughness [ $\mu\text{m}$ ] | Sq – root mean square surface roughness [ $\mu\text{m}$ ] | a – depth of cut [mm] | f – feed [mm/rev.] | v – cutting speed [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                       |

When the experiment No. 1 was analysed, the following features were indicated. The 3D surface roughness parameters showed sharp increase in surface roughness. Nevertheless, 2D profile roughness parameter does not indicate the following sharp increase. The samples were analysed further and from graphical representations of 3D surface roughness it was found out that the sample of the experiment No. 1 had multiple surface defects comparing to other samples (see Fig. 3). The 2D profile roughness measurement are performed only on one line and characterizes only this one line. If defects are not on the measured line, they are neglected giving false information about the surface. In contrast, the 3D surface roughness parameters include more detailed information about the surface. In this case, the defects were also included and the real characteristics of the surface roughness were indicated. Accordingly, given experiment gave unexpected result showing the necessity of 3D surface roughness measurements instead of 2D roughness measurements. In industries where quality defines performance, the 3D surface roughness parameters should be used.





a)

b)

Fig. 3. Graphical representation of 3D surface roughness for the experiment No. 2 (Fig. 3a) and for the experiment No. 1 (Fig. 3b).

The morphology of the chips was also investigated (see Fig. 4). Obtained chips could be classified as discontinuous or segmental chips. These chips are convenient to collect, handle and utilise. For the following machining process this form of chips can be considered as desirable and does not create additional complications to the machining.

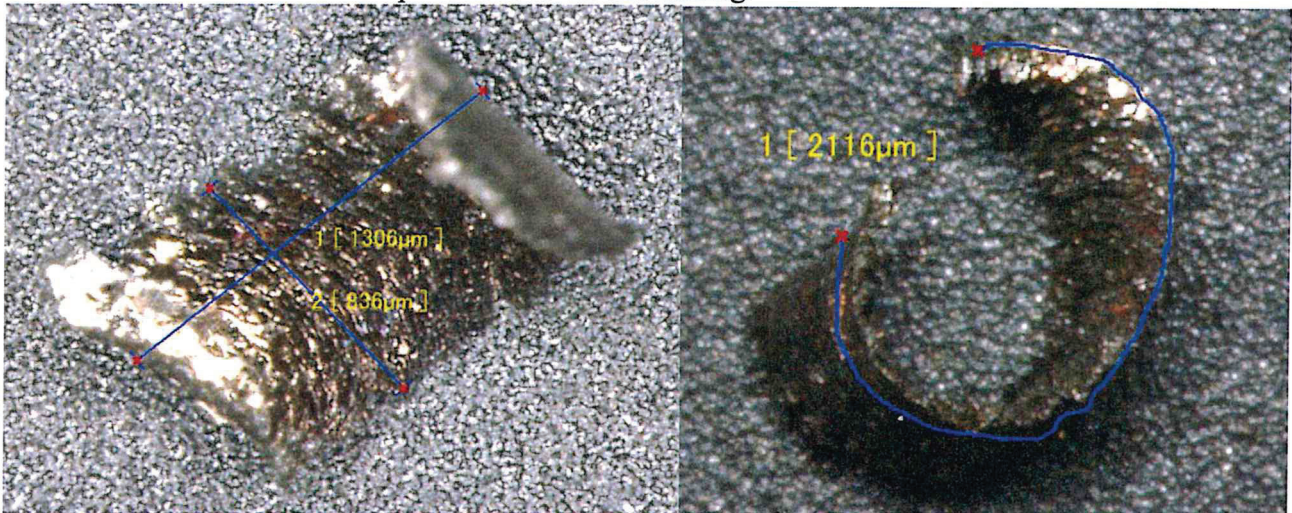


Fig. 4. Morphology of the chips, where shown chip has a width of 836  $\mu\text{m}$ , a projected length of 1306  $\mu\text{m}$  and overall length of 2116  $\mu\text{m}$ .

## Conclusions and Further Research

The research was performed to investigate the influence of cutting parameters on the surface roughness parameters, especially on the 3D surface roughness parameters, machining PM components. From the given range of cutting parameters the best surface roughness ( $S_a$  0.41  $\mu\text{m}$ ) was achieved using the following regimes: depth of cut (a) 0.5 mm; feed (f) 0.08 mm/rev. and cutting speed (v) 130 m/min. The surface roughness measurements proved that the 3D surface roughness parameters describe the measured surface more accurately than 2D profile roughness parameters giving more reliable data about the surface. The 3D surface roughness measurements should be as a first choice measurement technique. The morphology of the chips does not indicated any additional problems and were considered to be satisfactory in all range of the cutting regimes. Further research could include broader ranges of cutting parameters as well as depth of cut (a) could be added as a variable. Additionally, relationships between 3D and 2D roughness parameters could be investigated based on machined surfaces including different kind of defects and other anomalies.

## References

- [1] Л.Н. Дьячкова, Л.Ф. Керженцева, Л.В. Маркова, Порошковые материалы на основе железа, – Минск: «Тонпик», 2004.
- [2] А.Я. Артамонов, Влияние условий обработки на физико-механическое состояние металлокерамических материалов. Наукова думка, Киев, 1965.
- [3] Christopher P. Adams, Carl Blais and Deepak S. Madan. Machining & Machinability of PM Components, Report/Survey by Metal Powder Industries Federation. Metal Powder Industries Federation, 2006.

- [4] И. И. Данилов, Обработка резанием порошковых материалов. Электронное научно - техническое издание, Наука и образование, 2011.
- [5] A. Kromanis, J. Krizbergs, Methods for prediction of the surface roughness 3D parameters according to technological parameters. 5th International DAAAM Baltic Conference (2006) 145-149.
- [6] В. Миронов, П.Станкевич, А.Татаринов, В.Земченков, Д. Сергеев. Прочностные и акустические свойства втулок из низколегированных материалов для рычажной тормозной системы подвижного состава. – Минск. Порошковая металлургия, "Беларуская навука", 2015, с.174 -185.
- [7] E.D. Kirby, Z. Zhang, J.C. Chen, Development of an accelerometer-based surface roughness prediction system in turning operations using multiple regression techniques, in: Journal of Industrial Technology, Volume 20, Number 4, 2004. pp. 1-8.

**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.



# The possibility of modifying the elements of the bearing assembly with nanoparticles in order to reduce the friction coefficient

P Stankevich<sup>1</sup>, V Mironovs<sup>1</sup>, E Vasilyeva<sup>2</sup>, A Breki<sup>2</sup> and O Tolochko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Powder materials, Riga Technical University, Riga, Kipsalas 6B, LV-1048, Latvia

<sup>2</sup>Material Science Faculty, Peter the Great State Polytechnic University, Polytechnicheskaya Street, 29, 195251 Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: pavels.stankevics@rtu.lv

**Abstract.** Recent study considers the tribological characteristics of the sintered bushings used in the connecting nodes brake lever system of railway cars. Particular attention is paid sleeves low content of alloying elements. Bushings had been prepared by powder metallurgy route by using low alloyed powders of Fe-Cu-C system. Porosity after sintering was about 20%. Generally, before using material was impregnated by industrial mineral oil in order to improve friction condition.

In the recent study we use new lubricating compositions for impregnating in sintered bodies. Such compositions consist of basic mineral oil with addition of 4 wt.% of layered tungsten dichalcogenides (WS<sub>2</sub> and WSe<sub>2</sub>) nanoparticles, which were ultrasonically dispersed. Tungsten disulphide nanoparticles have spherical shape with the diameter of 30-50 nm, and diselenide nanoparticles have a flat shape with the mean dimensions of 5x70 nm. Tribological testing of the product was provided. Sintered bushings impregnated with commercial oil and suspension of nanoparticles were tested in the spinning friction conditions in the couple with bearing steel at the load of 210 N and spinning rate of 200 rpm.

The friction test in couple with steel exhibited the value of friction moment to be about 2 times less as compared with commercial oil. The additions of tungsten disulphide nanoparticles also significantly decrease oscillations the friction torque.

## 1. Introduction

The powder metallurgy is still the common way for production of sintered bushing for most of machines and mechanisms. Main advantage of this technology is practically total absence of waste products and controllable porosity in produced materials. [1] Friction, wear and lubricant play significant role in economical effect by the determining of the lifetime of machines and mechanisms. [2] Side effects of friction and wearing, changing the geometry and vibrations during the exploitation brings to the losing functionality by the dramatically breakdown or progressive failure of friction parts. It's important to consider for production of parts for railway and automotive industry.

Factors influent significantly on wearing and friction coefficient depends not only from properties of initial materials, but also from number of parameters. Even insignificant changes in contact area of surfaces, temperature and humidity in contacting zone brings to the significant changes in wear rate and



friction coefficient value of powder metallurgy parts. Also the main important factors are sliding velocity, viscosity of grease and normal force action in lubricating systems. [3]

Tendency to the ecological and economical efficiency in development of new tribological materials and systems is strength during the last ten years. In this area were investigated oxide- and nonoxide modified ceramics, metal-glass materials and materials modified by nanodispersed particles.

Nanoparticles application allows improving chemical resistance and tensile strength in low- and high temperature conditions. In this way the big interest is to the possibility to decrease friction coefficient and wear of powder bushings.

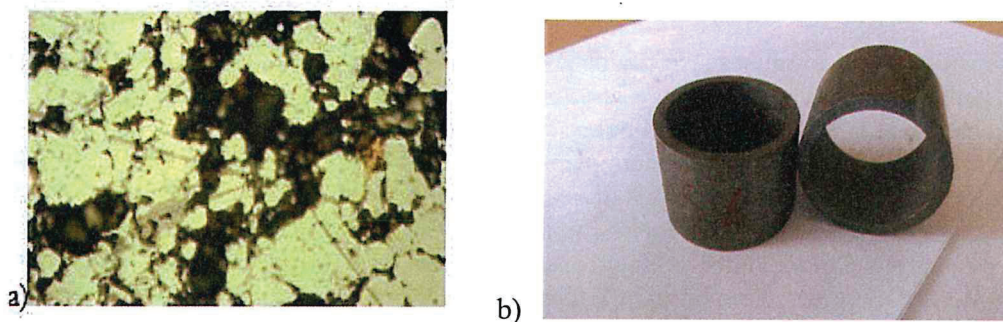
Among the modifying additives are carbides, borides, metal oxides. The greatest application was found for carbon materials (carbon nanotubes, fullerenes and ultradispersed diamond-graphite compositions). In the work [4] the method of increasing tribological properties by using bearing lubricants activated with nanoscale diamond-graphite additives is considered. For practical use, the treatment of a material in electrolytes by prolonged immersion is most often used. This ensures a reduction in roughness, an increase in the stability of the rheological properties of the liquid lubricant materials.

The results of studies of the use of solid lubricants based on metallic dichalcogenide compounds, such as an additions of molybdenum and tungsten disulphides are presented in [5]. It is noted that tungsten disulfide is more stable at temperatures above 300 ° C. The synthesis of WS<sub>2</sub> particles was considered in detail in [6].

Based on those researches we have studied a possibility to decrease a friction coefficient of sliding bearing assembly by using nanoparticles of tungsten disulfide and diselenide in lubricating oil.

## 2. Materials and methods

Studies were carried out by using of bushing of brake lever system made of Fe-Cu-C material [7]. Microstructure and general appearance are shown in the Fig.1.



**Figure 1.** Microstructure -a, and photographs of bushings –b.

The bushings from this alloy were manufactured by powder metallurgy route. A multicomponent powder mixture ANS100.29 + Cu + Ni + C was used for the manufacture of MKV. An estimation of roughness parameters of metal-powder products was considered in [8]. The physical and mechanical properties and dimensions of the test material are shown in Table 1.

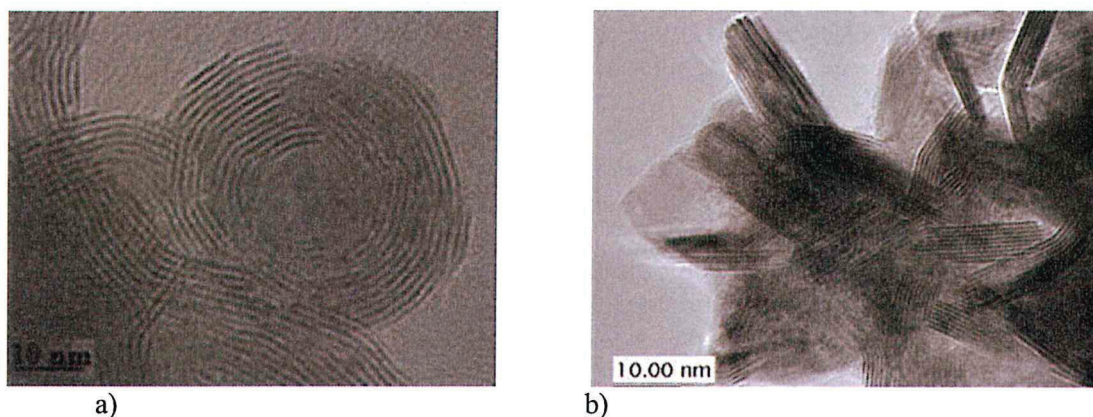
**Table 1.** Size geometry and properties of sintered billets.

| Parameters                                           | Values                    |
|------------------------------------------------------|---------------------------|
| Dimentions: Diameter external; internal, length (cm) | 45x29x31                  |
| Density, g/cm <sup>3</sup>                           | 6,2                       |
| Open Porosity, %                                     | 16                        |
| Hardness HB, MPa                                     | 700                       |
| Strength at radial compression, MPa                  | 420                       |
| Microstructure                                       | Perlite, Sulfides, Pores; |



To ensure the self-lubricating effect, the sleeves were impregnated with hydraulic oil. Thus, even at the beginning of the movement between the shaft and the bearing, it should be an oil film creating favorable operating conditions.

In the study [9] a new lubricating compositions for impregnating in sintered bodies had been used. Such compositions consist of basic mineral oil with addition of 4 wt.% of layered tungsten dichalcogenides ( $WS_2$  and  $WSe_2$ ) nanoparticles, which were ultrasonically dispersed. In the recent study, the bushings were impregnated with transmission oil of Russian grade MS-20, as well as the same oil with additions of tungsten disulfide  $WS_2$  and diselenide  $WSe_2$  nanoparticles. Tungsten disulphide nanoparticles have spherical shape with the diameter of 30-50 nm, and diselenide nanoparticles have a flat shape with the mean dimensions of 5x70 nm as shown in the Fig.2.



**Figure 2.** TEM micrographs of  $WS_2$  (a) and  $WSe_2$  (b) nanoparticles.

Tribological testing of the product was provided. Sintered bushings impregnated with commercial oil and with suspension of nanoparticles were tested in the spinning friction conditions in the couple with bearing steel at the load of 210 N and spinning rate of 200 rpm.

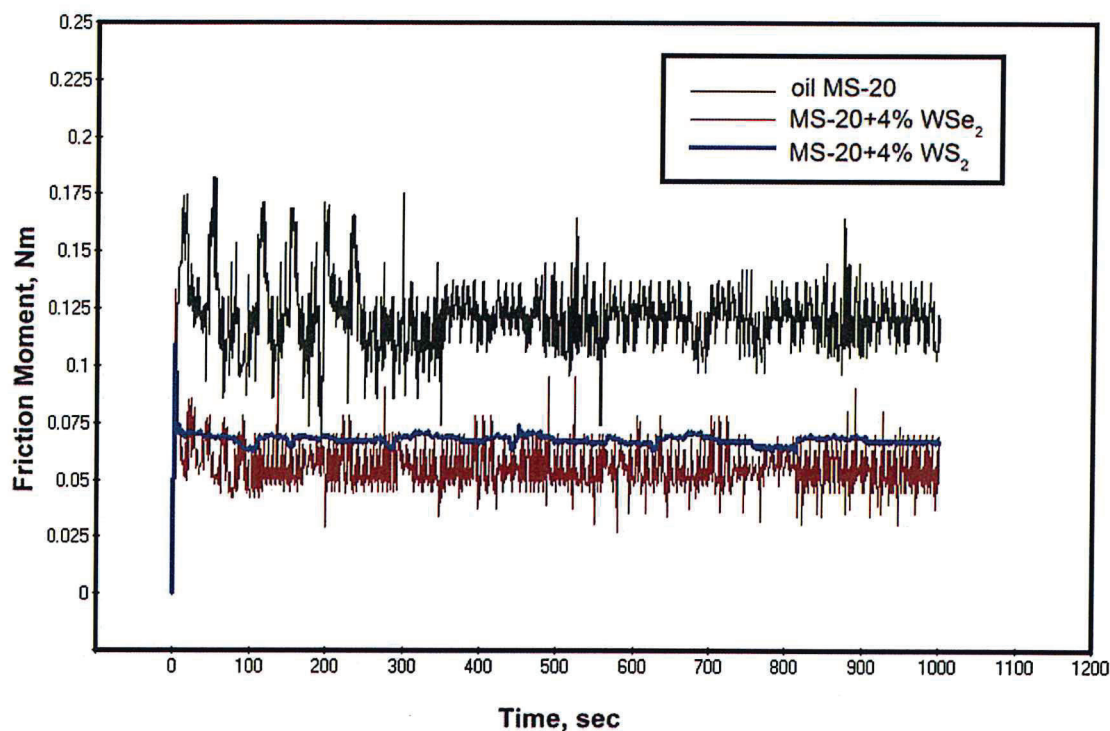
Testing was carried out by using the friction machine PBD-40, developed in Saint Petersburg Polytechnic University. A cylindrical specimen of bearing steel (SHKh-15 in Russian grade) of 10 mm in diameter, was clamped in the spindle of the friction machine. The test bushing was placed under the sample and fixed in a special clamp on a rotating base, which was kept from turning by a metallic wire fixed on the strain gage. Samples were brought into contact with a normal load of 210N. Further, the process of rotation of a spindle with a cylindrical sample with a rotation frequency of 200 rpm was started. The time of one test was 1000 s.

### 3. Results and discussion

The dependences of the frictional torque of “roller-ring” rotation on time for bushings impregnated with MS-20 oil, as well as with lubricant compositions, are shown in Fig.3. In all cases, the straining occurs in the second sec of the experiment, the moment of friction is equal to  $0.12 \pm 0.1$  Nm for all lubricating compositions. The identity of the moments of friction and the intervals of time before straining can be related to the identity of the initial friction conditions expressed, primarily in the overlapping of pores with oxide films of a certain thickness.

The graph (Fig. 3) also shows that the dependence of the frictional torque on time for bushes impregnated with MS-20 oil and lubricating composition with  $WSe_2$  have a “jumps” in the frictional moment, which may be associated with contact and destruction of ungreased oxide films. Then after extruding from the pores of the lubricating oil, the torque fluctuations decrease. Since the nominal contact area is variable, new areas with oxide films are involved in the friction process, which also break down, opening the way to the lubricating oil on the surface.





**Figure 3.** Dependence of the frictional torque versus time when testing a sleeve impregnated with mineral oil MS-20 and lubricating compositions containing 4wt.% of WSe<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub>.

The dependence of the frictional moment of roller-ring rotation on time for a bushing impregnated with a lubricating composition oil MS-20 + 4% WSe<sub>2</sub> and MS-20 + 4% WS<sub>2</sub> is shown in Fig.3. For these compositions, after friction, a sharp decrease in the frictional torque occurs due to the extrusion of the lubricant composition onto the friction surface and the interaction of the nanoparticles introduced into the lubricant compositions with the friction surface. On average, the frictional torque was equal to  $\approx 0,056\text{Nm}$  and  $\approx 0,067\text{Nm}$  for oils modified with selenide and tungsten sulfide nanoparticles, respectively.

The most stable moment of frictional friction was shown by a bushings impregnated with a lubricating composition MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>. It can be noted that for the lubricant composition containing spherical nanoparticles of tungsten disulfide, after characteristic breaking down in the beginning of friction, characteristic “jumps” in the moment associated with the destruction of the oxide film do not appear. This can be due to, on the one hand, small thickness of oxide film, and on the other hand, due to spreading the lubricant composition squeezed out on the local site over the surface of the oxide film, which has not yet been destroyed, but which comes into contact. In this case, the spherical shape of the introduced particles begins to play an important role.

#### 4. Conclusions

Based on the conducted express study we can conclude:

The test bushings with friction on the flat base of steel cylinder have close moments of friction at brakedown and time intervals before stationary friction start, which is related to the identity of the initial conditions of friction, as well as to overlapping pores with oxide films of a certain thickness.

When the bushings is impregnated with the lubricating composition MS-20 + 4% WSe<sub>2</sub> and MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>, the average frictional torque decreases by  $\approx 53\%$  and  $\approx 44\%$  respectively in comparison with the bushings impregnated with MS-20 lubricating oil.

The most stable moment of friction was shown by bushings impregnated with lubricating composition MS-20 + 4% WS<sub>2</sub>, that may correspond with the shape of nanoparticles.

#### References

- [1] Ilyshenko A. 2013. Powder Metallurgy – effective method of strategical industrial tasks solutions (Poroshkovaya metallurgiya = effektivnyi metod resheniya strategicheskikh zadach razvitiya promyshlennosti). Powder Metallurgy: Collection of Scientific Papers, National Academy of Sciences of Belarus, N. 36, Minsk, Belarus, pp 7 - 30. (in Russian)
- [2] Bogdanovich P. 1998 Friction and wear in machinery. Minsk. 374 p.
- [3] Shi Z et al. 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, 6 p.
- [4] Paula Ussa Aldana. 2016 Tungsten disulfide nanoparticles as lubricant additives for the automotive industry. Universit'e de Lyon, pp 46-48.
- [5] Andreev A. et al. 2013 Solid Lubricant coatings based on tungsten disulphide. In book: Powder Metallurgy. Iss.38, Minsk,. pp 212-215. (in Russian)
- [6] Vasilyeva E, Tolochko O, Kim B, Lee D and Kim D. 2009 Synthesis of Tungsten Disulphide Nanoparticles by the Chemical Vapor Condensation Method Microelectronics Journal vol. 40 (4-5) pp 687 – 691.
- [7] Mironovs V, Stankevich P, Tatarinov A, Zemchenkov V and Sergeyev D. 2015 Study of Antifriction Powder Metal Materials for Braking Systems of Railway Rolling Stock In: Powder Metallurgy: 9 International Sumposium "Powder Metallurgy and Surface Ingeneering, New Composite Materials. Welding" Belarus, Minsk, Belarusskaya navuka, pp 174-185.
- [8] Boiko I, Linins O, Mironovs V and Kamols A. 2013 2D and 3D surface characterization of the tribological powder parts", Powder Metallurgy: Collection of Scientific Papers, National Academy of Sciences of Belarus, N. 36,. Minsk, Belarus, pp 85 - 91.
- [9] Vasilyeva, E., Nasibulin, A., Tolochko, O., Rudskoy, A., Sachdev, A., Xiao, X. 2015 Application of WSe<sub>2</sub>; Nanoparticles Synthesized by Chemical Vapor Condensation Method for Li-Ion Battery Anodes Zeitschrift fur Physikalische Chemie vol.229 (9) pp 1429-1437.

LV Patents

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. 20.12.2017.





LATVIJAS REPUBLIKA

## PATENTS

Latvijas Republikas Patentu valde apliecina, ka šajā patentā  
ietvertais izgudrojums ir iekļauts patentu reģistrā ar

Nr. 15225

Patents ir spēkā Latvijas Republikā 20 gadu no 29.12.2016.,  
ja šis termiņš Patentu likumā paredzētajā gadījumā nebeidzas  
agrāk



Patents piešķirts

20.12.2017.

Rīga

Patentu valdes  
direktors  
S. Laganovskis

19



LATVIJAS REPUBLIKAS  
PATENTU VALDE

11 LV 15225 B

51 Int.Cl G01N3/56

Latvijas patents uz izgudrojumu  
2007.g. 15.februāra Latvijas Republikas likums

12

Īsziņas

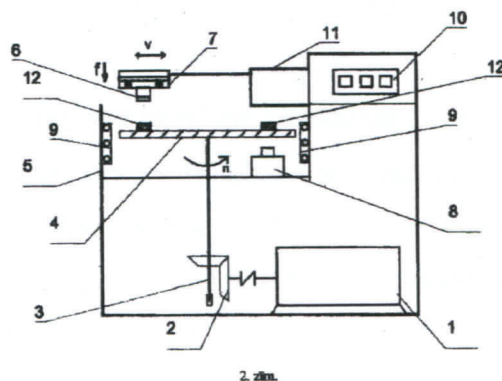
|    |                                 |            |
|----|---------------------------------|------------|
| 21 | Pieteikuma numurs:              | P-16-109   |
| 22 | Pieteikuma datums:              | 29.12.2016 |
| 41 | Pieteikuma publikācijas datums: | 20.04.2017 |
| 45 | Patenta publikācijas datums:    | 20.12.2017 |

|    |                                                                                             |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 73 | Īpašnieks(i):<br>RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE,<br>Kaļķu iela 1, Rīga LV-1658, LV             |
| 72 | Izgudrotājs(i):<br>Viktors MIRONOVS (LV),<br>Pāvels STANKĒVIČS (LV),<br>Jānis RUDŽĪTIS (LV) |

54 Virsraksts: IEKĀRTA MATERIĀLU TRIBOLOĢISKO ĪPAŠĪBU NOVĒRTĒŠANAI

57 Kopsavilkums: Izgudrojums attiecas uz mašīnbūves nozari, konkrēti, uz iekārtām un sistēmām materiālu berzes un nodilumizturības pārbaudei. Piedāvāta iekārta, kas ļauj paplašināt berzes mašīnas funkcionālās iespējas, imitējot triboloģiskos testus tuvāk berzes mezglu reālajiem darba apstākļiem. Minētā iekārta satur pievadu ar horizontālu rotējošu disku (4), ierīci (7) paraugu (6) piestiprināšanai pie indentora, slogotājierīci ar slodzes regulēšanas mehānismu. Rotējošais disks (4) izvietots darba kamerā (5), kura sadalīta divos dobumos, turklāt augšējā dobumā ir uzstādīts sildītājs (9), bet apakšējā dobumā zem diska (4) ir izvietota dzesēšanas ierīce (8). Uz diska (4) virsmas iespējams piestiprināt nomaināmas pretķermeņa plāksnes (12) ar mainīgu profilu. Ar vadības sistēmas (10) palīdzību iespējams mainīt diska (4) rotācijas ātrumu un regulēt piespiešanas slodzi, kā arī pārvietot indentoru vertikālā virzienā, mainot lineāro ātrumu. Temperatūru kamerā var mainīt no -30 līdz +50 °C. Ierīci (7) ar indentoru paraugu (6) piestiprināšanai, kas atrodas virs

diska (4), var papildināt ar impulsa elektromagnētu, kas regulē impulsa slodzi uz paraugu (6).



2. zīm.

LV Patents

Rīgas Tehniskā Universitāte. *Paņēmiens un iekārta poraino izstrādājumu piesūcināšanai ar nanodaļiņām*. Viktors Mironovs, Aleksandrs Polakovs, **Pāvels Stankēvičs**, Aleksandrs Korjamins. Iesniegšanas datējums 2018-12-28. Patenti un Preču Zīmes. LV15433. 20.02.2020.





LATVIJAS REPUBLIKA

## PATENTS

*Latvijas Republikas Patentu valde apliecina, ka šajā patentā  
ietvertais izgudrojums ir iekļauts patentu reģistrā ar*

*Nr. 15433*

*Patents ir spēkā Latvijas Republikā 20 gadu no 28.12.2018.,  
ja šis termiņš Patentu likumā paredzētajā gadījumā nebeidzas  
agrāk*

Patents piešķirts

20.02.2020.  
Rīga

Patentu valdes  
direktors

/direktora p. i. G. Ramāns

19



**LATVIJAS REPUBLIKAS**  
PATENTU VALDE

11 **LV 15433 B**

51 Starpt. pat. kl.

**B22F3/26**  
**B05C3/109**  
**B82Y30/00**

**Latvijas patents uz izgudrojumu**  
2007.g. 15.februāra Latvijas Republikas likums

## 12 **Īsziņas**

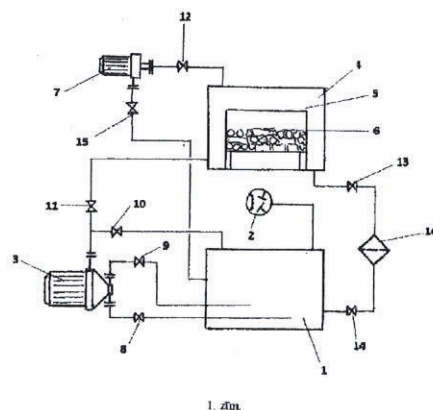
- 21 **Pieteikuma numurs:** P-18-109
- 22 **Pieteikuma datums:** 28.12.2018
- 41 **Pieteikuma publikācijas datums:** 20.08.2019
- 45 **Patenta publikācijas datums:** 20.02.2020

- 73 **Īpašnieks(i):**  
RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE,  
Kaļķu iela 1, Rīga LV-1658, LV
- 72 **Izgudrotājs(i):**  
Viktors MIRONOVS (LV),  
Aleksandrs POLAKOVS (LV),  
Pāvels STANKĒVIČS (LV),  
Aleksandrs KORJAKINS (LV)

54 **Virsraksts:** **PAŅĒMIENS UN IEKĀRTA PORAINO IZSTRĀDĀJUMU PIESŪCINĀŠANAI AR NANODAĻIŅĀM**

57 **Kopsavilkums:**

Izgudrojums attiecas uz pulvermetallurģijas nozari, konkrēti, uz paņēmieniem un iekārtām saķepināto izstrādājumu piesūcināšanai ar nanodaļiņām. Izgudrojums ļauj iegūt lielāku piesūcināšanas suspensijas apjomu, vienlaikus piesūcināt lielāku izstrādājumu skaitu un paaugstināt piesūcināšanas kvalitāti. Piedāvāta iekārta, kas satur piesūcināšanas kameru (4), konteineru (5) izstrādājumiem (6), eļļas tilpni (1) un vakuumsūkni (7). Minētā iekārta papildus satur sajaucēju-disperģētāju (3), kas ar ventili un cauruļvadu sistēmu, divām sūcējcaurulēm un vienu spiedcauruli ir savienots ar eļļas tilpni (1), turklāt sajaucēja-disperģētāja (3) spiedcaurule ir savienota ar piesūcināšanas kameru (4), bet vakuumsūkņa (7) izplūdes caurule ir savienota ar suspensijas tilpni. Starp piesūcināšanas kameru (4) un suspensijas tilpni ir uzstādīts eļļas filtrs (16). Piedāvāts arī paņēmieni saķepināto izstrādājumu piesūcināšanai, izmantojot minēto iekārtu. Saskaņā ar minēto paņēmieni piesūcināšanas suspensiju pakļauj kavitācijai sajaucējā-disperģētājā (3) ar divkārtšo cirkulāciju, līdz iegūta homogēna suspensija, pēc tam suspensiju padod uz ūdens un gaisa necaurlaidīgu piesūcināšanas kameru (4), kurā ir izvietoti izstrādājumi (6), kurus iztur suspensijā 20 līdz 30 minūtes, no piesūcināšanas kameras (4) atsūknē gaisu un eļļas tvaikus un padod tilpnē suspensijas sagatavošanai. Piesūcināšanas procesa laikā piesūcināšanas kamerā (4) spiedienu neobligāti paaugstina līdz 2 bar. Izgudrojumu var izmantot keramisko materiālu ražošanā, koksnes un citu materiālu piesūcināšanai.



1. zīm.