

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Sergejs Ločs

Doktora studiju programmas “Ražošanas tehnoloģija” doktorants

**LĀZERUZKAUSĒTS VIRSMU NOCIETINOŠS
VIENSLĀŅA PĀRKLĀJUMS AR MEHĀNISKO
ĪPAŠĪBU GRADIENTU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
IRĪNA BOIKO

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Ločs, S. Lāzeruzkausēts virsmu nocietinošs vienslāņa pārklājums ar mehānisko īpašību gradientu. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 36 lpp.

Iespiests saskaņā ar Mašīnbūves un mehānikas zinātnes nozares promocijas padomes “RTU P-16” 2019. gada 27. jūnija lēmumu, protokols Nr. 3.

ISBN 978-9934-22-455-3 (print)

ISBN 978-9934-22-456-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 15. jūlijā plkst. Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 402. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ēriks Geriņš,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. (Doctor of Technical Science) Alexander S. Kalinichenko*,
Baltkrievijas Valsts tehniskā universitāte, Baltkrievija

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

APSTIPRINĀJUMS

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

Sergejs Ločs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 14 pielikumu, 130 attēlu, 37 tabulas, kopā 175 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 163 informācijas avotu nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Pētījuma metodes	6
Darba zinātniskā novitāte	6
Darba praktiskā nozīme.....	7
Praktiskais lietojums	8
Promocijas darba autors aizstāv	8
Promocijas darba aprobācija	8
Ziņojumi konferences.....	8
Publikācijas	9
Promocijas darba struktūra un saturs	10
PROMOCIJAS DARBA ĪSS APRAKSTS.....	11
1. Literatūras apskats.....	11
2. Eksperimentālo pētījumu metodika un līdzekļi.....	12
3. Lāzeruzkausēta valnīša ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumu izpēte	14
4. Lāzeruzkausēto pārklājumu ar zobenveida caurkausējumiem kvalitātes raksturlielumu un īpašību izpēte.....	18
5. Lāzeruzkausēto pārklājumu anizotropiskās struktūras ietekmes izpēte uz virsmas īpašībām pēc mehāniskās apstrādes.....	23
6. Atšķirīgi lāzeruzkausēto pārklājumu salīdzinošā analīze.....	28
PĒTĪJUMA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	32
LITERATŪRAS SARAKSTS	33

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mašīnu elementu un instrumentu bojājumi ekspluatācijas laikā lielākoties tiek saistīti ar virsmas sabrukšanas procesiem. Tāpēc pārklājumu tehnoloģijām metālizstrādājumu darba resursa paaugstināšanai šobrīd pievērš lielu uzmanību, īpaši tādās nozarēs kā aviācijā, mašīnbūvē, kuģu būvniecībā, instrumentu ražošanā u. c. Līdz ar to, materiālu un enerģētisko resursu globālais deficīts veicina inovatīvo tehnoloģiju un materiālu ieviešanu, lai pagarinātu izstrādājumu ekspluatācijas termiņu, saglabājot maksimālos darbības rādītājus līdzsvarā ar ekonomisko efektivitāti un mazāku iedarbi uz apkārtējo vidi.

Lāzeruzkausēšana ir progresīva pārklājumu uznesšanas tehnoloģija, ko plaši izmanto virsmu fizikāli mehānisko un tribotehnisko īpašību uzlabošanai metāliskiem komponentiem. Pateicoties virknei priekšrocību, salīdzinot ar termiskās uzsmidzināšanas un metināšanas procesiem, šis process tiek plaši izmantots virsmu nocietināšanas, atjaunošanas un remonta darbos augstas vērtības mašīnu elementiem un instrumentiem (turbīnu lāpstiņas, dzinēju komponentes, spiedienapstrādes instrumenti u. c.) [1]–[4]. Turklāt lāzeruzkausēšanas process veiksmīgi tiek lietots aditīvajā izgatavošanā (AM), kas paredz sarežģītu formu 3D detaļu izgatavošanu pa slāņiem atbilstoši datorizēti projektēta (CAD) modeļa ģeometrijai [5]–[7].

Savukārt joprojām pastāv problēmas instrumentu tēraudu un kompozītmateriālu uzkausēšanā, jo ar šiem materiāliem tiek veidoti pārklājumi un aditīvās tehnoloģijas 3D objekti, kas ir paredzēti darbam smagos darba apstākļos. Raksturīgie defekti ir plaisāšana un atslāņošanās, kas rodas gan izstrādājumu ekspluatācijas laikā, gan arī tieši tehnoloģiskā procesa gaitā [8]–[15]. Par iemesliem dēvē augstas temperatūras ietekmi, kā arī šo materiālu fizikāli mehānisko īpašību atšķirīgumu no pamatmateriāla īpašībām, tāpēc uz pārklājuma un pamatnes robežvirsmas rodas augsta līmeņa paliekošie spriegumi, kas ievērojami pasliktina pārklājumu kvalitāti un ekspluatācijas īpašības [1], [16].

Viens no perspektīvākiem virzieniem šo problēmu risināšanai ir pārklājumu ar īpašību gradientu (*Functionally Graded Coatings* – angl. val.) izveidošana. Šāda tipa pārklājumiem piemīt īpašību heterogenitāte pa normāli materiāla tūlimumam, kas ļauj tuvināt pārklājuma un pamatmateriāla īpašības, lai sasniegtu nepieciešamo stigrības un adhēzijas stiprības kombināciju. Pārklājumus ar īpašību gradientu attiecina uz progresīvās klases materiāliem. Īpašību gradients materiālā rodas ķīmiskā sastāva, fizikālas struktūras un mehānisko īpašību izmaiņu dēļ [16].

Tādējādi lāzeruzkausēšanas metodes izstrāde virsmas nocietinošo pārklājumu ar mehānisko īpašību gradientu iegūšanai mašīnu elementu un instrumentu virsmu nocietināšanai un atjaunošanai ir aktuāls zinātniski tehnisks uzdevums.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izpētīt lāzeruzkausēta vienslāņa virsmu nocietinoša pārklājuma izveides iespēju ar mehānisko īpašību gradientu virzienā pa normāli no virsmas uz pamatmateriālu, lai paaugstinātu pārklājumu plaisizturību un attiecīgi pagarinātu metālizstrādājumu darbības mašīnu elementu un instrumentu izgatavošanā un atjaunošanā.

Mērķa sasniegšanai tika definēti šādi uzdevumi:

- 1) veikt pārklājumu nozīmes, lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas teorētiskā analīze un esošās situācijas izpēte; būtisko lāzeruzkausēšanas procesa tehnoloģisko parametru un pārklājuma kvalitātes raksturlielumu noteikšana;
- 2) eksperimentāli izpētīt lāzeruzkausēšanas procesa tehnoloģisko parametru (uzkausēšanas ātruma un lāzera stara defokusēšanas) ietekmi uz ātrgriezējtērauda atsevišķa valnīša ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumiem (formas ģeometrijas parametriem, karbīdus veidojošo elementu daudzumu uzkausētajā slānī un porainību);
- 3) veikt ātrgriezējtērauda pārklājumu ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumu (biezums, caurkausējuma dziļums, karbīdus veidojošo elementu daudzums uzkausētajā slānī, mikrocietības izmaiņas raksturs sistēmā “pārklājums-pamatne”, defekti) formēšanas apstākļu eksperimentālo izpēti atkarībā no lāzeruzkausēšanas procesa režīmiem. Novērtēt termiskās pēcapstrādes (atlaidināšanas) ietekmi uz pārklājumu īpašībām;
- 4) eksperimentāli izpētīt ātrgriezējtērauda lāzeruzkausēto pārklājumu anizotropiskās struktūras ietekmi uz virsmas īpašībām pēc mehāniskās apstrādes un izpētīt tehnoloģisko parametru (uzkausēšanas ātrums, atsevišķu valnīšu pārklāšanas pakāpe, fokusa nobīde) ietekmi uz pārklājumu kvalitāti un funkcionālajām īpašībām (pārklājuma biezums, pārklājuma slīpētas virsmas cietība un berzes koeficients);
- 5) veikt ar atšķirīgām lāzeruzkausēšanas metodēm izveidoto ātrgriezējtērauda pārklājumu salīdzinošo analīzi.

Pētījuma metodes

Promocijas darba mērķa un definēto uzdevumu sasniegšanai tika izmantotas praktisko pētījumu metodes, eksperimentu rezultātu statistiskā apstrāde, analītiskās, salīdzinošās un grafiskās metodes; pārklājumu metalogrāfiskie pētījumi, cietības un mikrocietības, virsmas raupjuma un tribotehnisko īpašību izpēte; optiskā un skenējošā elektronu mikroskopija, kā arī enerģijas dispersīvās rentgenstaru spektroskopijas analīze. Uzdevumu izpildei un rezultātu grafiskai attēlošanai tika izmantoti datorprogrammu nodrošinājumi: *Mastercam*, *Robotmaster*, *Minitab*, *Microsoft Office*, *InstrumX*, *VegaTC*, *INCA Energy* un *OriginPro*.

Darba zinātniskā novitāte

Pirmo reizi tika izpētītas lāzeruzkausēto pārklājumu ar pamatmateriāla zobenveida caurkausējumu formēšanas procesa likumsakarības, kas kļuva par pamatu jaunas lāzeruzkausēšanas metodes izstrādei, ļaujot iegūt virsmas nocietinošus pārklājumus ar

kontrolējamu mehānisko īpašību gradientu virzienā pa normāli no virsmas uz pamatmateriālu, lietojot vienkomenta uzkausēšanas materiālu.

Izmantojot jaunu lāzeruzkausēšanas metodi, tika veikta detalizēta lāzeruzkausēšanas procesa režīmu ietekmes izpēte uz uzkausēta valnīša un pārklājuma kvalitātes raksturlielumu formēšanas apstākļiem, lietojot ātrgriezējēterauda (*AISI M2*) piedevu materiālu. Uz šī pētījuma pamata:

- noteikti lāzeruzkausēšanas procesa režīmu apgabali (lāzera starojuma jaudas blīvuma maksimums $4,87 \cdot 10^3 - 7,73 \cdot 10^3 \text{ W/mm}^2$, uzkausēšanas ātrums 600–1500 mm/min), kas nodrošina uzkausējuma formēšanu ar pamatmateriāla zobenveida caurkausējumu, tādējādi – pārklājuma izveidošanu ar mehānisko īpašību gradientu sistēmā “pārklājums-pamatne”;
- iegūti lāzeruzkausēta pārklājuma ar zobenveida caurkausējumu ģeometrisko raksturlielumu, karbīdus veidojošo elementu daudzuma uzkausētajā slānī un cietības sakarību empīriskie modeļi atkarībā no procesa pamatparametriem, kas dod iespēju vadīt veidojamo pārklājumu kvalitātes raksturlielumus un īpašības;
- pārklājumu ģeometrisko raksturlielumu, mikrocietības izmaiņu raksturu pa normāli no virsmas uz pamatmateriālu, plaisu veidošanās izpētē, tika noteikts, ka bezplaisu pārklājumu lāzeruzkausēšana bez termiskās pēcapstrādes ir sasniedzama mikrocietības gradientu robežās 107–295 (HV/mm);
- pārklājumu, kas tika izveidoti, lietojot lāzeruzkausēšanas metodes ar zobenveida caurkausējumu un bez tā, salīdzinošo īpašību izpētes rezultātā tika noteikts, ka pārklājumu lāzeruzkausēšana zobenveida caurkausēšanas režīmā ļauj nozīmīgi samazināt mehānisko īpašību gradientu (6,8 reizes) pārklājuma un pamatmateriāla pārejas zonā, salīdzinot ar minimālā caurkausējuma lāzeruzkausēšanas procesu, saglabājot augstu tribotehnisko raksturlielumu līmeni.

Darba praktiskā nozīme

1. Lāzeruzkausētu valnīšu un pārklājumu raksturlielumu formēšanas apstākļu izpētes rezultātus var izmantot gan funkcionālo pārklājumu lāzeruzkausēšanas, gan aditīvās izgatavošanas tehnoloģiju pilnveidošanā, mašīnu elementu un instrumentu izgatavošanai un atjaunošanai.
2. Iegūtā lāzeruzkausēšanas metode ļauj izslēgt starpslāņu uzklāšanu uz pamatni nevienveidīgu tēraudu uzkausēšanā pārklājumu un 3D objektu aditīvas izgatavošanas procesos, kas sekmē mehānisko īpašību uzlabošanu pamatmateriāla virsslāņos, izstrādājumiem, kas darbojas ārējo mainīgo zīmju cikliskā noslogojumā, kā arī termocikliskuma apstākļos.
3. Dotas tehnoloģiskās rekomendācijas jaunās lāzeruzkausēšanas metodes izmantošanai spiedienapstrādes instrumentu virsmu nocietināšanai un atjaunošanai.
4. Izmantojot jauno lāzeruzkausēšanas metodi, tika atjaunotas spiedienapstrādes aprīkojuma detaļas praksē: SIA “Santroplasts” (Latvija) un “*Research Laboratory for Processing Materials*” BNTU (Baltkrievija), ko apliecina izmēģinājumu akti (1. un 2. pielikums).

Praktiskais lietojums

Izmantojot šo metodi, ir iespējams veikt plaša klāsta legēto tēraudu lāzeruzkausēšanu kvalitatīvu virsmu nocietinošo pārklājumu izveidošanai, un izmantot tos, izgatavojot un atjaunojot gan spiedienapstrādes aprīkojuma, gan mašīnu elementu izstrādājumus, kas ir ekspluatējami pie cikliskām mehāniskām slodzēm smagos darba apstākļos, lai uzlabotu detaļu darba virsmu ekspluatācijas īpašības (nogurumizturību un nodilumizturību). Turklāt tas rada iespēju izgatavot detaļas no lētiem nedeficīta tēraudiem ar turpmāko legēto tēraudu lāzeruzkausēšanu uz darba virsmām, kas ļauj ievērojami palielināt cietību un dilstamības noturību attiecībā pret pamatni, uz kuras pārklājums tiek uzklāts, un samazināt sevišķi deficīto materiālu izlietojumu.

Promocijas darba autors aizstāv

1. Lāzeruzkausēšanas metodi, kas ļauj iegūt virsmu nocietinošo pārklājumu ar mehānisko īpašību gradientu sistēmā “pārklājums-pamatne”.
2. Lāzeruzkausēšanas procesa tehnoloģisko parametru (uzkausēšanas ātrums un lāzera stara defokusēšana) ietekmes uz ātrgriezējtērauda uzkausēto valnīšu ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumiem (formas ģeometriskiem parametriem, porainību, karbīdus veidojošo elementu daudzumu uzkausētajā slānī) eksperimentālo pētījumu rezultātus, kas ļāva noteikt labāko tehnoloģisko parametru kombināciju.
3. Eksperimentālo pētījumu rezultātus tehnoloģisko parametru (uzkausēšanas ātrums, valnīšu pārklāšanas pakāpe, pulvera patēriņš) ietekmei uz ātrgriezējtērauda pārklājumu kvalitātes raksturlielumiem (biezums, caurkausējuma dziļums, karbīdus veidojošo elementu daudzums uzkausētajā slānī, cietība un berzes koeficients), kas ļāva noteikt labākos lāzeruzkausēšanas procesa režīmus.
4. Lāzeruzkausēšanas procesa tehnoloģisko parametru (uzkausēšanas ātrums, lāzera stara defokusēšana, pulvera patēriņš, atsevišķu valnīšu pārklāšanas pakāpe) ietekmes uz pārklājumu kvalitātes raksturlielumiem (ģeometriskiem parametriem, karbīdus veidojošo elementu daudzumu, cietību un berzes koeficientu) novērtējumu.

Promocijas darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem ir publicēts recenzētos zinātniskos izdevumos, kā arī ziņots un apspriests vietējās un starptautiskās konferencēs.

Ziņojumi konferences

1. Ločs, S. “Vienslāņa virsmas nocietinošo pārklājumu ar mehānisko īpašību gradientu lāzeruzkausēšanas metode”. Rīgas Tehniskās universitātes 60. starptautiskā zinātniskā konference, Transporta, mašīnzinību un aeronautikas fakultātes sekcija “Ražošanas tehnoloģija”, 2019. g., 14. oktobris, Rīga, Latvija.

2. Ločs, S. "High speed steel functionally graded coating by laser cladding". International practical conference at Šiauliai University "Towards Smart Industry in Lithuanian and Latvian Regions: Opportunities and Challenges", 18 April 2019, Šiauliai, Lithuania.
3. Ločs S. "Ātrgriezējtauda pārklājumu ar funkcionālu gradienta struktūru lāzera uzkausēšana". Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference, Transporta un mašīnzinību fakultātes sekcija "Ražošanas tehnoloģija", 2018. g., 11. oktobris, Rīga, Latvija.
4. Locs, S., Leitans, A., Tamanis, E., Drozdovs, P., Dovoreckis, J., Devoino, O. "HSS Coating with Keyholes in Penetration Produced by Laser Cladding Process". 9th International Conference "Beam Technologies & Laser Application", 17–19 September 2018, Saint-Petersburg, Russia.
5. Locs, S., Boiko, I. "Quality assessment of laser clad HSS coatings with deep penetration into base material to obtain a smooth gradient of properties in coating-substrate interface". 9th International Conference "Biosystems Engineering 2018", 9–11 May 2018, Tartu, Estonia.
6. Ločs S., Boiko I. "Lāzera uzkausēšanas režīmu ietekme ātrgriezējtauda AISI M2 pārklājumu kvalitāti un mehāniskajām īpašībām". Rīgas Tehniskās universitātes 58. starptautiskā zinātniskā konference, Transporta un mašīnzinību fakultātes sekcijas "Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve", apakšsekcija "Ražošanas tehnoloģija", 2017. g., 12. oktobris, Rīga, Latvija.
7. Locs, S., Boiko, I., Drozdovs, P., Dovoreckis, J., Devoino, O. "Investigation of Coaxial Laser Cladding Process Parameters Influence onto Single Pass Clad Geometry of Tool Steel". 8th International Conference "Biosystems Engineering 2017", 11–12 May 2017, Tartu, Estonia.
8. Ločs S., Boiko I. "Lāzera uzsmidzināšanas tehnoloģiju izpēte". Rīgas Tehniskās universitātes 57. starptautiskā zinātniskā konference, Transporta un mašīnzinību fakultātes sekcijas "Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve", apakšsekcija "Ražošanas tehnoloģija", 2016. g., 18. oktobris, Rīga, Latvija.
9. Locs, S., Boiko I. "Research of Laser Cladding of the Powder Materials for Die Repair", 25th International Baltic Conference of Engineering Materials & Tribology "BALTMATRIB 2016", 3–4 November 2016, Riga, Latvia.

Publikācijas

1. **Ločs, S.**, Leitāns, A., Tamanis, E., Drozdovs, P., Dovoreckis, J., Devoino, O. HSS Coating with Keyholes in Penetration Produced by Laser Cladding Process. Journal of Physics: Conference Series, 2018, Vol. 1109, 1.–10. lpp. ISSN 1742-6588. e-ISSN 1742-6596. Pieejams: doi:10.1088/1742-6596/1109/1/012063 (*SCOPUS*, *IOPscience*).
2. **Ločs, S.**, Boiko, I. Quality Assessment of Laser Cladded HSS Coatings with Deep Penetration into Base Material to Obtain a Smooth Gradient of Properties in Coating-Substrate Interface. Agronomy Research, 2018, Vol.16, Special Iss. 1, 1095.–1109. lpp. ISSN 1406-894X. Pieejams: doi:10.15159/AR.18.094 (*SCOPUS*).

3. **Ločs, S.**, Boiko, I., Leitāns, A., Drozdovs, P. Experimental Study of Coaxial Laser Cladding of Tool Steel. No: 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol. 16, Latvija, Jelgava, 24.–26. maijs, 2017. Jelgava: 2017, 1038.–1046. lpp. ISSN 1691-5976. Pieejams: doi:10.22616/ERDev2017.16.N219.(*SCOPUS, ISI Web of Science*).
4. Bulaha, N., **Ločs, S.** Research in Surface Roughness for Laser Cladding Coatings. No: 16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. Vol. 16, Latvija, Jelgava, 24.–26. maijs, 2017. Jelgava: 2017, 1131.–1138. lpp. (*SCOPUS, ISI Web of Science*).
5. **Ločs, S.**, Boiko, I., Drozdovs, P., Dovoreckis, J., Devoino, O. Investigation of Coaxial Laser Cladding Process Parameters Influence onto Single Pass Clad Geometry of Tool Steel. *Agronomy Research*, 2017, Vol. 15, 1.–15. lpp. ISSN 1406-894X. Pieejams: doi:10.15159/AR.17.018 (*SCOPUS*).
6. Boiko, I., **Ločs, S.**, Devoino, O., Drozdovs, P. Investigation of Coaxial Laser Cladding of Tool Steel. In: Proceedings of 10th International Symposium “Powder Metallurgy. Surface Engineering, New Composite Materials, Welding”, Belarus, Minsk, 5–7 April, 2017. Minsk: Belarusskaya Navuka, 2017, pp. 92.–101. ISBN 978-985-08-2131-7. (krievu valodā).
7. **Ločs, S.**, Boiko, I., Mironovs, V., Tamanis, E., Devoino, O. Research of Laser Cladding of the Powder Materials for Die Repair. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 721, 280.–284.lpp. ISSN 1662-9795. Pieejams: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.721.280 (*SCOPUS*).

Promocijas darba struktūra un saturs

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 14 pielikumu, 130 attēlu, 37 tabulas, kopā 175 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 163 informācijas avotu nosaukumi.

PROMOCIJAS DARBA ĪSS APRAKSTS

Ievadā ir pamatota promocijas darba aktualitāte, izvirzīts un pamatots pētījuma mērķis un definēti darba uzdevumi.

1. Literatūras apskats

Šajā nodaļā veikts literatūras apskats par metālisko pārklājumu nozīmi un lietojamiem procesiem to izveidošanai. Tika veikta lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas zinātniski tehniskā līmeņa analīze, kas ļāva iegūt informāciju par šī procesa īpatnībām, lietojamību, raksturīgām priekšrocībām un trūkumiem. Tika konstatēts, ka pastāv grūtības instrumentu tēraudu uzkausēšanā, jo lāzera starojuma iedarbība, pateicoties augsti koncentrētai enerģijai, rada stingru termisko režīmu virsslāņos – lielu uzkausēšanas un atdzesēšanas ātrumu rezultātā. Tādējādi krass termiskais gradients apvienojumā ar lielo sacietēšanas ātrumu kušanas zonā izraisa cieto un trauslo fāžu veidošanos, kā arī nosaka paliekošo spriegumu lielumu, kā rezultātā pastāv paaugstināts plaisu veidošanās risks [11], [17]–[20].

Turklāt mūsdienās eksistējošo uzkausēšanas tehnoloģiju analīze parādīja, ka virsslāņos notiek nelabvēlīgo stiepjošo spriegumu veidošanās, kas rezultātā izraisa atjaunotu detaļu nogurumizturības samazināšanos. Šāds nozīmīgs trūkums uzkausēšanas tehnoloģiju lietošanā bieži vien ir viens no apturošiem cēloņiem, jo cikliskā noslogojumā var tikt izraisīta izstrādājumu priekšlaicīga sabrukšana un iziešana no ierindas [21]–[24].

Literatūras apskata rezultātā tika noteikti pārklājumu kvalitātes raksturlielumi un īpašības, kā arī faktori, kas tos ietekmē. Aplūkojot pētniecības darbu ziņojumus, tika atzīmēts, ka vairāku darbu pamatuzdevums pārsvarā tiek virzīts uz pārklājuma un pamatmateriāla samaisīšanās pakāpes minimizēšanu, jo tiek uzskatīts, ka pārmērīga samaisīšanās ar pamatmateriālu negatīvi ietekmē pārklājuma mehāniskās īpašības. Savukārt tradicionālie monolīta pārklājumi ar minimālu pamatmateriāla caurkausējumu bieži vien nespēj izturēt ekstremālus darba apstākļus, jo tas galvenokārt ir saistīts ar kraso fizikāli mehānisko īpašību izmaiņu pārklājuma un pamatmateriāla pārejas zonā, kas rosina augsta līmeņa paliekošo spriegumu koncentrāciju robežvirsmā, kā rezultātā notiek pārklājuma sabrukšana. Sakarā ar to aktīvi tiek veikti pētījumi un notiek dažādi mēģinājumi izveidot funkcionāli gradientos pārklājumus [16], [25]. Tomēr zināmas metodes šāda veida pārklājumu izveidošanā nozīmīgi palielina tehnoloģiskā procesa darbietilpīgumu, turklāt lielākoties nenovērš pamatproblēmu – krasās īpašību pārejas izslēgšanu no pārklājuma un pamatmateriāla sasaistes zonas.

Kopumā no zinātniskās literatūras analīzes var secināt, ka lāzeruzkausēšanas process vēl nav pietiekami izpētīts, jo šī tehnoloģija pastāvīgi attīstās: rodas jauni lāzeru tipi, jauni materiāli, tiek modernizētas iekārtas. Turklāt procesa izpētes sarežģītību nosaka lielais ietekmējošo faktoru skaits, un katram no tiem ir nozīmīga loma pārklājuma īpašību izmaiņās.

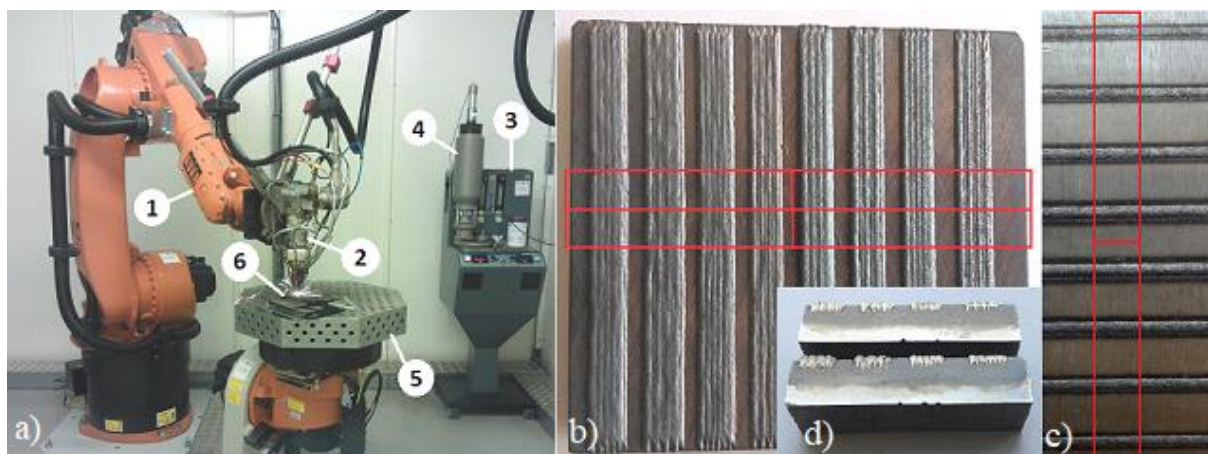
Tāpēc joprojām ir industriāla vajadzība izstrādāt piemērotāku uzkausēšanas tehnoloģiju detaļu kontakta virsmu nocietināšanai un atjaunošanai, kā arī telpisko struktūru izgatavošanai, kas ļautu izveidot kvalitatīvus pārklājumus un 3D objektus ar paaugstinātām ekspluatācijas īpašībām, saglabājot izstrādājuma darbību paredzētajā darba periodā.

2. Eksperimentālo pētījumu metodika un līdzekļi

Šajā nodaļā sniegtas ziņas par eksperimentu pētījumos izmantotajām metodēm, aprīkojumu un materiāliem. Eksperimentālie darbi tika veikti, izmantojot robotizētu lāzerapsrādes kompleksu (2.1. a att.), kas ļauj veikt pārklājumu lāzeruzkausēšanu. Visos eksperimentu pētījumos pārklājumu un atsevišķu valnīšu uzkausēšanai tika lietots sfēriskas formas ātrgriezējtērauda *AISI M2*¹ metāla pulveris ar granulometrisko sastāvu 53–150 μm.

Ātrgriezējtērauds nodrošina augstu izturību, cietību un nodilumizturību. Līdz ar lietojamību griešanas instrumentu izgatavošanā, šīs klases tērauds tiek izmantots arī štancēšanas instrumentiem, kas ir ekspluatējami īpaši smagos apstākļos – spiedienos virs 2000 MPa, karsēšanā 300–500 °C un pat augstākās temperatūrās, lielsēriju un masveida ražošanā, kad nepieciešams nodrošināt štancēšanas aprīkojuma augstu noturību [26].

Eksperimentālā uzkausēšana šajā pētījumā tika veikta uz vidēji, augstoglekļa un leģētā tērauda pamatnēm (*DIN 66Mn4*², *EN 41Cr4*³, *EN C80U*⁴, *AISI D2*⁵). Eksperimentālie paraugi tika iepriekš slīpēti, to gabarītmēri bija 100 mm × 100 mm, biezums – 10 mm.



2.1. att. Lāzeruzkausēšanas aprīkojums (a); šķērsgriezumu izvietoējumi mikropieslīpņu izgatavošanai (b); atsevišķo valnīšu sērijai (c); kodinātie (*Nital* 4 %) mikropieslīpņi.

- 1 – sešu asu industriālā robota manipulators, 2 – lāzeruzkausēšanas instruments,
3 – metāla pulvera padeves iekārta; 4 – metāla pulvera iekraušanas kamera;
5 – divu asu rotācijas pozicionieris, 6 – apstrādājamais paraugs.

¹ Molibdēna-volframa ātrgriezējtērauds, tiek norādīts pēc *AISI* apzīmējumu sistēmas (*ASTM A600-92a*) saskaņā ar materiāla kvalitātes sertifikātu. Eiropas ekvivalentas markas apzīmējums: *HS6-5-2* (*LVS EN ISO 4957:2001*).

² Leģētais konstrukciju tērauds, apzīmējums pēc kvalitātes sertifikāta: *65G* (*GOST 14959-79*). Tekstā ir norādīts Eiropas ekvivalentas markas apzīmējums *DIN* sistēmā [27].

³ Leģētais konstrukciju tērauds, apzīmējums pēc kvalitātes sertifikāta: *40H* (*GOST 4543-71*). Tekstā ir norādīts Eiropas ekvivalentas markas apzīmējums (*LVS EN 10083-3:2006*).

⁴ Neleģētais instrumentu tērauds, apzīmējums pēc kvalitātes sertifikāta: *U8* (*GOST 1439-99*). Tekstā ir norādīts Eiropas ekvivalentas markas apzīmējums (*LVS EN ISO 4957: 2001*).

⁵ Leģētais instrumentu tērauds, tiek norādīts pēc *AISI* standarta apzīmējumu sistēmas (*ASTM A681-08*). Eiropas ekvivalentas markas apzīmējums: *X153CrMoV12* (*LVS EN ISO 4957:2001*).

Promocijas darba uzdevumu izpildei liela nozīme šajā pētījumā tika pievērsta lāzeruzkausēto valnīšu un pārklājumu metalogrāfiskai izpētei, kas tika veikta uz paraugu šķērsriezumu mikropieslīpņiem (2.1. b–d att.).

Lai iegūtu pārklājumu kvalitātes raksturojumu prognozējamus rādītājus, pētījumā veikto eksperimentālo darbu pamatzdevumi bija noteikt lāzeruzkausēšanas procesa tehnoloģisko parametru ietekmes likumsakarības uz pārklājumu kvalitātes raksturlielumiem (uzkausēta valnīša un pārklājuma ģeometriskie parametri, cietība, karbīdus veidojošo elementu daudzums uzkausētajā slānī, berzes koeficients, porainība).

Šim nolūkam tehnoloģisko parametru un pārklājumu kvalitātes raksturlielumu kopsakarības rakstura izmeklēšana tika veikta, izmantojot daudzfaktoru eksperimenta plānošanas metodes un regresijas analīzi. Rezultātā tika iegūti empīriskie regresijas modeļi pārklājumu kvalitātes raksturlielumu prognozēšanai, kas izteikti pirmās pakāpes polinoma veidā [28], [29]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i, \quad (2.1.)$$

kur

$\hat{y}$ – ar regresijas modeli aprēķinātā rezultatīvā pazīme;

x_i – faktoriālā pazīme jeb procesa parametrs,

b_0, b_i – regresijas koeficienti;

i – faktisko mainīgo lielumu vērtību indekss;

n – mainīgo lielumu skaits.

Ar regresijas palīdzību izveidoto empīrisko prognozēšanas modeļu un to faktoru statistiskais nozīmīgums tika novērtēts ar dispersijas analīzes metodi ANOVA (*Analysis of Varinace*), izmantojot *Minitab* lietojumprogrammu. Šī metode ļauj novērtēt regresijas modeļa adekvātumu, veicot nulles hipotēzes pārbaudi ar Fišera F -kritērija palīdzību uzdotā nozīmības līmenī ($\alpha \leq 0,05$).

Iegūto modeļu kvalitātes novērtēšanai tika izmantots determinācijas koeficients (R^2), kas parāda, kādu daļu no kopējās rezultatīvās pazīmes izkļiedes izskaidro faktoriālo pazīmju izmaiņas. Jo koeficienta vērtība tuvāka 1 jeb 100 %, jo ciešāka ir izejas parametra saistība ar faktoriem [30]–[33]. Pieņemamiem modeļiem tiek paredzēts, ka determinācijas koeficientam jābūt ne mazākam par 50 %, šajā gadījumā korelācijas koeficienta vērtība (r_{xy}) pārsniedz 70 %.

Regresijas modeļu matemātiskās precizitātes pārbaude tika veikta, aprēķinot vidējo relatīvo aproksimācijas kļūdu pēc 2.2. formulas [34], ko dēvē arī par vidējo absolūto procentuālo kļūdu [29].

$$\bar{A}_\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100, \%, \quad (2.2.)$$

kur

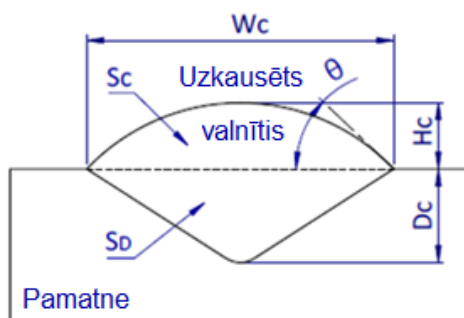
n – izlases lielums;

y_i – rezultatīvās pazīmes eksperimentālās vērtības;

$\hat{y}_i$ – rezultatīvās pazīmes aprēķinātās vērtības pēc regresijas vienādojuma.

3. Lāzeruzkausēta valnīša ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumu izpēte

Šajā nodaļā tika izanalizēta procesa parametru ietekme (uzkausēšanas ātrums – V , mm/min un lāzera stara defokusēšana – F_Z , mm) uz uzkausēta valnīša ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumiem: formas ģeometriskajiem parametriem (3.1. att.), porainību un karbīdus veidojošo elementu daudzumu uzkausētajā slānī.



3.1. att. Uzkausēta valnīša shematiskais attēlojums un formas parametru apzīmējumi:
 H_C – valnīša augstums, W_C – valnīša platums, θ – kontaktleņķis, D_C – caurkausējuma dziļums,
 S_C – valnīša laukums, S_D – caurkausējuma laukums.

Eksperimenta materiāli, iestatījumi, plānošana un novērtēšanas metodes

Eksperimentālie valnīši tika uzkausēti uz atsperes tērauda loksnēm (*DIN 66Mn4*). Lai izpētītu visu mainīgo faktoru mijiedarbības, tika izvēlēta Taguči¹ eksperimenta plānošanas metode, pēc kuras tika izveidotas eksperimentu plānošanas matricas (Taguči ortogonāli masīvi) $L_{16}(4^2)$ [35] attiecīgi diviem defokusēšanas virzieniem, proti, negatīvā F_{Z1} : (–3...0) un pozitīvā F_{Z2} : (+3...0) virzienos. Eksperimentālie faktori un variēšanas līmeņi katram defokusēšanas virzienam apkopoti 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli attiecīgi defokusēšanas virzienam

Negatīvā defokusēšana				
Faktori	Līmeņi			
V – uzkausēšanas ātrums, mm/min	1500	1200	900	600
F_{Z1} – fokusa nobīde, mm	–3	–2	–1	0
Pozitīvā defokusēšana				
Faktori	Līmeņi			
V – uzkausēšanas ātrums, mm/min	1500	1200	900	600
F_{Z2} – fokusa nobīde, mm	+3	+2	+1	0

Pārējie tehnoloģiskie parametri lāzeruzkausēšanas procesā tika fiksēti kā pastāvīgi lielumi: lāzera starojuma jauda 1000 W, aizsarggāzes (Ar) patēriņš 15–16 L/min, pulvera nesējgāzes

¹ Taguči (*Genichi Taguchi*) eksperimenta plānošanas statistiskā metode.

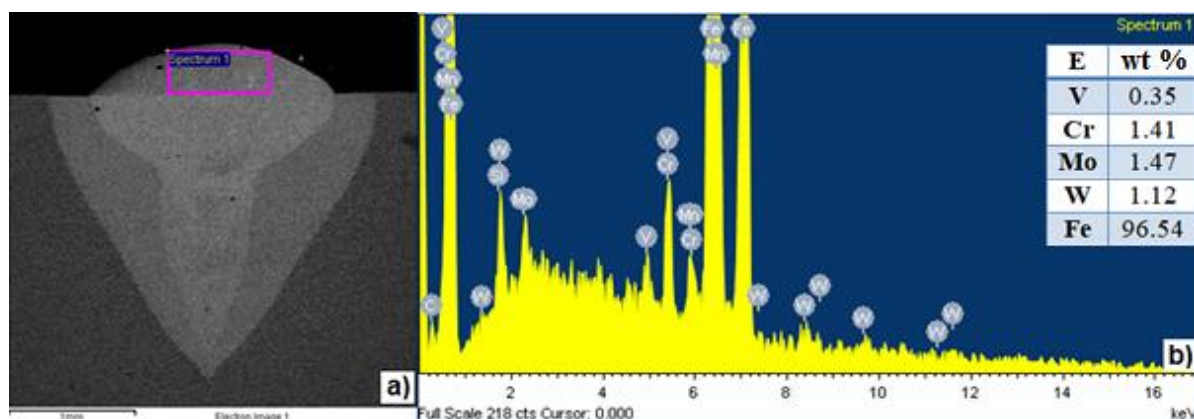
(Ar) patēriņš 5 L/min, pulvera patēriņš 7 g/min, sprauslas distance 8 mm, pamatmateriālu priekšsildīšanas temperatūra 100 °C.

Pētījuma gaitā tika izskatītas lāzeruzkausētu atsevišķu valnīšu kvalitātes raksturlielumu sakarības ar procesa tehnoloģiskiem parametriem, kas tiek apkopots diagrammās. Turklāt regresijas analīzes rezultātā tika izveidoti empīriskie modeļi, ko raksturo šāda atbildes funkcija:

$$Y_i = f(F_z, V), \quad (3.1.)$$

kur par rezultatīvām pazīmēm jeb optimizācijas parametriem Y_i tika pieņemti šādi kritēriji: H_C – uzkausēta valnīša augstums, mm; W_C – uzkausēta valnīša platums, mm; D_C – caurkausējuma dziļums, mm; θ – kontaktleņķis, °; P_C – porainība, %; E_C – karbīdus veidojošo legējošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzums uzkausētajā slānī, masas %.

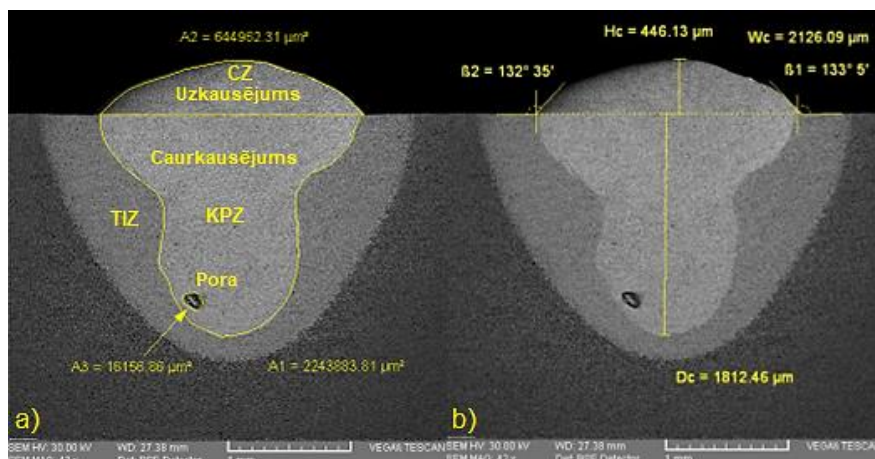
Porainības lielums tika izteikts procentuāli, aprēķinot porainības relatīvo laukumu šķērsgrīzumā, t. i., poru laukumu attiecību pret kopējo valnīša laukumu. Legējošo elementu daudzums tika noteikts ar EDS analīzi katram valnītim, ar programmatūras palīdzību uzkausētajā slānī iezīmējot analizējamās zonas apgabalu (3.2. att.).



3.2. att. Uzkausēta valnīša EDS analīze: uzkausēta valnīša šķērsgrīzuma SEM attēls (a); iezīmētajā apgabalā identificēto ķīmisko elementu raksturīgā rentgenstarojuma spektri (b).

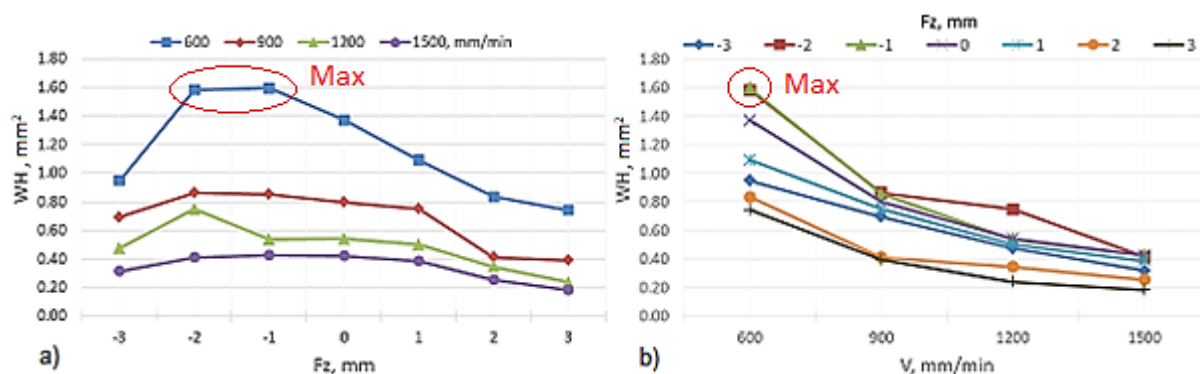
Eksperimenta pamatrezultāti un secinājumi

Uzkausētā valnīša šķērsgrīzumā ir atzīmētas šādas raksturīgās zonas (3.3. a att.): uzkausējums, kas ir apgabals virs pamatnes virsmas (CZ), caurkausējuma zona ar zobenveida (*keyhole* – angl. val.) caurkausējumu (KPZ) un termiskās ietekmes zona (TIZ). Valnīšu šķērsgrīzumu apskatē tika ievērots, ka daži valnīši satur gāzu poru ieslēgumus, kas izvietoti nejaušā kārtībā, bet lielākoties gar valnīša centrālo asi. Lāzermetināšanā šo parādību saista ar augstu lāzera stara jaudas blīvumu fokālajā plankumā, jo, iedarbojoties uz materiālu šādā režīmā, izkausētā metāla daļa kausējuma vannā pāriet tvaika stāvoklī, kas sekmē gāzes burbuļu veidošanos. Tādējādi kausējuma vannas ātras sacietēšanas dēļ poras paliek ieslēgtas zemvirsmas slānī [36]–[39]. Nomērītie poru diametri variē diapazonā 50–300 μm. Mērāmie formas ģeometriskie parametri ir redzami 3.3. b attēlā.



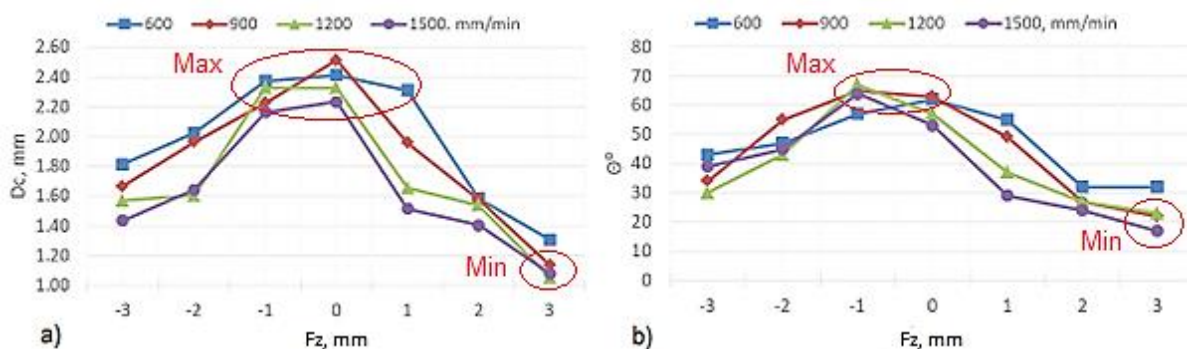
3.3. att. Uzkausēto valnīšu SEM makroattēli:
šķērsriezuma zonu apzīmējumi un to laukumu mērījumi (a);
ģeometrijas mērījumi (b).

Uzkausētā materiāla daudzumu virs pamatnes raksturo formas parametrs WH , ko iegūst, savstarpēji reizinot valnīša augstuma un platuma parametrus ($WH = W_C \cdot H_C$). Rezultātā maksimālais lielums ($1,6 \text{ mm}^2$) atbilst mazākai ātruma vērtībai (600 mm/min) un defokusēšanas distancei intervālā $-2 \dots -1 \text{ mm}$ (3.4. a att.). Kopumā lielākā ietekme uz šo raksturlielumu ir uzkausēšanas ātrumam, demonstrējot ļoti līdzīgu datu samazināšanas tendenci atbilstoši ātruma pieaugumam (3.4. b att.).



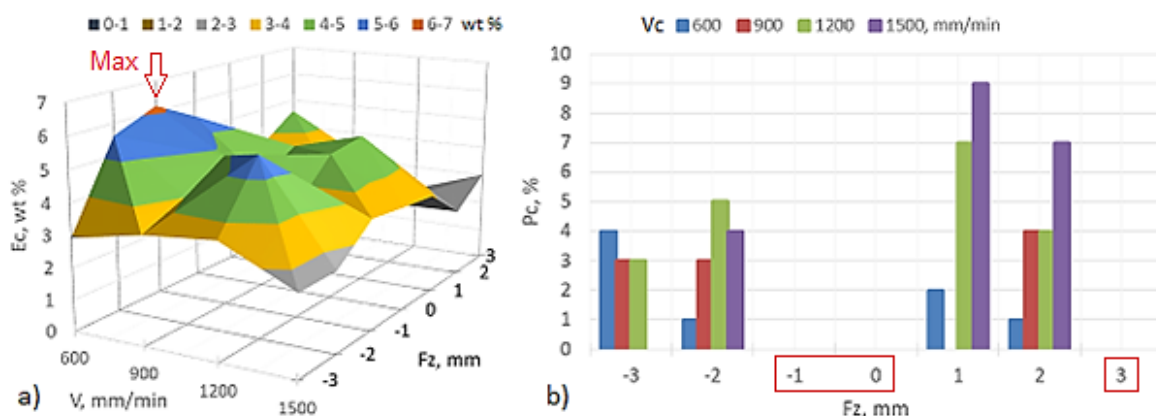
3.4. att. Formas parametra WH izmaiņas: atkarībā no lāzera stara fokusa nobīdes (a);
atkarībā no uzkausēšanas ātruma (b).

Attiecībā uz caurkausējuma dziļuma un valnīša kontaktleņķa lielumiem lielākā ietekme ir lāzera stara defokusēšanas parametram (3.5. a att.). Mazākais caurkausējuma dziļums ir ap 1 mm , kas tika sasniegts pie lielākās defokusēšanas distances ($+3 \text{ mm}$) un lielāku uzkausēšanas ātrumu režīmos ($900\text{--}1500 \text{ mm/min}$). Savukārt lielākais caurkausējuma dziļums ($2,3\text{--}2,5 \text{ mm}$) atbilst fokusa izvietojumam tuvāk apstrādājamai virsmai ($-1 \dots +1 \text{ mm}$) un ir jo dziļāks, jo mazāks ir uzkausēšanas ātruma lielums. Visu uzkausēto valnīšu kontaktleņķa vērtības ir intervālā $17\text{--}67^\circ$, kas apmierina uzkausējuma formveidošanas nosacījumu ($\theta < 90^\circ$). Mazākās kontaktleņķa vērtības atbilst lielākai defokusēšanas distancei ($+3 \text{ mm}$) un augstāko ātrumu režīmiem ($900\text{--}1500 \text{ mm/min}$), savukārt lielākās vērtības lielākoties koncentrējas pie fokusa pozīcijām: $-1 \dots 0 \text{ mm}$ (3.4. b att.).



3.5. att. Caurkausējuma dziļuma D_c (a) un kontaktleņķa θ (b) izmaiņas atkarībā no fokusa nobīdes.

Maksimālais karbīdus veidojošo elementu (Cr, W, Mo, V) daudzums (6,2 masas %) atbilst defokusēšanas distancei -1 mm un zemākam uzkausēšanas ātrumam (600 mm/min) (3.6. a att.). Porainības lieluma izmaiņai atkarībā no procesa parametriem lielākoties ir stohastisks raksturs, tomēr lielākā poru koncentrācija (9 %) atbilst augstākās uzkausēšanas ātruma (1500 mm/min) un $+1$ mm defokusēšanas distances parametru kombinācijai, attiecīgi visu novēroto uzkausēšanas valnīšu vidējā poru koncentrācija sastāda 2 %. Savukārt, uzkausējot ar lāzera stara fokusa izvietojumu: -1 ; 0 un $+3$ mm, valnīši ir praktiski bez porām (3.6. b att.).



3.6. att. Kvalitātes raksturlielumu izmaiņu raksturi atkarībā no procesa parametriem: karbīdus veidojošo elementu (Cr, W, Mo, V) daudzumam (a); porainībai (b).

Regresijas analīzes rezultātā tika atklātas statistiski nozīmīgas lineāras kopsakarības starp procesa tehnoloģiskiem parametriem (F_z – defokusēšanas distance un V – uzkausēšanas ātrums) un valnīšu formas ģeometriskiem parametriem (H_c – valnīša augstums; W_c – platums; D_c – caurkausējuma dziļums; θ – kontaktleņķis) abos lāzera stara defokusēšanas virzienos ar vienu izņēmumu uzkausēšanas ātruma ietekmei kontaktleņķa parametram negatīvas defokusēšanas gadījumā. Rezultātā tika iegūti uzkausēto valnīšu ģeometrisku parametru lineārie regresijas modeļi ar vidējo absolūto procentuālo kļūdu ($\bar{A}_e$) diapazonā 4–13 %. Karbīdus veidojošo elementu daudzumam tika noteikta nozīmīga lineāra sakarība ar procesa parametriem ar izņēmumu fokusa nobīdes parametram negatīvā defokusēšanas virzienā, savukārt izveidotu regresijas modeļu $\bar{A}_e$ ir 16–17 %.

4. Lāzeruzkausēto pārklājumu ar zobenveida caurkausējumiem kvalitātes raksturlielumu un īpašību izpēte

Šajā nodaļā tika izskatīts pārklājumu ar zobenveida caurkausējumu formēšanas process atkarībā no lāzeruzkausēšanas procesa pamatparametriem (pārklāšanas pakāpe – OR , %; uzkausēšanas ātrums – V , mm/min; metāla pulvera patēriņš – F_P , g/min).

Eksperimenta materiāli, iestatījumi un plānošana

Ātrgriezējtērauda pārklājumi tika uzkausēti uz tēraudu $41Cr4$ un $C80U$ pamatnēm. Eksperimentālais darbs tika veikts saskaņā ar pilnā faktoreksperimenta (PFE) plānu 2^3 , kas ļauj novērtēt visus lineāros efektus. Eksperimentālo faktoru līmeņi un variācijas intervāli uzrādīti 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli

Faktori, mērvienības	Apzīmējums	Faktoru līmeņi		
		Augšējais (+1)	Nominālais (0)	Apakšējais (-1)
Pārklāšanas pakāpe, %	OR	50	40	30
Uzkausēšanas ātrums, mm/min	V	1500	1200	900
Pulvera patēriņš, g/min	F_P	10	7,5	5

Pārējie procesa tehnoloģiskie parametri eksperimentālā darbā bija nemainīgie lielumi katra pārklājuma izveidošanai (līdzīgi kā pirmajā eksperimentā) ar izņēmumu šādos parametros – lāzera stara defokusēšana (–1 mm); pamatmateriālu priekšsildīšanas temperatūra (250 °C).

Pamatojoties uz eksperimenta datiem, tika veikta regresijas analīze un izveidoti empīriskie prognozēšanas modeļi, ko raksturo atbildes funkcija:

$$Y_i = f(OR, V, F_P), \quad (4.1.)$$

kur kā rezultatīvās pazīmes Y_i tika ņemti šādi raksturlielumi: H_E – uzkausēta slāņa efektīvais biezums, mm; D_P – caurkausējuma dziļums, mm; E_P – karbīdus veidojošo elementu daudzums (Cr, Mo, W, V) uzkausējumā, masas %.

Tika izanalizēta arī termiskās pēcapstrādes (600 °C, 2 h) ietekme uz pārklājumu mehāniskām īpašībām.

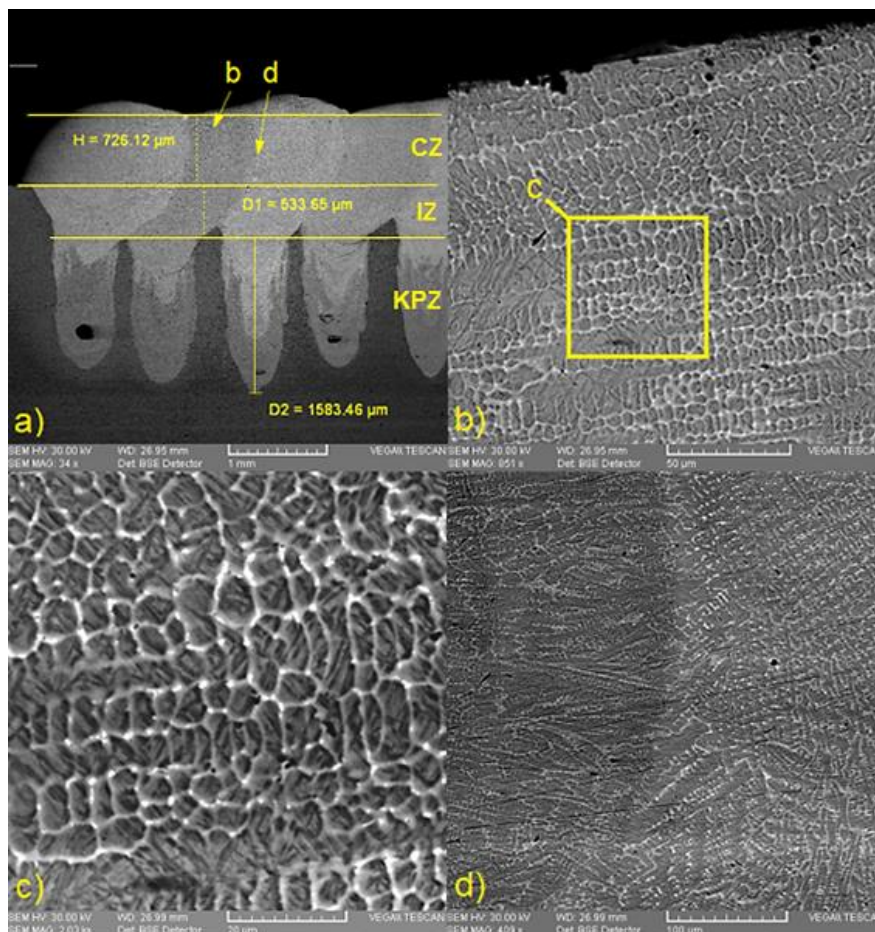
Eksperimenta pamatrezultāti un secinājumi

4.1. a attēlā redzams viens no pārklājuma šķērsgriezumiem. Pārklājuma sistēma nosacīti tiek iedalīta trijās zonās: uzkausētais slānis jeb uzkausējuma zona (CZ), sakausējuma jeb sasaistes zona (IZ) un zobenveida caurkausējuma zona (KPZ).

Pārklājuma mikrostrukturai piemīt jaukta sastāva graudu uzbūve: ir saskatāmi šūnu un dendrītu graudu veidojumi, galvenokārt – ar martensīta matricu un austenīta-karbīdu eitektikas tīklu uz graudu robežām (4.1. c att.). Apgabalus augšējās virsmas tuvumā pārsvarā veido šūnu kristāli. Valnīša centrālajā zonā lielākoties ietilpst vienādasu dendrītu kristāli, blakus sakausēšanas zonai ar pamatni un iepriekš uzkausētiem valnīšiem – pirmās un otras

pakāpes stabiņveida dendrīti (4.1. d att.). Smalkākā graudainība atbilst pārklājumiem, kas tika iegūti režīmos ar lielāku uzkausēšanas ātrumu un mazāku pārklāšanas pakāpi.

Dažu pārklājumu šķērsgriezumos tika novērotas poras un plaisas. Atsevišķas plaisas tika konstatētas pārklājumos, kas tika uzkausēti režīmos ar lielāku pulvera patēriņu (10 g/min), galvenokārt – kombinācijā ar tērauda *C80U* pamatmateriālu. Turklāt termiskās pēcapstrādes lietojums šāda tipa defektu novēršanā ir mazefektīvs. Pārklājumiem, kas tika uzkausēti, izmantojot režīmus ar mazāku pulvera patēriņu (5 g/min), plaisas netika saskatītas. Poras visvairāk izvietojās zobenveida caurkausējumu pīķu tuvumā.



4.1. att. Pārklājuma šķērsgriezuma morfoloģija (pamatne – tērauds *41Cr4*, piektais režīms): CZ – uzkausējuma zona, IZ – starpvirsmas zona; KPZ – zobenveida caurkausējumu zona.

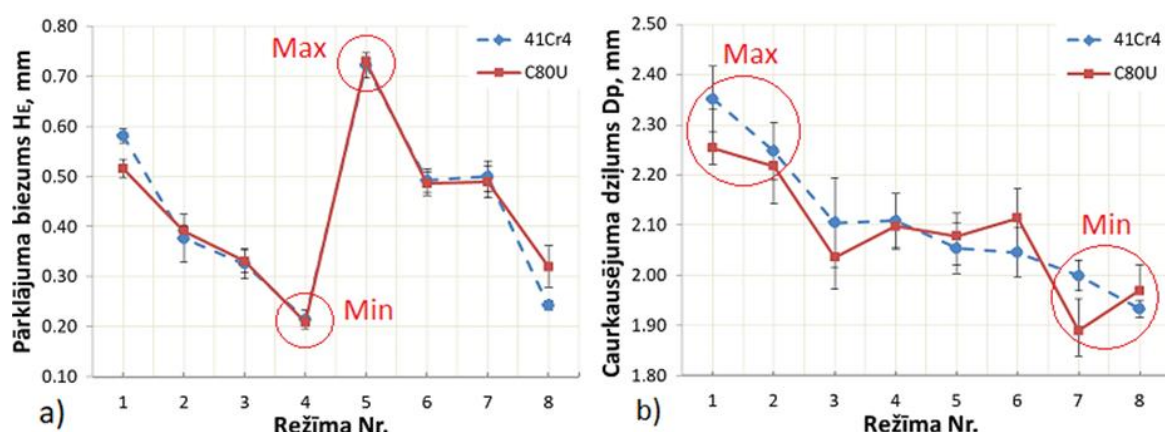
Uzkausēto pārklājumu efektīvā biezuma vidējās vērtības atbilstoši tehnoloģisko parametru kombinācijām variē intervālā 0,21–0,73 mm un, kā var redzēt 4.2. a attēlā, pārklājumu biezumam abu pamatņu tērauda marku gadījumos ir praktiski identiski izmaiņu raksturi. Pārklājuma biezums samazinās, palielinot uzkausēšanas ātrumu un atstarpi starp blakus uzkausētiem valnīšiem. Līdz ar to ir saskatāma diezgan līdzīga datu samazināšanās tendence attiecībā uz pulvera patēriņu. Maksimālais pārklājuma biezums atbilst eksperimenta plāna piektajam režīmam ($OR = 50 \%$, $V = 900 \text{ mm/min}$; $F_p = 10 \text{ g/min}$).

Pārklājumu biezuma un tehnoloģisko parametru kopsakarības apraksta šādi regresijas modeļi (4.2. tab.).

4.2. tabula

Pārklājuma biezuma regresijas modeļi

Tērauds	Regresijas vienādojumi	R^2	$\bar{A}_\varepsilon$
41Cr4	$H_{E1} = 0,3031 + 0,01003 OR - 0,00037 V + 0,02285 F_P$	0,97	8 %
C80U	$H_{E2} = 0,2741 + 0,00823 OR - 0,00032 V + 0,02884 F_P$	0,97	5 %



4.2. att. Pārklājumu formas parametru izmaiņas atkarībā no procesa režīmiem: pārklājumu biezums (a); caurkausējuma dziļums (b).

Izveidoto pārklājumu pilnā caurkausējuma dziļuma ($D_p = D_1 + D_2$) vidējās vērtības ir diapazonā 1,9–2,4 mm. Lielākās caurkausējuma dziļuma vērtības atbilst pirmajiem diviem režīmiem, respektīvi, minimālais dziļums atbilst pēdējiem diviem režīmiem (4.2. b att.), kas galvenokārt nosaka uzkausēšanas ātruma un pulvera patēriņa izmaiņas.

Pēc 4.3. tabulā norādītajiem regresijas modeļiem var redzēt parametru ietekmes raksturu attiecībā uz abām izmantojamām tērauda markām.

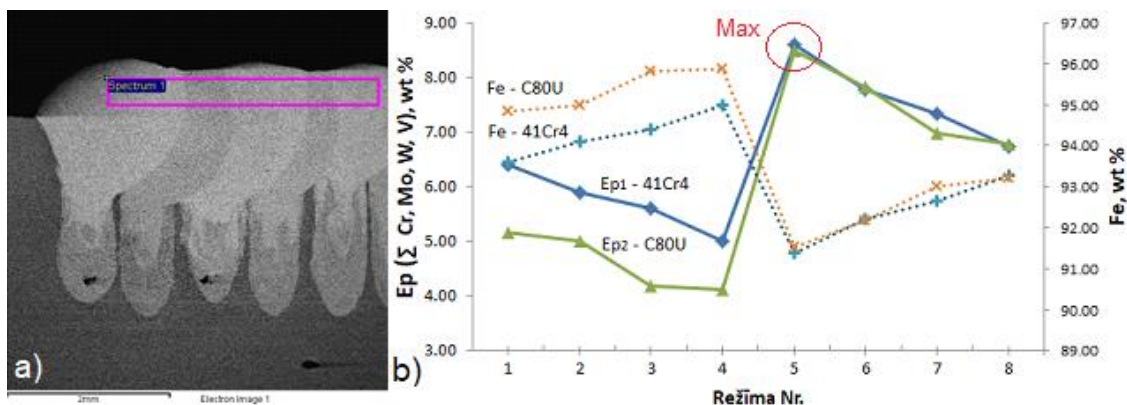
4.3. tabula

Pārklājuma caurkausējuma dziļuma regresijas modeļi

Tērauds	Regresijas vienādojumi	R^2	$\bar{A}_\varepsilon$
41Cr4	$D_{p1} = 2,586 + 0,00219 OR - 0,000230 V - 0,03895 F_P$	0,92	1 %
C80U	$D_{p2} = 2,696 - 0,00178 OR - 0,000279 V - 0,02758 F_P$	0,96	1 %

EDS analīzē tika novērtētas karbīdus veidojošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzuma izmaiņas pārklājumos atkarībā no procesa parametru kombinācijām. Rezultātā tika noteikts, ka, veidojot pārklājumus zobenveida caurkausēšanas režīmā, leģējošo elementu daudzums uzkausētajā slānī samazinās par 47–75 %, salīdzinot ar šo elementu daudzumu metāliskā pulverī (16,3 masas %).

4.3. b attēlā redzamajā diagrammā tiek demonstrēts karbīdus veidojošo elementu daudzuma izmaiņas raksturs atkarībā no procesa režīmiem. Kā redzams, līdz ar pulvera patēriņa palielināšanu nozīmīgi palielinās karbīdus veidojošo elementu daudzums. Lielākais elementu daudzums (8,5–8,6 masas %) atbilst eksperimenta plāna matricas piektajam režīmam.



4.3. att. Iezīmēts apgabals pārklājuma šķērs griezumā EDS analīzei (a); elementu daudzuma izmaiņas raksturs atkarībā no procesa režīmiem (b).

Salīdzinot šo diagrammu ar pārklājuma biezuma izmaiņas raksturlīkņiem, tiek novēroti ļoti līdzīgie izmaiņu raksturi: abās pulvera patēriņa grupās (5 g/min un 10 g/min) leģējošo elementu daudzums samazinās, palielinoties gan uzkausēšanas ātrumam, gan atstarpei starp blakus uzkausētiem valnīšiem.

4.4. tabulā tiek sniegti regresijas modeļi, kur pēc koeficientu zīmēm var redzēt, ka, palielinot pulvera patēriņu un valnīšu pārklāšanas pakāpi, karbīdus veidojošo elementu daudzums pārklājumā palielinās. Līdzīgi kā atsevišķo valnīšu uzkausēšanas gadījumā: palielinot uzkausēšanas ātrumu, leģējošo elementu daudzums uzkausējumā samazinās.

4.4. tabula

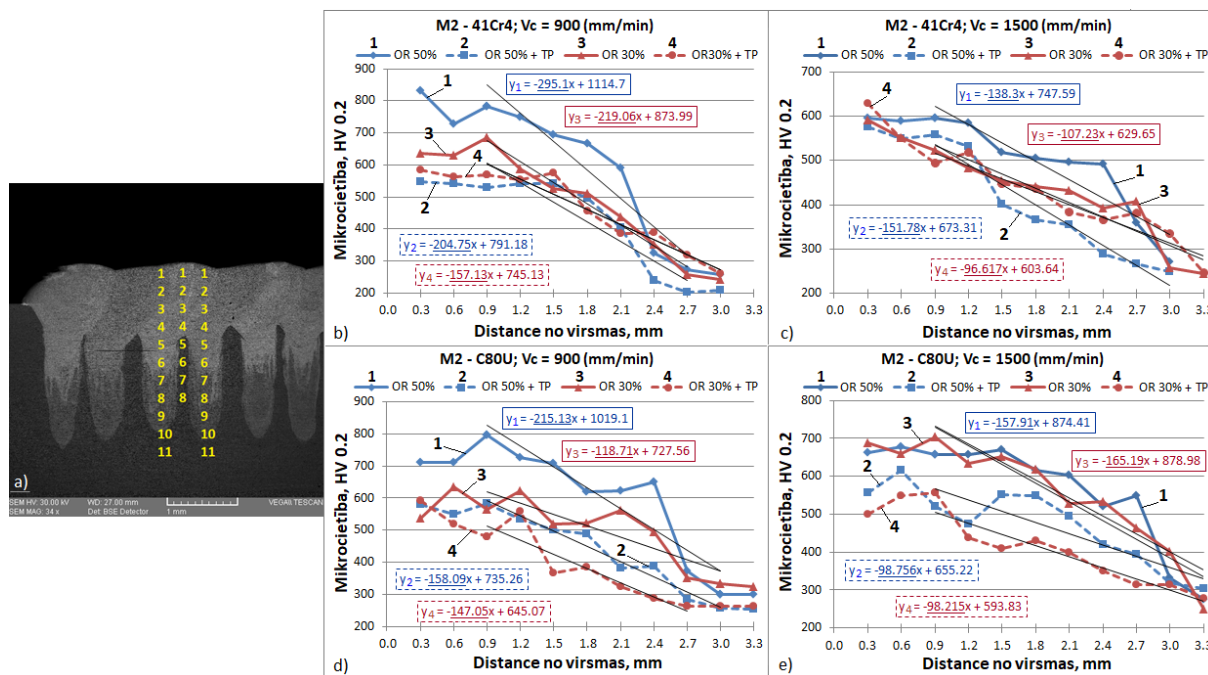
Pārklājuma karbīdus veidojošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzuma regresijas modeļi

Tērauds	Regresijas vienādojumi	R^2	$\bar{A}_\varepsilon$
41Cr4	$E_{P1} = 4,569 + 0,0318OR - 0,0017V + 0,3778F_P$	0,99	1 %
C80U	$E_{P2} = 3,392 + 0,0132OR - 0,0018V + 0,5799F_P$	0,99	2 %

Ir zināms, ka daudziem materiāliem starp cietību un izturības rādītājiem pastāv kopsakarība [40], [41], tādējādi cietības lieluma izmaiņas pārklājuma šķērs griezumā netiešā veidā atspoguļo materiāla mehānisko īpašību izmaiņu raksturu. Šim mērķim tika veikta mikrociētības izmaiņu analīze bezplaisu pārklājumu grupai, izpildot mērījumus virzienā pa normāli no pārklājuma virsmas uz pamatni (4.4. a att.).

Pārklājumu virsslāņa mikrociētība variē diapazonā 830–500 HV 0,2. Tādējādi atkarībā no procesa režīmiem pārklātas virsmas mikrociētības pieaugums ir no 72 % līdz 246 %, salīdzinot ar neapstrādāta pamatmateriāla mikrociētību (tērauds 41Cr4 – 240 HV 0,2, tērauds C80U – 290 HV 0,2). Pamatā augstākās mikrociētības vērtības atbilst pārklājumiem ar lielāku pārklāšanas attiecību (50 %) un zemāku ātrumu (900 mm/min) neatkarīgi no pamatņu tēraudu markas (4.4. b–d att.). Šis rezultāts labi saskan ar karbīdus veidojošo elementu daudzuma rezultātiem, t. i., pārklājumiem ar lielāko leģējošo elementu daudzumu lielākoties ir augstākā cietība.

Izveidotās diagrammas tiek grupētas pēc uzkausēšanas ātruma vērtībām un ietver mikrociētības raksturlīknes (profilus) pārklājumiem, kas tika uzkausēti uz abu tērauda marku pamatnēm (41Cr4 – 4.4. b, c att., C80U – 4.4. d, e. att.). Attēlotie profili ir iedalīti pēc pārklāšanās pakāpes lieluma ($OR = 50\%$ un $OR = 30\%$), turklāt nepārtrauktās līknes attiecas uz pārklājumiem bez termiskās pēcapstrādes (atlaidināšanas), attiecīgi pārtrauktās līknes – uz atlaidinātiem pārklājumiem (TP).



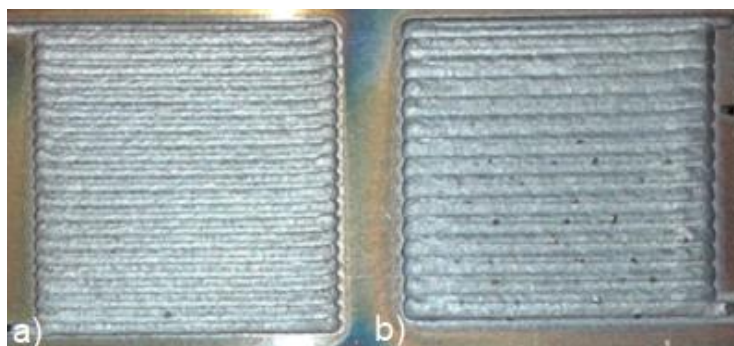
4.4. att. Mikrociētības izmaiņas raksturi sistēmā “pārklājums-pamatne”: mērījumu īstenošanas shematiskais attēlojums (a); attiecīgo režīmu mikrociētības profili dažādās pārklājuma (AISI M2) un pamatmateriāla (41Cr4 un C80U) kombinācijās (b–e).

Termiskā pēcapstrāde pārsvarā rada nozīmīgu mikrociētības samazināšanos (otrie un ceturtie profili), tomēr šīs raksturlīknes rāda lēzenāku mikrociētības pāreju virzienā uz pamatni. Turklāt tika noteikts, ka mikrociētības profili, kas atbilst pārklājumiem ar mazāko pārklāšanās pakāpi: 30 % (trešie profili), lielākoties demonstrē līdzīgu raksturu TP profiliem.

Izveidoto pārklājumu mikrociētības gradienta atspoguļošanai tika izveidoti trenda līnijas ar regresijas vienādojumiem, kur taisņu virziena koeficienti atspoguļo mikrociētības izmaiņas intensitāti pārklājuma un pamatnes pārejas zonā. Vadoties pēc vienādojumu koeficientiem, mikrociētības gradientu lielumi pārklājumiem bez termiskās pēcapstrādes ir diapazonā 107–295 (HV/mm), savukārt pārklājumiem ar termisko pēcapstrādi šis raksturlielums vairumā gadījumu ir mazāks: 97–205 (HV/mm). Izpētes rezultātā tika noteikti režīmi, kuros ir sasniedzams mazākais mikrociētības gradients sistēmā “pārklājums-pamatne” bez termiskās pēcapstrādes. Tādējādi piedāvātās lāzeruzkausēšanas metodes realizācija režīmos, kas nodrošina mazāko gradientu, pirmkārt, ļaus saīsināt ražošanas tehnoloģisko ciklu, izslēdzot termiskās apstrādes nepieciešamību un, otrkārt, samazināt pārklājumu plaisāšanas risku.

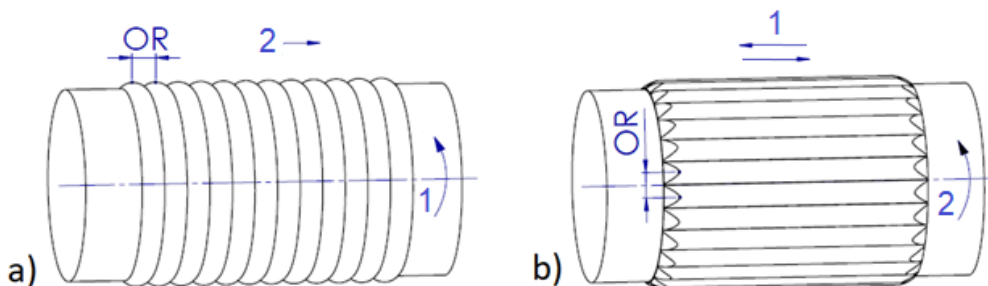
5. Lāzeruzkausēto pārklājumu anizotropiskās struktūras ietekmes izpēte uz virsmas īpašībām pēc mehāniskās apstrādes

Ņemot vērā pārklājumu uznešanas diskretumu, tiem piemīt struktūras nevienmērīgums uzkausēšanas šķērsvirzienā. Rezultātā pārklājumu anizotropiskā uzbūve var ietekmēt virsmas funkcionālo īpašību raksturu. Līdz ar to uzkausētai virsmai piemīt ievērojama viļņainība un virsmas raupjums (5.1. att.), tāpēc nepieciešamās virsmas kvalitātes nodrošināšanai pārsvarā visiem lāzeruzkausēšanas pārklājumiem jāveic noslēdzošā mehāniskā apstrāde – bieži vien slīpēšana. Savukārt tradicionālā slīpēšanā ar abrazīvām ripām pārklājuma viļņainas tekstūras dēļ var mainīties instrumenta un detaļas piespiešanas spēks, un nevēlamo vibrāciju rezultātā uz apstrādājamās virsmas var veidoties vibrāciju pēdas, virsmas piedegumi, mikroplaisas, kā arī nevēlamie stiepjošie spriegumi, kas var atstāt negatīvu ietekmi uz gludapstrādāto pārklājumu virsmas īpašībām [42], [43].



5.1. att. Atšķirīgos režīmos lāzeruzkausēti pārklājumi:
uzkausēšanas ātrumu vērtības: 1200 mm/min (a); 600 mm/min (b).

Tāpēc šajā nodaļā analizēta procesa režīmu ietekme uz pārklājumu īpašībām, lietojot dažādas apstrādes stratēģijas, kas iekļauj uzkausēšanas un slīpēšanas procesu virzienu atšķirīgas savstarpējas orientācijas. Šādi apstākļi var rasties, uzkausējot pārklājumus uz izstrādājumu cilindriskām virsmām, gar ķermeņa rotācijas virzienu (5.2. a att.) vai uzkausējot pārklājumu aksiālā virzienā (5.2. b att.). Savukārt virsmas slīpēšanu pēc lāzeruzkausēšanas veic ķermeņa rotācijas virzienā.



5.2. att. Rotācijas virsmu lāzeruzkausēšanas paņēmieni shematisks attēls:
lāzeruzkausēšana pa aploci (a); lāzeruzkausēšana aksiālā virzienā (b);

1 – uzkausēšanas virziens; 2 – valnīšu pārklāšanas virziens; OR – valnīšu pārklāšanas pakāpe.

Eksperimenta materiāli, iestatījumi un plānošana

Eksperimenta gaitā tika lāzeruzkausētas divas pārklājumu grupas uz atspertērauda (DIN 66Mn4) loksnēm saskaņā ar eksperimenta plānu atbilstoši procesa parametru kombinācijām. Nākamajā solī pirmā pārklājumu grupa tika plakanslīpēta gar uzkausēto valnīšu virzienā, otrās grupas pārklājumi tika plakanslīpēti šķērsām uzkausēto valnīšu virzienam.

Eksperimentālie ātrgriezējētaurauda pārklājumi tika izveidoti saskaņā ar PFE plānu 2³, variējot tādas faktoriālus mainīgos, kā: pārklāšanas pakāpe – OR , %; uzkausēšanas ātrums – V , mm/min un defokusēšanas virziens – F_z , mm. Faktoru līmeņi un variācijas intervāli norādīti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli

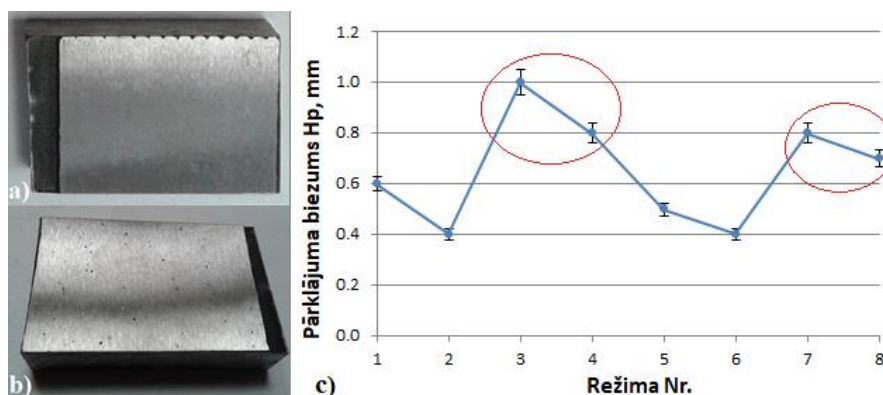
Faktori, mērvienības	Apzīmējums	Faktoru līmeņi		
		Augšējais (+1)	Nominālais (0)	Apakšējais (-1)
Pārklāšanas pakāpe, %	OR	50	43	35
Uzkausēšanas ātrums, mm/min	V	1200	900	600
Defokusēšanas virziens, mm	F_z	+2	0	-2

Pārklājumu kvalitātes novērtēšanai tika izvēlētas šādas rezultatīvās pazīmes (Y_i): H_p – pārklājuma biezums, mm; C_p – pārklājuma slīpētas virsmas cietība, HRC ; μ – pārklājuma slīpētas virsmas slīdes berzes koeficients. Likumsakarību izpētē tika izmantota regresijas analīze, kas ļauj izveidot kopsakarību empīriskos modeļus, kas tiek raksturoti ar atbildes funkciju:

$$Y_i = f(OR, V, F_z). \quad (5.1.)$$

Eksperimenta pamatrezultāti un secinājumi

Noslīpēto virsmu vizuālās apskates laikā tika konstatēts, ka lielākajai paraugu daļai atbilst kvalitatīva virsma – bez acīmredzamiem defektiem (5.3. a att.), savukārt dažu pārklājumu virsmas bija ar porām (5.3. b att.).



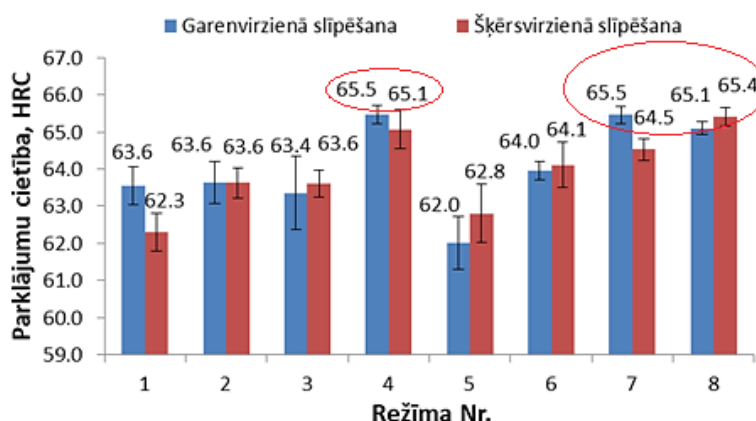
5.3. att. Pārklājumu virsmas pēc slīpēšanas (a – bez defektiem, b – ar porām); pārklājumu biezuma izmaiņa atkarībā no procesa režīmiem (c).

Uzkausētais slāņa biezums variē diapazonā no 0,4 mm līdz 1 mm. Diagrammā (5.3. c att.), ir redzams, ka augstākie pārklājumu biezuma lielumi (0,7–1 mm) piemīt trešajam, ceturtajam, septītajam un astotajam režīmiem, kurus apvieno zemākā ātruma vērtība (600 mm/min).

Regresijas analīzes rezultātā tika iegūts lāzeruzkausēšanas procesa empīriskais modelis (5.2. vienād.), kas raksturo pārklājuma biezuma lineāro sakarību ar procesa tehnoloģiskajiem parametriem. Šis vienādojums parāda, ka pārklājuma biezums palielinās, palielinoties pārklāšanas pakāpei, un samazinās, pieaugot uzkausēšanas ātrumam un defokusēšanas distancei. Determinācijas koeficienta vērtība $R^2 = 0,97$ un vidējā absolūtā procentuālā kļūda $\bar{A}_\varepsilon < 5 \%$ norāda uz augstu regresijas modeļa kvalitāti un matemātisko precizitāti.

$$H_P = 0,75 + 0,01 OR - 0,000583 V - 0,025 F_Z \quad (5.2.)$$

Diagramma (5.4. att.) reprezentē cietības datu (HRC) izmaiņas abām slīpēšanas virzienu grupām atbilstoši uzkausēšanas režīmu sakārtojumam. Kā redzams, augstākā cietība (virs 65 HRC) atbilst ceturtajam, septītajam un astotajam režīmiem. Savukārt vērtību izkliede starp slīpēšanas virzieniem ir nenožīmīga – to starpība lielākoties svārstās 1 HRC robežās. Tādējādi tika noskaidrots, ka slīpēšanas virziens būtiski neiespāido pārklājumu cietības vērtību izmaiņas.



5.4. att. Pārklājumu slīpēto virsmu cietības izmaiņas atkarībā no procesa režīmiem.

Regresijas modeļi (5.2. tab.) raksturo pārklājumu cietības sakarību ar procesa parametriem atbilstoši dažādu virzienu slīpēšanai. Šādi var redzēt, ka virsmas cietība samazinās, palielinot pārklāšanas pakāpi un uzkausēšanas ātrumu, un defokusēšanas distances palielināšana rosina virsmas cietības palielināšanos.

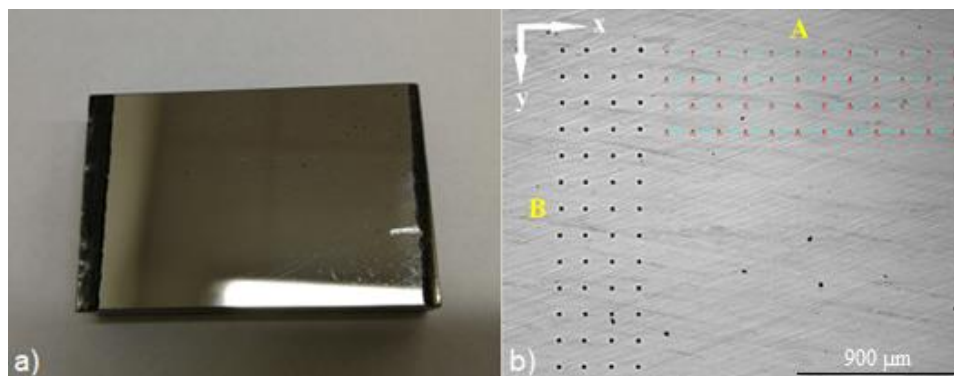
5.2. tabula

Pārklājuma cietības (HRC) regresijas modeļi

Slīpēšanas virziens	Regresijas vienādojumi	R^2	$\bar{A}_\varepsilon$
Garenvirzienā	$C_{P(G)} = 69,05 - 0,0625 OR - 0,00258 V + 0,027 F_Z$	0,65	1 %
Šķērsvirzienā	$C_{P(S)} = 69,64 - 0,0833 OR - 0,00241 V + 0,141 F_Z$	0,99	1 %

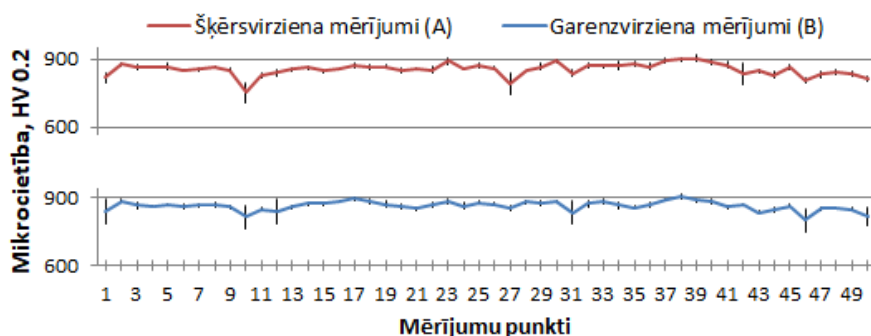
Dispersijas analīze parādīja, ka attiecīgi iegūtajiem lineārās regresijas modeļiem augsts statistiskais nozīmīgums ir saskatāms tikai šķēsvirziena slīpēšanas gadījumā. Savukārt vidējā absolūtā procentuālā kļūda abiem izveidotajiem modeļiem nepārsniedz 1 %.

Otrajā etapā, lai novērtētu pārklājuma anizotropiskās struktūras ietekmi uz mehānisko īpašību izmaiņu raksturu, tika veikta mikrociētības izmaiņas analīze uz pēcapstrādātas pārklājuma virsmas divos starpperpendikulāros virzienos. 5.5. attēlā parādīts viens no paraugiem, kura virsma tika smalkslīpēta un pulēta līdz spoguļgludam virsmas stāvoklim ($Sa = 0,015 \mu\text{m}$).



5.5. att. Testējamais paraugs ar pulētu virsmu (a); mērījumu punktu masīvu izvietojumi (b): A – šķēsvirzienā attiecībā pret uzkausētu valnīšu orientāciju; B – garenvirzienā attiecībā pret uzkausētu valnīšu orientāciju (starp punktu atstatums: $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$).

Kā redzams diagrammās (5.6. att.), abos virzienos pastāv mikrociētības datu nevienmērīgums, iegūtās vērtības neregulāri svārstās ap $900 \text{ HV } 0,2$ atzīmi, kur maksimālā vērtību izkliede šķēsvirzienā ir 9 %, garenvirzienā – 12 %. Turklāt, aplūkojot šķēsvirziena līkni (A līkne), netiek novērots, ka mikrociētības izmaiņas uzkausēto valnīšu šķēsvirzienā būtu atspoguļojis atkārtotamību datu variācijas kārtībā, kam vajadzētu rasties dažādu struktūru atkārtotas mījas rezultātā. Uz mikrociētības izmaiņas raksturlīknes valnīšu garenvirzienā (B līkne) arī var redzēt lielu fluktuāciju, un to periodiskums arī nav regulārs.



5.6. att. Mikrociētības izmaiņas raksturi uz pārklājuma virsmas starpperpendikulāros virzienos (atstatums starp mērījumu punktiem $150 \mu\text{m}$).

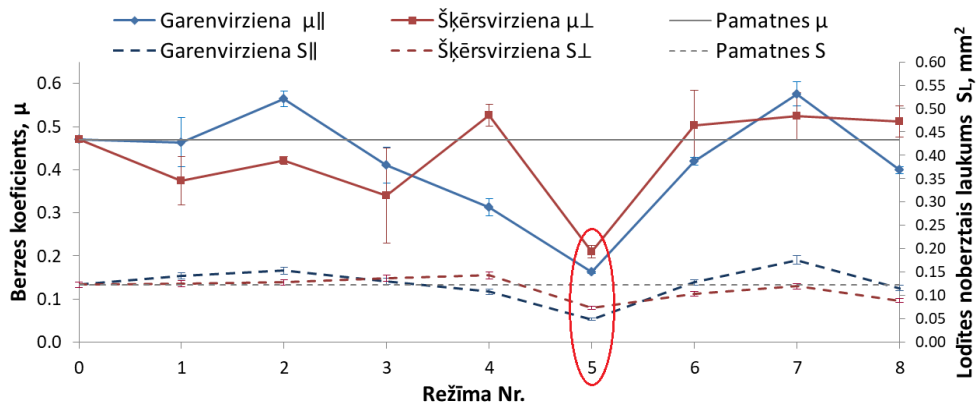
Tātad, spriežot pēc šiem raksturlielumiem, nevar viennozīmīgi apgalvot, ka pārklājuma virsmai piemīt īpašību anizotropija, jo abos mērījumu virzienos pastāv datu izmaiņu nenoteiktība. Šāds raksturs, iespējams, ir saistīts ar uzkausēšanas procesa specifiku, proti:

atsevišķa valnīša formēšanas brīdī pārkausēšanas procesam piemīt noteiktas pakāpes stohastiskums sakarā ar saistīto līdzprocesu nevienmērīgumu – pulvera daļiņu agregātstāvokli gāzespulvera plūsmā un šo daļiņu iekļuves kārtību izkausējuma vannā, temperatūras režīmu u. tml.

Pārklājumu berzes koeficienta testēšanā tika konstatēts, ka lāzeruzkausēšanas procesa režīmu dažādība izraisa atšķirīgus efektus gan berzes koeficientam, gan pretķermeņa (lodītes) noberztās kontakta virsmas laukumam. Eksperimentu rezultātā tika noteikta labākā tehnoloģisko parametru kombinācija – piektais režīms ($OR = 50 \%$, $V = 1200 \text{ mm/min}$; $F_Z = +2 \text{ mm}$), kurā tika iegūta viszemākā berzes koeficienta vērtība ($\mu = 0,16\text{--}0,21$), kas ir divreiz zemāka, salīdzinot ar pamatmateriāla berzes koeficientu.

5.7. attēls demonstrē berzes testa eksperimenta rezultātus, respektīvi, berzes koeficienta vidējo vērtību un lodītes noberztās virsmas laukumu izmaiņas atbilstoši pārklājumiem, kas tika izveidoti saskaņā ar attiecīgo režīmu uzstādījumiem. Diagrammas ordinātu asīs atspoguļoti lielumi, kas atbilst pamatmateriālam – pelēkās horizontālās līnijas uzrāda atskaites jeb bāzes lielumus, kas atspoguļo pamatmateriāla berzes koeficienta ($\mu = 0,469$) un lodītes noberztās virsmas laukuma ($S_L = 0,123 \text{ mm}^2$) vērtības.

Kopumā diagrammām ir diezgan līdzīgi sadales raksturi, kur abu slīpēšanas virzienu berzes koeficientu vērtības svārstās dažādos virzienos tuvu bāzes līnijai, tomēr vienādi demonstrē berzes koeficienta nozīmīgo samazināšanu uz pārklājumiem, kas tika izveidoti pēc piektā režīma uzstādījumiem. Līdz ar to lodītes noberztās virsmas laukumam ir pārskatāms līdzīgs datu izmaiņas raksturs.



5.7. att. Berzes koeficienta un lodītes noberztās virsmas laukuma izmaiņas attiecīgi režīmu sakārtojumam garenvirziena un šķērsvirziena slīpēšanas virzieniem.

Salīdzinot berzes koeficientu vidējās vērtības starp abām slīpēšanas virzienu grupām, tika noteikts, ka šie lielumi faktiski ir līdzvērtīgi, respektīvi: garenvirzienā slīpētu virsmu datu kopai berzes koeficienta vidējā vērtība ir $\bar{\mu}_{\parallel} = 0,414$, šķērsvirzienā slīpētu virsmu datu kopai šī vērtība – $\bar{\mu}_{\perp} = 0,426$.

Rezultātā, ņemot vērā berzes koeficienta rezultātus līdz ar cietības izmaiņas raksturu, lāzeruzkausētām pārklājumu virsmām lielākoties piemīt noteiktas pakāpes viendabīgums ar relatīvi varbūtējo raksturu. Tādējādi uzkausēšanas un slīpēšanas virzienu savstarpējā orientācija nenožīmīgi ietekmē pārklājumu cietību un berzes koeficientu izmaiņas.

6. Atšķirīgi lāzeruzkausēto pārklājumu salīdzinošā analīze

Šajā nodaļā tika izskatītas ar divām atšķirīgām lāzeruzkausēšanas metodēm izveidoto pārklājumu īpašības. Šim nolūkam tika uzkausētas divas pārklājumu grupas, kur viena pārklājumu grupa tika izveidota, lietojot tradicionālo lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju, kas paredz pamatmateriāla minimālu caurkausēšanu, savukārt otra pārklājumu grupa tika uzkausēta pēc šajā darbā piedāvātās metodes, veidojot zobenveida caurkausējumu.

Eksperimenta materiāli, iestatījumi un novērtēšanas metodes

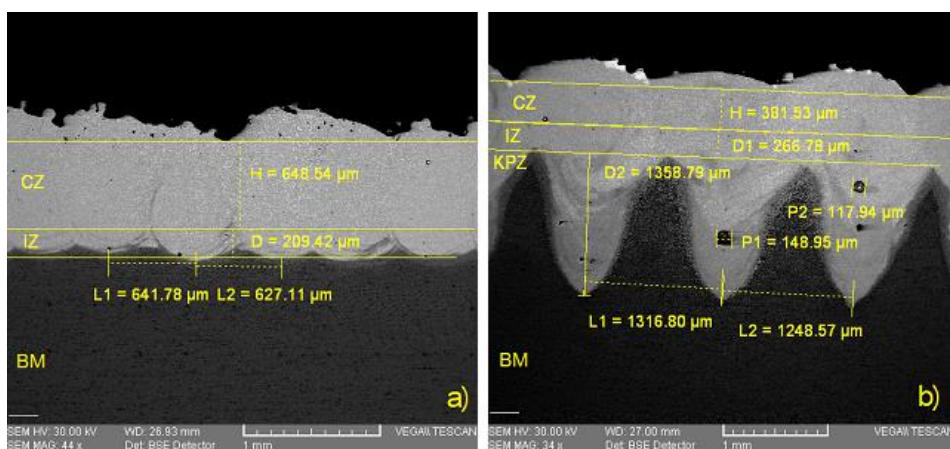
Eksperimentālie pārklājumi (ātrgriezējtērauds *AISI M2*) tika uzkausēti uz instrumentu tērauda *AISI D2* loksnēm, kuru nomināla cietība ir ap 255 HB (saskaņā ar *ISO 18265*: ~268 HV, ~25 HRC).

Lai iegūtu dažāda lieluma pamatmateriāla caurkausējumu, pārklājumi tika uzkausēti, izmantojot divus atšķirīgus režīmus, kuru pamatatšķirība bija lāzera starojuma jaudas blīvuma maksimumā: pirmajai pārklājumu grupai $I_0 = 1,95 \cdot 10^3 \text{ W/mm}^2$; otrajai pārklājumu grupai $I_0 = 4,87 \cdot 10^3 \text{ W/mm}^2$.

Izveidoto pārklājumu izpēti veica uz šķērsgriezumu mikropieslīpņiem, salīdzinot pārklājumu morfoloģiju, karbīdus veidojošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzumu uzkausētajā slānī, mehānisko īpašību izmaiņas pēc mikrociētības izmaiņas raksturiem pārklājumu šķērsgriezumos, kā arī pārklājumu spoguļgludo pulēto virsmu ($Sa = 0,015 \mu\text{m}$) tribotehniskās īpašības.

Eksperimenta pamatrezultāti un secinājumi

Pirmajai pārklājumu grupai uzkausēto slāņu efektīvā biezuma (H_E) vidējā vērtība ir ap 650 μm , otrās grupas pārklājumiem – ap 380 μm respektīvi (6.1. att.). Caurkausējumu dziļums (D_P) pirmajai grupai ir ap 210 μm , otrajai grupai – pilnais caurkausējumu dziļums ($D_P = D_1 + D_2$) vidēji ir ap 1625 μm . Līdz ar to daži poru ieslēgumi sastopami otrās grupas pārklājumos, kā jau tika novērots iepriekšējos pētījumos – gar zobenveida caurakusējuma asi, lielākoties tuvāk tā saknei.

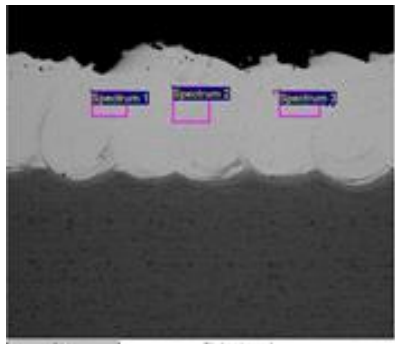
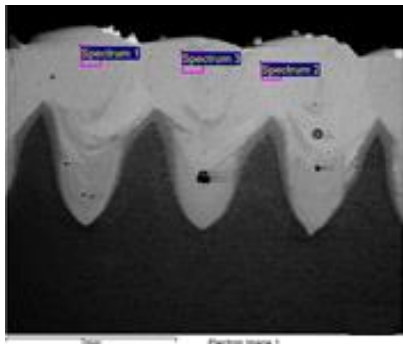


6.1. att. Pirmās grupas (a) un otrās grupas (b) pārklājumu šķērsgriezumu attēli ar ģeometriskos parametru mērījumiem.

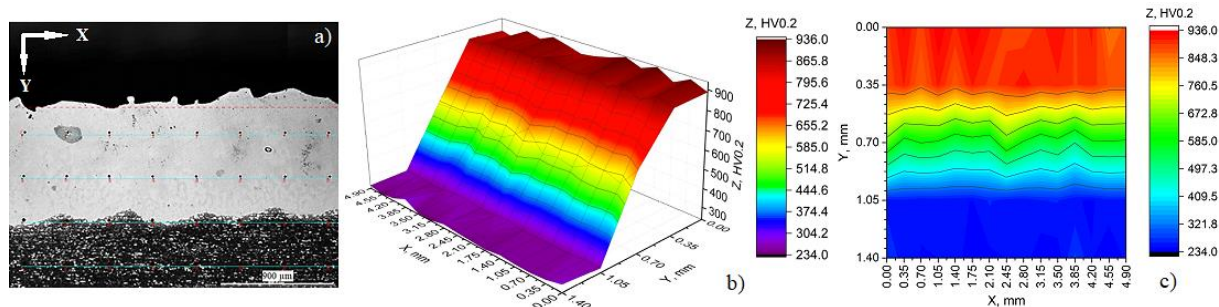
EDS analizē tika noteikts, ka pirmās grupas pārklājumos karbīdus veidojošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzums ir praktiski līdzīgs oriģinālā pulvera sastāvam (6.1. tab.). Savukārt otrās grupas pārklājumos Mo, W, V daudzums uzkausēta slānī tika samazināts gandrīz divreiz, līdz ar to satur lielāku Cr un Fe daudzumu. Tādējādi šī analīze parādīja, ka samaisīšanas pakāpe ir lielāka otrās grupas pārklājumiem. Rezultātā tika noteikts, ka lielāks caurkausējuma dziļums izraisa lielāku uzkausējuma un pamatmateriāla samaisīšanos.

6.1. tabula

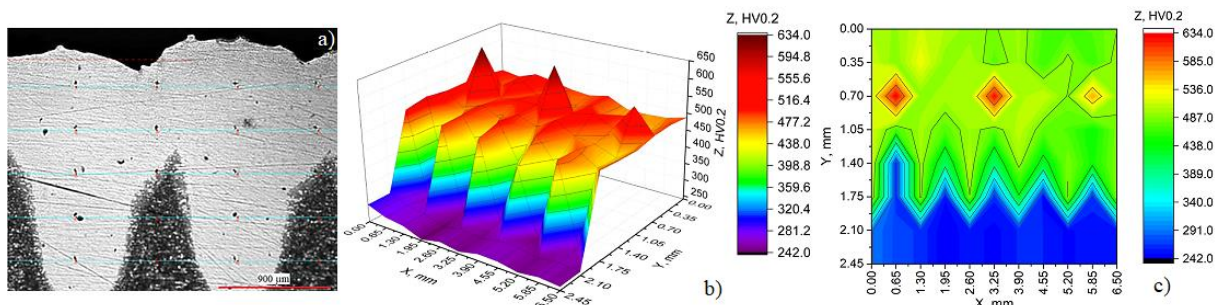
EDS analīzes rezultāti (vidējais elementu sastāvs, masas %)

Pirmās grupas pārklājums					Otrās grupas pārklājums				
									
V	Cr	Mo	W	Fe	V	Cr	Mo	W	Fe
2,06	4,74	5,26	5,66	80,40	1,35	8,71	1,35	2,45	82,90

Pārklājumu mehānisko īpašību izmaiņu raksturi atspoguļoti 3D mikrociētības diagrammās: kā redzams 6.2. attēlā, pirmās grupas pārklājumiem piemīt diezgan vienmērīga datu izmaiņa valnīšu pārklāšanas virzienā (X ass). Tomēr virzienā materiāla dziļumā (Y ass) mikrociētībai ir redzams krass lielumu kritums no $900\text{ HV }0,2$ uz $250\text{ HV }0,2$. Savukārt otrās grupas pārklājumi demonstrē īpašību heterogenitāti gar X un Y asīm līdz ar mikrociētības pīķiem $0,7\text{ mm}$ dziļumā, kas atbilst dobumiem starp blakus esošiem zobeneida caurkausējumiem (6.3. att.).

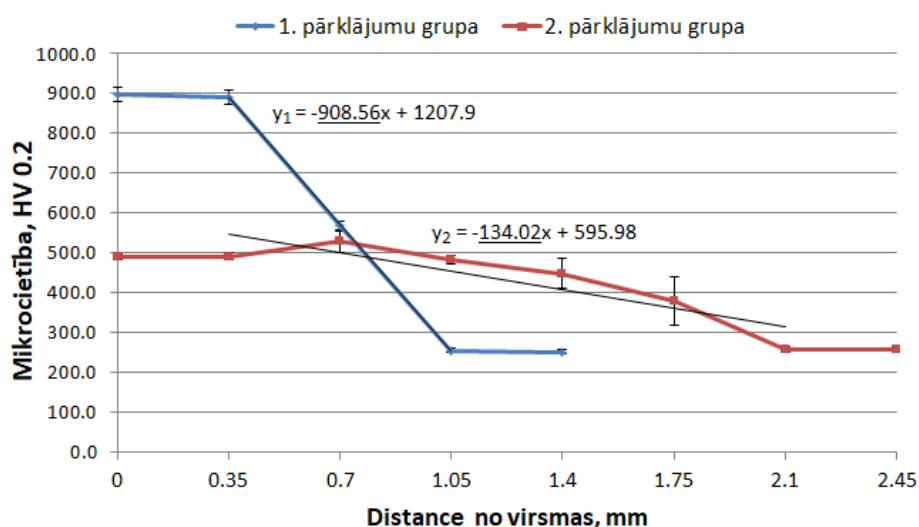


6.2. att. Mikrociētības ($\text{HV }0,2$) izmaiņas raksturs pirmās grupas pārklājuma šķēsgriezumā: taisnstūra indentēšanas punktu masīvs $350\text{ }\mu\text{m} \times 350\text{ }\mu\text{m}$ (a); 3D mikrociētības diagramma (b); 2D mikrociētības epūra (c).



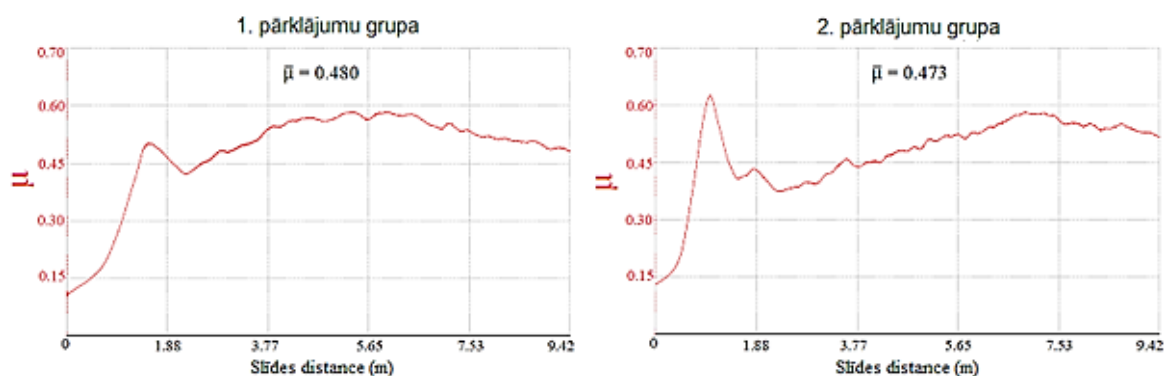
6.3. att. Mikrociētības ($HV\ 0,2$) izmaiņas raksturs otrās grupas pārklājuma šķērs griezumā: taisnstūra indentēšanas punktu masīvs $650\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ (a); 3D mikrociētības diagramma (b); 2D mikrociētības epīra (c).

Salīdzinot abu pārklājumu grupu mikrociētības izmaiņas profilus atbilstoši dziļuma koordinātes izmaiņai pa normāli no virsmas uz pamatmateriālu (6.4. att.), ir redzams, ka otrās grupas pārklājumiem piemīt lēzenāka vērtību izmaiņa nekā pirmās grupas pārklājumiem. Lineārās regresijas vienādojumu koeficienti atspoguļo mikrociētības gradientu lielumus pārklājuma un pamatmateriāla pārejas zonas posmā, proti, pirmās grupas pārklājumiem – $908,56\ (HV/mm)$, otrās grupas pārklājumiem – $134,02\ (HV/mm)$. Tādējādi, pieņemot, ka starp materiāla cietību un sprieguma stāvokli pastāv kopsakarība [44], var uzskatīt, ka, jo mazāks ir cietības gradients, jo vienmērīgāka ir paliekošo spriegumu pārdalīšana sistēmā “pārklājums-pamatne”. Pamatojoties uz mikrociētības izmaiņas rezultātu analīzes tika noteikts, ka pārklājumiem ar zobenveida caurkausējumu ir mazākais mehānisko īpašību gradients pārklājuma un pamatmateriāla pārejas zonā, salīdzinot ar pārklājumiem, kam ir neliels caurkausējuma dziļums. Tas ir sasniedzams, pateicoties pamatmateriāla virsslāņu legēšanai ar pakāpeniski samazinošos elementu saturu, palielinoties dziļumam. Tādējādi, izveidojot pārklājumu ar zobenveida caurkausējumu, ir iespējams tuvināt īpašību starpību nevienveidīgo tēraudu kombinācijās, kas var veicināt iekšējo paliekošo spriegumu līmeņa samazināšanu virsmu nocietināšos pārklājumos.



6.4. att. Vikersa mikrociētības profili uz pārklājumu šķērs griezumā kā funkcijas atbilstoši dziļuma koordinātes izmaiņai.

Augsta cietība bieži vien nav dominējošais faktors, lai nodrošinātu labākās ekspluatācijas īpašības. Tāpēc, lai noskaidrotu pārklājumu sausas slīdes berzes koeficientus un to izmaiņas testēšanas laikā, tika veikta izveidoto pārklājumu triboloģiskā testēšana. 6.5. attēlā redzamas dažu izmēģinājumu raksturlīknes abu grupu pārklājumiem. Galvenokārt abu pārklājumu grupās berzes līknēm ir diezgan līdzīgi raksturi, vienīgais izņēmums – piestrādes posmā, kur otrās grupas pārklājumiem tika novēroti nedaudz rupjāki piestrādes apstākļi (6.5. att.).



6.5. att. Pārklājumu berzes koeficientu raksturlīknes.

Kopumā berzes koeficientu vidējās vērtības ir faktiski līdzvērtīgas, proti, pirmās grupas pārklājumiem šī vērtība ir $\bar{\mu} = 0,511$, otrās grupas pārklājumiem – $\bar{\mu} = 0,503$.

Rezultātā tika noskaidrots, ka abu pārklājumu grupām neatkarīgi no virsslāņa cietības dažādības piemīt faktiski līdzīgas tribotehniskās īpašības. Slīdes berzes koeficienta testēšanā iegūtie rezultāti apkopoti 6.2. tabulā.

6.2. tabula

Atšķirīgi lāzeruzkausēto pārklājumu berzes koeficienta izmēģinājumu rezultāti

Parametra nosaukums	Parametra apzīmējums	Pirmā pārklājumu grupa	Otrā pārklājumu grupa	Pamatmateriāls
Berzes koeficienta vidējā vērtība	$\bar{\mu}$	0,512	0,503	0,536
Berzes koeficienta maksimālā vērtība	$\mu_{\max}$	0,675	0,631	0,922

PĒTĪJUMA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Lāzeruzkausēto ātrgriezējēterauda (*AISI M2*) valnīšu ar zobenveida caurkausējumu kvalitātes raksturlielumu izmaiņas rakstura izpētē noteikts režīms ($V = 600 \text{ mm/min}$, $F_z = -1 \text{ mm}$), kurā tika sasniegts maksimālais uzkausēta materiāla daudzums ($1,6 \text{ mm}^2$), maksimālais karbīdus veidojošo leģējošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzums uzkausētajā slānī (6,2 masas %) un minimāla porainība.
2. Iegūti lāzeruzkausēta valnīša kvalitātes raksturlielumu un procesa tehnoloģisko parametru kopsakarību empīriskie modeļi, kas dod iespēju kontrolēt atsevišķi uzkausēta valnīša formas ģeometriskos parametrus un karbīdus veidojošo elementu (Cr, Mo, W, V) daudzumu. Izveidoto lineāro regresijas modeļu aproksimācijas kļūdu lielumi formas parametriem ir 4–13 %, attiecīgi karbīdus veidojošo elementu daudzumam – 16–17 %.
3. Eksperimentāli noteikti lāzeruzkausēšanas procesa režīmu apgabali ($I_0 = 4,87 \cdot 10^3 \dots 7,73 \cdot 10^3 \text{ W/mm}^2$, $V = 600 \dots 1500 \text{ mm/min}$), kas nodrošina uzkausējuma formēšanu ar pamatmateriāla zobenveida caurkausējumu, tādējādi pārklājuma izveidošanu ar mehānisko īpašību gradientu sistēmā “pārklājums-pamatne”.
4. Pētījuma rezultātā tika noteikts, ka bezplaisu ātrgriezējēterauda (*AISI M2*) pārklājumu lāzeruzkausēšana bez termiskās pēcapstrādes ir sasniedzama mikrociētības gradientu robežās 107–295 (HV/mm).
5. Eksperimentālo datu regresijas analīzes rezultātā tika noteiktas tehnoloģisko parametru (pārklāšanas pakāpe, uzkausēšanas ātrums un pulvera patēriņš) un pārklājuma raksturlielumu (biezumu, caurkausēšanas dziļumu, karbīdus veidojošo elementu daudzumu) lineārās sakarības, kas ļāva atklāt parametru ietekmes raksturu un iegūt kvalitātes raksturlielumu prognozēšanas modeļus ar augstu aproksimācijas precizitāti (vidējā absolūtā procentuālā kļūda nepārsniedz 8 %).
6. Eksperimentālās izpētes rezultātā tika noteikti lāzeruzkausēšanas procesa režīmi, kuriem atbilst maksimālā ciētības vērtība ($\sim 66 \text{ HRC}$). Ātrgriezējēterauda pārklājuma lāzeruzkausēšana ļāva palielināt virsmas ciētību līdz 288 %, salīdzinot ar atsperu tērauda (*DIN 66Mn4*) pamatmateriāla ciētību ($\sim 17 \text{ HRC}$).
7. Pārklājumu tribotehnisko īpašību eksperimentālā izpēte ļāva noteikt labāko lāzeruzkausēšanas režīmu ($OR = 50 \%$, $V = 1200 \text{ mm/min}$; $F_z = +2 \text{ mm}$), pēc kura tika iegūta divreiz zemāka sausas slīdes berzes koeficienta vērtība (0,16–0,21), salīdzinot ar atsperu tērauda pamatmateriāla berzes koeficientu (0,47).
8. Lāzeruzkausēšanas metožu salīdzinošā analīzē tika noteikts, ka, lai arī lāzeruzkausēšana zobenveida caurkausēšanas režīmā veicina mikrociētības lieluma samazinājumu uzkausētajā slānī, tomēr pārklājuma un pamatnes pārejas zonā ir sasniedzams mazākais mikrociētības gradients (6,8 reizes), salīdzinot ar minimālā caurkausējuma pārklājumiem, turklāt tribotehniskās īpašības tika saglabātas augstā līmenī.
9. Izstrādātā lāzeruzkausēšanas metode ļauj izveidot pārklājumu ar mehānisko īpašību gradientu sistēmā “pārklājums-pamatne”, kas var labvēlīgi ietekmēt paliekošo spriegumu pārdalīšanu, lietojot materiālus ar atšķirīgiem termiskās izplešanās koeficientiem. Tādējādi šī metode ļauj vienkāršot lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko procesu, izslēdzot starpslāņu uzklāšanas, kā arī termiskās pēcapstrādes nepieciešamību nevienveidīgo tēraudu uzkausēšanā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Schneider, Marcel. *Laser cladding with powder*. Ph. D. Thesis University of Twente, Enschede: Print Partners Ipskamp, 1998, pp. 177. ISBN 90 365 1098 8.
2. Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S. *Laser Cladding*. New York: CRC Press LLC, 2005. 263 pp. ISBN 0-8493-2172-7.
3. Weisheit, A., Gasser, A., Backes, G., Jambor, T., Pirch, N., Wissenbach, K. Direct Laser Cladding, Current Status and Future Scope of Application. In: *Laser-Assisted Fabrication of Materials*. J. D. Majumdar, I. Manna, ed. Berlin: Springer, 2013, pp. 221–240. ISBN 978-3-642-28359-8.
4. Pinkerton, A. J., Wang, W., Li, L. *Component Repair Using Laser Direct Metal Deposition*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 222, no. 7, pp. 827–836. ISSN 2041-2975. DOI: 10.1243/09544054JEM1008.
5. Xue, L. Laser consolidation: a rapid manufacturing process for making net-shape functional components. In: *Advances in laser materials processing* J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low, E. Toyserkani, ed. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2010, pp. 492–534. ISBN 978-1-84569-981-9.
6. Boddu, M. R., Landers, R. G., Liou, F. W. Control of laser cladding for rapid prototyping – a review. In: *Proceedings – Solid Freeform Fabrication Symposium 2001: SFF Symposium in Austin, Texas on August 6–8, 2001*. Austin, Texas: University of Texas Press, 2001, pp. 460–467.
7. Shishkovskij, I. V. *Lazernyj sintez funkcionalno-gradientnyh mezostruktur i obemnyh izdelij*. Moskva: FIZMATLIT, 2009. 424 s. ISBN: 978-5-9221-1122-5. Altenbach, H., Sadowski, T. *Failure and Damage Analysis of Advanced Materials*. Wien: Springer, 2015. 278 pp. eISBN 978-3-7091-1835-1. (krievu valodā).
8. Panchenko, V. Ya. (Red.). *Lazernye tehnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamentalnyh issledovanij i prikladnyh razrabotok*. Moskva: Fizmatlit, 2009. 664 s. ISBN 978-5-9221-1023-5. (krievu valodā).
9. Oliveira, U., Ocelík, V., De Hosson, J. Th. M. *Residual Stress Analysis in Co-based Laser Clad Layers by Laboratory X-rays and Synchrotron Diffraction Technique*. *Surface & Coatings Technology*, vol. 201, 2006. pp. 533–542. ISSN: 0257-8972. Available from: doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.12.011.
10. Zhao, H., Zhang, H., Xu, C., Yang, X. *Temperature and Stress Fields of Multi-track Laser Cladding*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19, pp. 495–501. ISSN 1003-6326. Available from: doi:10.1016/S1003-6326(10)60096-9.
11. Lupoi, R., Cockburn, A., Bryan, C., Sparkes, M., Luo, F., O'Neill, W. Hardfacing Steel with Nanostructured Coatings of Stellite-6 by Supersonic Laser Deposition. *Light: Science and Applications*, 2012, vol. 1, e-10. ISSN 2047-7538 Available from: DOI: 10.1038/lsa.2012.10.
12. Pleterski, M., Tusek, J., Muhic, T., Kosec, L. Laser Cladding of Cold-Work Tool Steel by Pulse Shaping. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, vol. 27, no. 8, pp. 707–713. ISSN 1005-0302. Available from: doi: 10.1016/S1005-0302(11)60130-8.

13. Pleterski, M., Tušek, J., Kosec, L., Muhič, M., Muhič, T. Laser Repair Welding of Molds with Various Pulse Shapes. *Metalurgija*, 2010, vol. 49, no. 1, pp. 41–44. ISSN 0543-5846.
14. Muhič, T., Tušek, J., Pleterski, M., Bombač, D. *Problems in Repair-Welding of Duplex-treated Tool Steels*. *Metalurgija*, 2009, vol. 48, no. 1, pp. 39–42. ISSN 0543-5846.
15. Pinkerton, A. J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance. In: *Advances in laser materials processing*. J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low, E. Toyserkani, ed. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2010, pp. 461–491. ISBN 978-1-84569-981-9.
16. Majumdar, J. D., Manna, I. Development of Functionally Graded Coating by Thermal Spray Deposition. Chapter 5. In: *Roy, M., Davim, J. P. Thermal sprayed coatings and their tribological performances*. Hershey, PA: Engineering Science Reference, 2015. pp. 121–162. Available from: DOI: 10.4018/978-1-4666-7489-9.ch005.
17. Paul, S., Singh, R., Yan, W. Finite Element Simulation of Laser Cladding for Tool Steel Repair. In: *Lasers based manufacturing: 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, AIMTDR 2014*, India, Guwahati, December 12–14, 2014. New Delhi: Springer India, 2015, pp. 139–156. ISBN 978-81-322-2352-8.
18. Chinahov, D. A., Grigoreva, E. G. Analiz effektivnosti sposobov vosstanovleniya detalej izgotovlennyh iz vysokoprochnykh stalej. *Tehnologii i materialy*, 2015, № 4, s. 16–20. eISSN 2410-6437. (krievu valodā).
19. Cao, H. T. Dong., X. P., Pan., Z. *Surface Alloying of High-vanadium High-speed Steel on Ductile Iron Using Plasma Transferred Arc Technique: Microstructure and Wear Properties*. *Materials and Design*, 2016, vol. 100, pp. 223–234. ISSN 0264-1275. Available from: DOI:10.1016/j.matdes.2016.03.114.
20. Candel Bou, JJ., Franconetti Rodríguez, P., Amigó Borrás, V. Study of the Solidification of M2 High Speed Steel Laser Cladding Coatings. *Revista de Metalurgi*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 369–377. eISSN 1988-4222. ISSN 0034-8570. Available from: doi:10.3989/revmetalm.1258.
21. Sherbakov, Yu.V., Kashfullin, A. M. *Sovremennye sposoby vosstanovleniya i uprochneniya detalej*. Perm: IPC “Prokrost”, 2018. 191 s. ISBN 978-5-94279-393-7. (krievu valodā).
22. Topolyanskij, P. A., Topolyanskij, A. P. Progressivnye tehnologii naneseniya pokrytij – naplavka, napylenie, osazhdenie. *Actual Conference*, 2011, № 4 (73), s. 63–68. Pieejams: URL: <http://www.plasmacentre.ru/file/nashy-public/75.pdf>. (krievu valodā).
23. Ryabcev, I. A., Senchenkov, I. K. *Teoriya i praktika naplavochnykh rabot*. Kiev: “Ekotehnologiya”, 2013. 400 s. ISBN 978-966-8409-31-8.
24. Grigoryanc, A. G., Shiganov, I. N., Misyurov, A. I. *Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki*. Moskva: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2006. 664c. ISBN: 5-7038-2701-9. (krievu valodā).
25. Mahamood, R. M., Titilayo, A. E. *Functionally Graded Materials*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2017. 103 pp. eISBN 978-3-319-53756-6.
26. Adaskin, A. M. *Instrumentalnye materialy v mashinostroenii*. Moskva: Forum, Moskva: INFRA-M, 2017. 319 s. ISBN 978-5-00-091073-3. (krievu valodā).

27. Breslavskij, D. V. *Marochnik stali i splavov*. [Tiešsaite]. Harkov, 2003. Data dostupa: 5 aprēļa 2018. Režim dostupa: <http://www.splav-kharkov.com/main.php/> (krievu valodā).
28. Arhipova, I., Bāliņa, S. *Statistika ekonomikā un biznesā: risinājumi ar SPSS un MS Excel*. 2. izd. Rīga: Datorzinību centrs, 2006. 362 lpp. ISBN 9789984665191.
29. Počs, R. *Kvantitatīvās metodes ekonomikā un vadīšanā*. Mācību līdzeklis. Rīga, RTU Izdevniecība, 2003. 148 lpp.
30. Baraz, V. R., Pegashkin, V. F. *Ispolzovanie MS Excel dlya analiza statisticheskikh dannyyh*. 2-e izd. Nizhnij Tagil: NTI (filial) UrFU, 2014. 181 s. (krievu valodā).
31. Fyorster, E., Ryonc, B. *Metody korrelyacionnogo i regressionnogo analiza*. Rukovodstvo dlya ekonomistov. Moskva: Finansy i statistika, 1983. 304 s. (krievu valodā).
32. Grīnglāzs, L., Kopitovs, J. *Matemātiskā statistika: Ar datoru lietojuma paraugiem uzdevumu risināšanai*. Rīga: Rīgas Starptautiskā ekonomikas un biznesa administrācijas augstskola, 2003. 310 lpp. ISBN 9984705064.
33. Kononyuk, A. E. *Obshaya teoriya ponyatij*. Kn. 2. Teoriya obrazovaniya ponyatij. Kiiv: “Osvita Ukrayini”, 2014. 512 s. ISBN 978-966-7599-50-8. (krievu valodā).
34. Ishhanyan, M. V. *Matematicheskoe modelirovanie: Uchebnoe posobie*. – M.: MGUPS (MIIT), 2015. 150 s. (krievu valodā).
35. Karna, S. K., Sahai, R. An Overview on Taguchi Method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 1–7. ISSN 2319-4545.
36. Steen, W.M., Mazumder, J. *Laser Material Processing*. 4th ed., London: Springer, 2010, 558 pp. ISBN 978-1-84996-061-8.
37. Matsunawa, A., Kim, J. D., Seto, N., Mizutani, M., Katayama, S. *Dynamics of Keyhole and Molten Pool in Laser Welding*. *Journal of Laser Applications*, vol. 10, no. 6, pp. 247-254. eISSN 1938-1387. Available from: doi: 10.2351/1.521858.
38. Zhou, J., Tsai, H. L. Porosity Formation and Prevention in Pulsed Laser Welding. *Journal of Heat Transfer*, 2007, vol. 129, no. 8, pp. 1014-1024. ISSN 0022-1481. Available from: doi: 10.1115/1.2724846.
39. Devoyno, O. G., Drozdov, P. S., Dovoretzkiy, Y. B., Kardapolova, M. A., Lutsko, N. I., Tamanis, E. Influence of Laser Cladding Parameters on the Distribution of Elements in the Beads of Nickel-based Ni-Cr-B-Si Alloy. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2012, vol. 49, no. 4, 61.–70.lpp. ISSN 0868-8257. Available from: doi: 10.2478/v10047-012-0023-3.
40. Shevelkov, V. V. Tvyordost – kriterij uprochneniya metallicheskih materialov. Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomicheskie i tehicheskie nauki. 2014, № 5, c. 125–134. ISSN 2227-5215. Pieejams: URL: https://pskgu.ru/projects/pgu/storage/wt/wet05/wet05_13.pdf. (krievu valodā).
41. Stoev, P. I., Moshenok, V. I. Opredelenie mehanicheskikh svojstvmetallov i splavov po tverdosti. Vestnik Harkovskogo nauchnogo universiteta im. Karazina, 2003, t. 601, № 2 (22), s. 106–112. Pieejams: URL: [http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/601_2\(22\)_03_p106-112.pdf](http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/601_2(22)_03_p106-112.pdf). (krievu valodā).
42. Bojko, N. I. Resursosberegayushie tehnologii povysheniya kachestva poverhnostnyh sloev detalej mashin: Uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2006. 198 s. ISBN 5-89035-435-3. (krievu valodā).

43. Klimenko, S. A., Kopejkina, M. Yu., Lavrinenko, V. I., Majboroda, V. S., Akulovich, L. M., Levin, M. L., Hejfec, M. L., Hudolej, A. L., Chizhik, S. A. Finishnaya obrabotka poverhnostej pri proizvodstve detalej. Minsk : Belaruskaya navuka, 2017. 376 s. ISBN 978-985-08-2201-7. (krievu valodā).
44. Pravednikov, I. S. Opredelenie napryazhenij v plasticheski deformiruemyh detalyah. *Elektronnyj nauchnyj zhurnal "Neftegazovoe delo"*, 2005, № 1, c. 38(8). eISSN 1813-503X. (krievu valodā).