

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Andris Ratkus

Doktora studiju programmas “Ražošanas tehnoloģijas” doktorants

**MATERIĀLA VIRSMAS ATJAUNOŠANAS
TEHNOLOĢIJU ANALĪZE UN
LĀZERUZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢIJU
PĒTĪJUMI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
TOMS TORIMS

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Ratkus, A. Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģiju analīze un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju pētījumi. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 46 lpp.

Iespiests saskaņā ar Mašīnbūves un mehānikas zinātnes nozares promocijas padomes "RTU P-16" sēdes 2020. gada 17. septembra lēmumu, protokols Nr. 2.

Pateicība

Promocijas darba eksperimenti bija iespējami, pateicoties *Fraunhofer IWS* institūtam (Drēzdene, Vācija), kā arī uzņēmuma SIA "Alfis" atbalstam. Liels paldies Frankam Brukneram (*Frank Brückner*) un Holgeram Hilligam (*Holger Hillig*) par atbalstu, ieteikumiem un personīgu palīdzību lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas praktiskā apguvē un lietošanā. Prakses iespējas *Fraunhofer IWS* institūtā realizētas, pateicoties *ERASMUS* prakses programmai.

Pateicība Gatim Muižniekam par atbalstu un palīdzību promocijas darba mērījumu veikšanā. Vislielākais paldies zinātniskā darba vadītājam profesoram Tomam Torimam, kurš veltīja milzums pūļu un uzmanības, lai darbs tiktu uzrakstīts.

<https://doi.org/10.7250/9789934225277>

ISBN 978-9934-22-526-0 (print)

ISBN 978-9934-22-527-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 25. novembrī plkst. 13.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē Rīgā, Ķīpsalas ielā 6B 417. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. sc. ing.* Irīna Boiko,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr.* Tauno Otto
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

Vadošais pētnieks, docents *Dr. phys.* Imants Kaldre
Fizikas institūts, Latvijas Universitāte, 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.

Andris Ratkus (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 21 pielikums, 64 attēli, 27 tabulas, kopā 129 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 60 nosaukumu.

SATURS

DARBĀ IZMANTOTIE UN LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI.....	6
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	8
Tēmas aktualitāte.....	8
Darba mērķis un uzdevumi.....	8
Hipotēze.....	9
Pētījumu metodes	9
Zinātniskā novitāte	10
Autors darbā aizstāv	10
Praktiskais lietojums.....	10
Darba aprobācija.....	11
Publikācijas citējamās zinātniskos žurnālos.....	11
Publikācijas pilna teksta rakstu krājumos.....	11
1. MATERIĀLA VIRSMAS ATJAUNOŠANAS TEHNOLOĢIJU ANALĪZE, PILNVEIDOŠANA UN APRĪKOJUMS	13
Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģijas	13
Atjaunošanas tehnoloģiju pilnveidošanas nepieciešamība	13
Uzkausēšanas tehnoloģijas	14
MAG un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju literatūras apskats	15
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas aprīkojums	16
2. UZKAUSĒŠANAS PARAMETRU UN RAKSTURLIELUMU IDENTIFICĒŠANA	17
Tehnoloģiskie parametri	17
Uzkausēšanas procesa parametri	17
Uzkausējuma raksturlielumi	18
Uzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģisko parametru matemātiskā savietojamība	18
3. MAG UZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS	20
MAG eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli.....	20
Eksperimenta paraugu analīze	21
4. LĀZERUZKAUSĒŠANAS UN MAG TEHNOLOĢIJU EKSPERIMENTĀLAIS SALĪDZINĀJUMS.....	22
Eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli.....	22
Eksperimenta paraugu analīze	23

5. LĀZERUZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS UN VALIDĒŠANA	24
Eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli.....	24
Eksperimenta paraugu analīze	24
Sprauslas sagāzuma leņķa ietekme	24
Uzkausēšanas pozīcijas ietekme.....	25
Lāzeruzkausējuma un bāzes materiāla cietības mērījumi	26
Eksperimenta rezultātu ticamības validēšana	30
6. MATEMĀTISKĀS IZTEIKSMES UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢISKO RAKSTURLIELUMU PROGNOZEI	31
MAG uzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana.....	31
Lāzeruzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana	32
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru izvēle un aprēķins.....	33
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru aktīvā kontrole un koriģēšana uzkausēšanas procesa gaitā	34
7. LĀZERUZKAUSĒŠANAS MATEMĀTISKO IZTEIKSMJU UN EKSPERIMENĀLO REZULTĀTU PĀRBAUDE	36
SECINĀJUMI	37
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	41
PIELIKUMI	43

DARBĀ IZMANTOTIE UN LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

Izmantotie saīsinājumi

ANOVA	– neatbilstības, dispersijas tehnika (angļu val. – <i>analysis of variance technique</i>);
COAX12	– <i>Fraunhofer IWS</i> daudzpozīciju koaksiālā tipa lāzeruzkausēšanas sprausla;
COAXid	– <i>Fraunhofer IWS</i> iekšējo virsmu koaksiālā tipa lāzeruzkausēšanas sprausla;
F	– grīdas uzkausēšanas pozīcija (angļu val. – <i>Flat</i>);
lāzeruzkausēšana	– materiāla slāņa uzkausēšana ar lāzera tehnoloģiju, lietojot pulveri vai stiepli (angļu val. – <i>Laser Cladding</i>);
MAG	– elektroda loka metināšana aktīvas aizsarggāzes atmosfērā (angļu val. – <i>Metal active gas</i>);
OH	– “griestu” uzkausēšanas pozīcija (angļu val. – <i>Over head</i>);
VD	– vertikāli leņķī uzkausēšanas pozīcija (angļu val. – <i>Vertical down</i>);
VU	– vertikāli augšup uzkausēšanas pozīcija (angļu val. – <i>Vertical up</i>).

Izmantotie apzīmējumi

A_b	– caurkausējuma šķērsriezuma laukums, mm^2 ;
A_c	– uzkausējuma šķērsriezuma laukums, mm^2 ;
A_{cMod}	– aprēķinātais uzkausējuma šķērsriezuma laukums, mm^2 ;
α	– sprauslas leņķis pret sagatavi, °;
Ar	– argons;
A_{vc}	– derīgā uzkausējuma šķērsriezuma laukums, mm^2 ;
CO_2	– ogļskābā gāze;
C_v	– uzkausējuma šķērsriezuma laukuma ekonomiskuma rādītājs, %;
D_c	– uzkausējuma un bāzes materiāla samaisījuma pakāpe (angļu val. – <i>Dilution</i>), %;
E_{pm}	– pulvera uzkausējuma efektivitāte, %;
E_w	– stieples uzkausēšanas efektivitāte, %;
F_{pm}	– pulvera padeve, g/min;
f	– padeve jeb uzkausējuma solis, mm/apgr.;
G	– lāzeruzkausēšanas ietekmes parametrs, $\frac{\text{W}\cdot\text{g}}{\text{mm}^3}$;
G_{izm}	– lāzeruzkausēšanas ietekmes parametra korekcijas vērtība, $\frac{\text{W}\cdot\text{g}}{\text{mm}^3}$;
H	– uzkausējuma augstums, mm;
H_{diff}	– maksimālā un minimālā uzkausējuma augstumu starpība, mm;
H_{kontr}	– uzkausēšanas procesā nomērītais uzkausējuma augstums, mm;
H_{max}	– maksimālais uzkausējuma augstums, mm;
H_{min}	– minimālais uzkausējuma augstums, mm;

HV	– uzkausējuma cietības vērtības, darbā mērījumi veikti ar 200 g – $HV\ 0,2$, kg/mm ² ;
I_{av}	– procesa strāvas stiprums, A;
I_{LP}	– lāzera intensitāte, W/mm ² ;
I_{PF}	– pulvera plūsmas intensitāte, pulvera daudzums, kas tiek pievadīts uzkausējuma zonā – lāzera punktā, %;
K_{poz}	– uzkausēšanas pozīcijas koeficients;
L_p	– lāzera punkta diametrs, mm;
η	– loka enerģijas pārvades efektivitāte (MAG $\eta = 0,8$);
p	– caurkausējuma dziļums, mm;
P	– lāzera uzkausēšanas jauda, W;
P_{izm}	– lāzera uzkausēšanas jaudas korekcija, W;
s	– standartnovirze;
S	– lāzera punkta laukums, mm ² ;
$s_{Ac\ vid}$	– vidējā aritmētiskā standartklūda;
ρ	– īpatsvars, g/mm ³ ;
Q	– siluma ievade bāzes materiālā, J/mm;
$S_{0,8st}$	– uzkausēšanas stieples laukums, mm ² ;
T_A	– E-MAqS sistēmas piefiksēto pikseļu skaits jeb uzkausēšanas vannas apstākļi;
U	– spriegums, V;
U_{av}	– procesa spriegums, V;
v	– uzkausēšanas ātrums, m/min;
v_{izm}	– uzkausēšanas ātruma korekcija, m/min;
V	– variācijas koeficients, %;
w	– stieples padeves ātrums, m/min;
W_c	– uzkausējuma platums, mm;
w/v	– koeficients, kas apraksta pievadītā materiāla daudzumu uzkausējuma zonā.

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Aizvien pieaug industrijas pieprasījums pēc virskārtu atjaunošanas un modificēšanas tehnoloģijām, kas atjauno un uzlabo detaļu ekspluatācijas īpašības. Aktuāla ir arī materiāla kārtas uzkausēšana, jo uzkausēšanas tehnoloģijas nodrošina iespēju veikt lokālus, ekonomiski un tehnoloģiski pamatotus pārklājumus, kas sniedz iespēju atjaunot un pat uzlabot materiāla virsmas ekspluatācijas īpašības.

Materiālu virsmu atjaunošanas tehnoloģijas tiek izmantotas gan ārējo, gan iekšējo virsmu atjaunošanai, lai novērstu mehānisku bojājumu vai izdilumu izstrādājumiem, kas ekspluatējami atkārtoti, un nav jāiegādājas jauns, dārgs aprīkojums. Savukārt materiālu virskārtas uzlabošana samazina atkārtotu bojājumu veidošanos un nodrošina industriālā aprīkojuma ilgāku ekspluatācijas laiku.

Joprojām industrijai materiālu virskārtas atjaunošanas jomā aktuālas ir pārbaudītas un pieejamas tehnoloģijas, piemēram, *MAG* uzkausēšanas tehnoloģija, kas nodrošina bojātā materiāla slāņa atjaunošanu ārējām un iekšējām virsmām, t. sk. urbumiem. Būtisks ieguvums industrijai ir lāzeruzkausēšanas tehnoloģija, kas, pateicoties tās priekšrocībām, strauji attīstās, un tās lietojums paplašinās. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas būtiskākās priekšrocības ir augsts un viegli kontrolējams enerģijas blīvums, īss procesa laiks. Minētais ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju ļauj uzkausēt plašu materiāla klāstu ar samazinātu karstuma ietekmes zonu, nodrošināt izcilu uzkausējuma samaisījuma pakāpi un procesa kontroli.

Lāzeruzkausēšana ir populāra jaunu izstrādājumu ārējo virsmu modificēšanā, bet, tehnoloģijai kļūstot pieejamākai, to sāk plašāk lietot arī metāla izstrādājumu remonta vajadzībām. Ņemot vērā, ka šī ir salīdzinoši jauna un moderna remonta un atjaunošanas tehnoloģija, promocijas darbā ir veikti vēl nebijuši pētījumi materiāla slāņa uzkausēšanai ar lāzera uzkausēšanas tehnoloģiju. Tas ļauj iegūt nepieciešamās zināšanas par šīs tehnoloģijas iespējām un būtiski paplašinātu industriālo lietojumu un uzticamību.

Promocijas darba pētījumi nodrošina iespēju veidot lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas uzkausējumus ar paredzamiem raksturlielumiem, kas nodrošina ražotājam iespēju izstrādāt virsmu ar nepieciešamajiem izmēriem.

Tādējādi promocijas darbā veiktie atjaunošanas tehnoloģiju pētījumi ļauj paplašināt lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas zinātniski pamatotu lietojamību, izvērtējot tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem, nodrošinot būtisku pienesumu mašīnbūves zinātnes nozarē.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba “Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģiju analīze un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju pētījumi” mērķis ir noskaidrot lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējumu raksturlielumiem, salīdzināt šīs

tehnoloģijas un izstrādāt matemātiskās izteiksmes raksturlielumu prognozei. Lai sasniegtu šo mērķi, promocijas darbam tiek izvirzīti šādi uzdevumi:

- 1) veikt pieejamo materiāla virsmas uzkausēšanas tehnoloģiju vispusīgu analīzi;
- 2) veikt uzkausēšanas eksperimentu un rezultātu analīzi, noskaidrojot lāzeruzkausēšanas raksturlielumu atkarību no tehnoloģiskajiem parametriem, uzkausēšanas pozīcijas un sprauslas leņķa; salīdzināt *MAG* uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultātus;
- 3) pārbaudīt uzkausējuma cietību un noskaidrot cietību ietekmējošos faktorus lāzeruzkausēšanā;
- 4) izstrādāt lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu prognozei un salīdzināt tās ar eksperimenta rezultātiem;
- 5) sniegt rekomendācijas uzkausēšanas tehnoloģiju praktiskai lietošanai.

Hipotēze

Lāzeruzkausēšana ar pulveri sekmīgi realizējama grīdas (*F*) un griestu (*OH*) pozīcijās, un iegūstamie rezultāti ir prognozējami un tehnoloģiski mērķtiecīgi veidojami.

Pētījumu metodes

Promocijas darba pētījumā tika izmantotas gan kvalitatīvās, gan kvantitatīvās pētījuma metodes, kas ļāva veikt daudzpusīgu un zinātniski pamatotu promocijas darbā izvirzīto uzdevumu risināšanu un sasniegt izvirzīto mērķi.

Veicot uzkausēšanas eksperimentu, pārbaudīta tehnoloģisko parametru ietekme uz uzkausējuma raksturlielumu veidošanos. Pēc eksperimenta rezultātiem izstrādātas matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu prognozei. Lāzeruzkausēšanas raksturlielumu aprēķina izteiksmes validētas, lietojot determinācijas koeficientu R^2 . Savukārt *MAG* un lāzeruzkausēšanas eksperimentu datu apstrādei izmantotas matemātiskās statistikas metodes un datorprogrammas *SYSTAT* un *Excel*.

Pētījumā lietotais aprīkojums: uzkausējuma procesa uzraudzības sistēma *E-MAqS* (*Fraunhofer IWS*, Vācija), lāzera stara analizators *Primes Laser Diagnose Focus Monitor FM* (*Primes*, Vācija), metināšanas agregāts *FRONIUS TransPlus Synergic 3200* (*FRONIUS*, Austrija). Rezultāti tika noteikti, paraugiem veidojot šlifus, kas slīpēti, pulēti un apstrādāti ar vara hlorīda (10 % CuClNH_4Cl) šķīdumu ūdenī, tos fotografējot ar atskaites lineālu, izmantojot *KEYENCE VHX* digitālo mikroskopu un datus apstrādājot programmā *SolidWorks*. Savukārt paraugu šķērssgriezumam cietība noteikta, izmantojot *INNOVATEST NEXUS 4000*TM aprīkojumu.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darbā izstrādātas jaunas matemātiskās izteiksmes uzkausējumu raksturlielumu (A_c , $H_{\min}$, H un D_c) prognozei, izmantojot uzkausēšanas tehnoloģiskos parametrus. Ieviestās matemātiskās izteiksmes lietojamas turpmākajos zinātniskajos pētījumos un jaunākajos industriālajos risinājumos, turklāt tās ir adaptējamās dažādiem uzkausēšanas lietojuma veidiem. Būtiski, ka darbā ir izpētīti iepriekš neapskatīti lāzeruzkausēšanas aspekti, noskaidrojot sprauslas leņķa (α) un uzkausēšanas pozīcijas: grīdas (F), vertikāli augšup (VU), griestu (OH) un vertikāli lejup (VD) ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem. Minētais ražošanā nodrošina iespēju veidot paredzamus uzkausējumus visās uzkausēšanas pozīcijās ar dažādiem sprauslas leņķiem, kas ir svarīgi reālos ražošanas apstākļos, kur ir apgrūtināta piekļuve uzkausējuma zonai.

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai ieviests jauns, iepriekš neliets lāzeruzkausēšanas ietekmes parametrs G ($W \cdot g/mm^3$) tehnoloģisko parametru aprakstīšanai, kas lietojams uzkausējumu raksturlielumu prognozēšanai, kā arī izstrādātas teorētiskas izteiksmes tehnoloģisko parametru aprēķināšanai un korekcijai procesa gaitā.

Promocijas darba rezultāti ir jauns ieguldījums mašīnbūves tehnoloģijas zinātņu nozarē, attīstot urbumu uzkausēšanu un uzkausēšanas tehnoloģijas kopumā.

Autors darbā aizstāv

Autors promocijas darbā analizē uzkausēšanas tehnoloģijas sprauslas leņķa un pozīcijas ietekmi uz uzkausējumu, kas nav iepriekš pētīts, un tas pamato darba zinātnisko novitāti. Autors promocijas darbā aizstāv:

- 1) ieviesto lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru (G) un tā izmantošanu raksturlielumu prognozei;
- 2) matemātiskās izteiksmes uzkausējumu raksturlielumu (A_c , H , $H_{\min}$ un D_c) aprēķināšanai;
- 3) matemātiskās izteiksmes uzkausējumu tehnoloģisko parametru aprēķināšanai un korekcijai;
- 4) rekomendācijas uzkausēšanas tehnoloģiju praktiskai lietošanai un pilnveidošanai.

Praktiskais lietojums

Promocijas darbā rezultātiem ir būtiska nozīme Latvijas un Eiropas industrijā, īpaši uzņēmumos, kuros veic ārējo un iekšējo virsmu uzkausēšanu un kas specializējas virsmu un mezglu atjaunošanas tehnoloģijās. Tas ir ieguldījums mašīnbūves tehnoloģiju attīstībā kopumā, nodrošinot paredzamas uzkausējuma raksturlielumu vērtības, kas atvieglo tehnoloģiskā procesa izstrādi un praktisko lietojamību, kā arī inovatīvas un ekonomiski izdevīgas, videi draudzīgākas lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas plašāku izmantošanu ražošanā. Iegūtā informācija, dati un zināšanas lietojamas plašā spektrā virsmu uzkausējumos, jo darbā noskaidrota ne tikai uzkausēšanas tehnoloģisko parametru, bet arī uzkausēšanas sprauslas leņķa un pozīcijas ietekme uz uzkausējuma raksturlielumiem.

Rezultātu izmantošana kopumā veicina progresīvās lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas ieviešanu ražošanā, kur realizējama būtiska izstrādājuma ekspluatācijas īpašību uzlabošana grūti sasniedzamām virsmām.

Darba aprobācija

Darba aprobācija veikta, sniedzot mutiskus ziņojumus četrās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. ASME 2014 *International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014*, 2014. g. 14.–20. novembris, *Monreāla, Kvebeka, Kanāda*.
2. *Danube Adria Association For Automation & Manufacturing – DAAAM International Vienna* 2012. g. 24.–27. oktobris, *Zadara, Horvātija*.
3. *Technische Universität Dresden, Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahltechnik IWS Dresden. Summer School: Trends and new developments in Laser Technology*. 2012. g. 27.–31. augusts, *Drēzdene, Vācija*.
4. *8th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering*, 2012. g. 19.–21. aprīlis, *Tallina, Igaunija*.

Publikācijas citējamās zinātniskos žurnālos

1. Ratkus, A., Torims, T. Powder Laser Cladding Position Impact on Results and Result Prediction. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2020, Vol. 69, Issue 3, pp. 257–265.
2. Torims, T., Pikurs, G., Ratkus, A., Logins, A., Vilcāns, J., Šķlariks, S. Development of Technological Equipment to Laboratory Test In-situ Laser Cladding for Marine Engine Crankshaft Renovation. *Procedia Engineering*. 2015, Vol. 100, pp. 559–568.
3. Torims, T., Ratkus, A., Zariņš, M., Brutāns, V., Vilcāns, J. In-Situ Laser Build-Up Welding of Shipboard Crankshafts. *Applied Mechanics and Materials*. 2012, Vol. 234, pp. 39–46.
4. Torims, T., Ratkus, A., Vilcāns, J., Zariņš, M., Rūsa, A. Analysis of In-Situ Renewal Technology for the Backhoe Bucket Bores. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies*. 2011, Vol. 5, Part 2, pp. 270–289.
5. Torims, T., Ratkus, A., Vilcāns, J., Zariņš, M., Rūsa, A. Analysis of the Impact of In-Situ Repair Technology on the Surface Integrity of Excavator Bucket Bores. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, Vol. 87, pp. 113–118.

Publikācijas pilna teksta rakstu krājumos

1. Torims, T., Pikurs, G., Ratkus, A., Logins, A., Vilcāns, J., Šķlariks, S. Development of Technological Equipment to Laboratory Test In-situ Laser Cladding for Marine Engine Crankshaft Renovation. *Procedia Engineering*. 2015, Vol. 100, pp. 559–568.
2. Ratkus, A., Torims, T. Mathematical Model of the Influence of Process Parameters on Geometrical Values and Shape in Mig/Mag Multi-Track Cladding. *Proceedings of the*

ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. Vol. 2A: Advanced Manufacturing. Montreal, Quebec, Canada. 14–20 November 2014.

3. Torims, T., Bruckner, F., Ratkus, A., Fokejevs, A., Logins, A., The application of laser cladding to marine crankshaft journal repair and renovation. *Proceedings of the ASME 2014: 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis – ESDA 2014*. Copenhagen, Denmark, 25–27 June 2014. New York, American Society of Mechanical Engineers. 2014, pp. 001–010.
4. Ratkus, A., Torims, T. Research on the bucket bore renewal technologies. *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*. Zadar, Croatia, 24–27 October 2012. Vienna, Austria. 2012, pp. 675–678.
5. Ratkus, A., Torims, T., Gutakovskis, V. Research on Bucket Bore Renewal Technologies. *Proceedings of 8th International Conference of DAAAM Baltic “Industrial Engineering”*. Tallinn, Estonia, 19–21 April 2012. Tallinn University of Technology. 2012, pp. 222–226.
6. Torims, T., Vilcāns, J., Zariņš, M., Ratkus, A., Rūsa, A. Comprehensive Analysis of the New In-Situ Crankshaft Crankpin Bearings Renovation Technology for Sea Going Ships. *Applied Mechanics and Materials Conference (ASME 2011): Proceedings*. United States of America, Chicago, May 30 to June 1, 2011, ASME. 2011.
7. Torims, T., Geriņš, Ē., Ratkus, A., Zariņš, M., Brutāns, V. Shipboard Crankshaft Bearing In-Situ Repairs Utilizing Laser Build-Up Welding. *Annals of DAAAM & Proceedings 2011: The 22nd DAAAM World Symposium*. Vienna, Austria, 23–26 November 2011, DAAAM International. Vienna. 2011, pp. 597–598.
8. Torims, T., Ratkus, A., Vilcāns, J., Zariņš, M., Rūsa, A. Analysis of the Impact of In-Situ Repair Technology on the Surface Integrity of Excavator Bucket Bores. *International Conference on Applied Mechanics and Manufacturing Technology (AMMT 2011): Proceedings*. Bali, Indonesia, 4–5 August, 2011. 2011, pp. 113–118.

Minētās publikācijas ir tieši saistītas ar promocijas darbā veiktajiem pētījumiem, kopumā darba autors ir piedalījies 20 zinātnisku publikāciju veidošanā.

1. MATERIĀLA VIRSMAS ATJAUNOŠANAS TEHNOLOĢIJU ANALĪZE, PILNVEIDOŠANA UN APRĪKOJUMS

Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģijas

Darba autoram darbojoties industriālās tehnikas remonta nozarē, ir pieredze, ka remontu tiek veikti ne tikai, nomainot ražotāja piedāvātās rezerves daļas, bet atsevišķos gadījumos ekonomisku apsvērumu dēļ ir jāizvērtē iespēja bojāto aprīkojuma mezglu atjaunot, atjaunojot arī tā ekspluatācijas īpašības. Šādu atjaunošanas remontu bieži realizē ar metināšanas tehnoloģiju, nomainot, pastiprinot bojātās konstrukcijas vai mezglu elementus. Bieži ir nepieciešami virsmas atjaunošanas remontu, kuros tiek atjaunots bojātais materiāla slānis ar uzkausēšanas tehnoloģiju gan ārējām, gan iekšējām virsmām – urbumiem.

Virsmu atjaunošanu jārealizē precīzi, jo uzkausējumam ir jānodrošina jauns materiāla slānis, ko mehāniski apstrādājot un ievērojot ražotāja paredzēto izmēru pielaidi, tiek izveidota jauna sēža. Turklāt urbuma salāgojuma sēža ir sastāvdaļa no korpusa, rāmja, izlices vai industriālās tehnikas kausa, kur sēžas bojājums nozīmē visa izstrādājuma bojājumu, kura nomaiņa ne vienmēr ir ekonomiski pamatota. Urbumu atjaunošana ir tehnoloģiski sarežģīta, jo urbumam ir ierobežota piekļuve, apgrūtināta uzkausējumu izmēru un tehnoloģiskā procesa kontrole. Kā arī urbuma novietojums – uzkausēšanas pozīcija – ir atkarīga no lielgabarīta industriālā aprīkojuma novietojuma, kas ne vienmēr ir brīvi pārvietojams, lai nodrošinātu nemainīgu grīdas (F) vai vertikālu (V) uzkausēšanas pozīciju. Pastāv situācijas, kad, urbumam atrodoties horizontāli un uzkausēšanu veicot pa spirāli, uzkausēšanas pozīcija cikliski mainās starp F , vertikāli augšup (VU), griestu (OH) un vertikāli lejup (VD) pozīcijām.

Urbumu atjaunošanā tiek izmantots specializēts mobils aprīkojums, kas tiek bāzēts uz atjaunojamā aprīkojuma. Pirms jaunā materiāla slāņa uzkausēšanas veic bojājuma izvirpošanu, iegūstot cilindrisku virsmu. Materiāla virsmu atjauno, veicot nepārtrauktu spirālveida uzkausējumu. Beigās tiek veikta pēcstrāde, nodrošinot nepieciešamo urbuma izmēru.

Autoram, pateicoties uzņēmumam SIA “Alfis”, pieejama urbumu atjaunošanas tehnoloģija, kas jauno materiāla slāni veido ar MAG uzkausēšanas tehnoloģiju. MAG tehnoloģiju izmanto urbumu uzkausēšanai, jo tā ir pieejama, uzticama un sevi pierādījusi. Turklāt par MAG uzkausēšanas tehnoloģiju autors izstrādājis maģistra darbu [2], kur secināts, ka uzkausējums nodrošina labākas mehāniskās īpašības, salīdzinot ar bāzes materiālu S355J2 (LVS EN 10149-3).

Komplicētākā materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģija ir urbumu atjaunošana, savukārt būtiskākā operācija ir jaunā materiāla slāņa uzkausēšanas operācija urbumiem, citi pētījumi par šo jautājumu autoram nav zināmi. Tādēļ promocijas darbs pamatā ir koncentrēts uz uzkausēšanas operāciju.

Atjaunošanas tehnoloģiju pilnveidošanas nepieciešamība

Ekonomisku un tehnoloģisku apsvērumu dēļ industrija, kas darbojas remonta tehnoloģiju jomā, ir ieinteresēta attīstīt materiāla virsmu atjaunošanas tehnoloģijas, kur tehnoloģiski un

ekonomiski pamatoti realizējama atjaunošana un materiāla virskārtas uzlabošana [5], [14], [22]. Remonta tehnoloģiju attīstība, t. sk. urbumu atjaunošana, nodrošina lētāku un pieejamāku tehnoloģiju, kas uzlabo pakalpojuma pieprasījumu. Turklāt industrija ir ieinteresēta attīstīt fleksiblu remonta tehnoloģiju, lai nodrošinātu kvalitatīvu plaša spektra pakalpojumu klāstu, respektīvi, ar vienu tehnoloģisko iekārtu var veikt dažādus remontus. Tā attīstāma, pilnveidojama un nepieciešamības gadījumā adaptējama iekšējo un ārējo virsmu atjaunošanā, atjaunojot urbumus, slīdgultņus, vadītklas un lielu ārējo stiprinājumu elementus.

Nodrošināt atjaunotajam izstrādājumam uzlabotas ekspluatācijas īpašības ir būtiski, jo gadījumos, kad aprīkojums ir jāremontē, var secināt, ka oriģinālais izstrādājums nav nodrošinājis nepieciešamās ekspluatācijas īpašības. Turklāt, ja veikta virskārtas atjaunošana un uzlabošana (nodilumizsturības, korozijnoturības u. c.), tiek samazināta atkārtota remonta nepieciešamība, kas vairo remonta tehnoloģiju pieprasījumu. Minētie virsmas uzlabojumi ir aktuāli, jo industriālais aprīkojums tiek ekspluatēts agresīvā vidē: ostu teritorijā, minerālmēslu pārkraušanā, metalurģijā, karjeru izstrādē u. c.

Liels potenciāls ir slīdgultņu atjaunošanai, kas ietilpst zemes rakšanas, ostas kraušanas un ražošanas aprīkojumā, tiek lietoti arī kuģu industrijā un naftas ieguvē, jo šādi tiktu būtiski paplašinātas atjaunošanas tehnoloģiju iespējas. Slīdgultņiem būtiski nodrošināt materiāla virskārtas nodilumizturību [10], [13]. Šāds tehnoloģiju lietojums ļautu nodrošināt *in-situ* remonta iespējas, kas īpaši būtiski liela izmēra, sarežģīti nomaināmiem slīdgultņiem.

Bez tam minētajās jomās ir pieprasījums pēc nelielu un lokālu bojājumu atjaunošanas, kur nelieliem bojājumiem nepieciešams atjaunot virsmas laukumu mazā (līdz 1 mm) augstumā. Bet lokālu bojājumu – skrāpējumu, iespaidumu vai koroziju [20] – novērš ar precīzi orientētu materiāla un lokālu jaudas pievadi. Šādā veidā iespējams veikt preventīvu remontu pirms būtiskākiem aprīkojumu bojājumiem, nodrošinot pēc iespējas mazāku noslēdzošo mehānisko apstrādi vai to izslēdzot. Būtiski pie šāda veida remonta ir nodrošināt mazu termoietekmes zonu (HAZ), samazinot bāzes materiāla paliekošos spriegumus un pie uzkausējumiem nodrošinot minimālu, bet pietiekamu uzkausējuma samaisīšanās pakāpi (D_c), tādējādi nodrošinot optimālu (no 5 % līdz 10 %) uzkausētā materiāla “atšķaidīšanu” ar bāzes materiālu [16]. Lokālo bojājumu atjaunošanas pētījumi šajā darbā netiek apskatīti, bet, izprotot to nozīmību industrijā, tehnoloģiju izvēlē šāda specializēšanās iespēja tika ņemta vērā.

Uzkausēšanas tehnoloģijas

Specializēti materiāli, lai nodrošinātu uzkausējumu ar uzlabotām fizikāli mehāniskām īpašībām, ir pieejami MAG tehnoloģijai [29]–[31]. Taču pieejamais aprīkojums paredzēts 0,8 mm diametra stieplei, kas būtībā izslēdz specializētas uzkausēšanas stieples lietošanu, jo pamatā šādas stieples pieejamas no 1,2 mm un 1,6 mm diametrā [29]–[31]. Turklāt ir zināms, ka MAG uzkausēšanas tehnoloģija veido lielu caurkausējumu, kas paaugstina D_c vērtības. MAG uzkausēšanas tehnoloģija nodrošina arī no 2 mm līdz 4 mm augstu uzkausējumu iegūšanu, kas apgrūtina tehnoloģijas lietojumu pie lokāliem un maziem uzkausējumiem, jo būtisks materiāla slānis pēcāpstrādē ir jānogriež [2], [16].

Tādēļ, lai nodrošinātu plašākas variēšanas iespējas dažādu specializētu individuāli piemērotu un kombinējamu materiālu slāņu izveidošanai, nepieciešams izmantot tehnoloģiju, kurā lieto pulvermateriālu [16]. Industrijā ir dažādas virsmas veidošanas tehnoloģijas, kur par pievadmateriālu izmanto pulveri, piemērotākā ir lāzeruzkausēšanas tehnoloģija, ņemot vērā tehnoloģijas attīstību un perspektīvas. Tehnoloģiski ar lāzeruzkausēšanu iespējams uzkausēt plašu materiāla klāstu, ko pēc [16] iespējams realizēt no 0,5 mm līdz 8 mm biezumā. Turklāt, ņemot vērā lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas pieejamību, ko nodrošināja prakses vieta *Fraunhofer IWS* institūtā (Drēzdene, Vācija), promocijas darba eksperimenti tika veikti, lietojot pulvera lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju (turpmāk tekstā “lāzeruzkausēšanas tehnoloģija”). Tāpēc pārbaudītā MAG uzkausēšanas tehnoloģija pamatā kalpos kā references tehnoloģija, lai salīdzinātu iegūtos rezultātus ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju.

MAG un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju literatūras apskats

Veikts padziļināts MAG un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju literatūras avotu apskats, identificējot galvenokārt tehnoloģisko parametru diapazonus un potenciālos pētījuma virzienus. Noskaidrots, ka apskatītajos MAG tehnoloģijas avotos [7], [19], kā arī lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas avotos [6], [11], [26]–[28] atrodami pētījumi vienīgi par individuālu uzkausējuma ģeometriju, kas uzkausēts ārējai virsmai grīdas (F) pozīcijā ar perpendikulāru ($\alpha = 90^\circ$) sprauslas leņķi. Nav atrodami pētījumi par urbumu un laukuma uzkausēšanu.

Aplūkojot MAG uzkausēšanas tehnoloģijas avotus [7], [19], secināts, ka maģistra darbā [2] izstrādātais uzkausēšanas eksperiments ir veikts pamatoti plašā diapazonā, bet avota [2] rezultātos nav aplūkotas uzkausējuma (A_c) un caurkausējuma laukuma (A_b) vērtības, kas nepieciešamas pie uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) u. c. lielumu noteikšanas. Tādēļ darbā tika atkārtoti caurskatīti maģistra darbā [2] izveidotie paraugi, lai nodrošinātu detalizētu paraugu raksturlielumu noteikšanu, lietojot daudzpusīgāku izmēru noteikšanas metodi.

Apskatītajos literatūras avotos lietotie tehnoloģisko parametru diapazoni (spriegums (U), uzkausēšanas ātrums (v), stieples padeve (w), lāzera jauda (P), lāzera punkta diametrs (L_p) un pulvera padeve (F_{pm})), kas uzrādījuši atbilstošus rezultātus, ir apkopoti 1.1. tabulā. Šie parametru diapazoni tika ņemti vērā eksperimenta plānošanā.

1.1. tabula

Eksperimentā lietotie tehnoloģisko parametru diapazoni

MAG uzkausēšanas tehnoloģija [2]			
U, V	$v, m/min$	–	$w, m/min$
16–22	0,5–0,8	–	3,5–10,5
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģija			
P, W	$v, m/min$	L_p, mm	$F_{pm}, g/min$
1100–2000	0,5–0,8	4	10–33

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas aprīkojums

Lāzeruzkausēšanas literatūras analīzē noskaidrots, ka pastāv dažādas lāzeruzkausēšanas sprauslas, kas galvenokārt atšķiras ar pievadītā materiāla veidu un materiāla pievadīšanas paņēmieni. Galvenokārt sprauslas attīsta, lai uzlabotu uzkausējuma ražību, efektivitāti un lietojamību. Attīstītākās ir universālās ārējo virsmu uzkausēšanas sprauslas, kas izmantotas visplašāk, bet pieejams arī urbumu uzkausēšanas aprīkojums [32].

Fraunhofer IWS institūts prakses laikā nodrošināja pasaules līmeņa lāzeruzkausēšanas aprīkojumu, t. sk. darbam bija pieejama urbumu uzkausēšanas sprausla *COAXid*. Šo specializēto sprauslu eksperimentālajā darbā nolemts nelietot, jo sprauslas leņķis pret sagatavi nav maināms, turklāt uzkausēšana *OH* pozīcijā aprīkojumam ir bīstama. Bīstamība saistīta ar to, ka sprausla atrodas perpendikulāri pret uzkausējamo virsmu, kā arī sprauslas optiskie elementi – aizsargstikls un spogulis – atrodas ļoti tuvu (no 30 mm līdz 35 mm) uzkausējuma zonai. Minētais ar lielu iespējamību *OH* pozīcijā var veicināt optikas bojājumus neuzkausētā pulvera dēļ. Tāpēc darbā izmantota universāla uzkausēšanas sprausla *COAX12*, jo sprauslas attālums no uzkausējuma zonas līdz optiskajiem elementiem ir aptuveni 200 mm. Sprausla piemērota sarežģītu konfigurāciju uzkausēšanai, kā arī pieļaujama sprauslas leņķa (α) variēšana, bet sprausla nav radīta urbumu uzkausējumu veikšanai. Tādēļ, lietojot *COAX12* sprauslu, uzkausējumi būtiskajās urbuma pozīcijās (*F–VU–OH–VD*) veikti individuāli ar fiksētu sprauslas pozīciju uz plakana parauga, sprauslas pozīcija ir fiksēta visu parauga uzkausēšanas laiku. Lai samazinātu iespējamo aprīkojuma *COX12* bojājuma risku, *OH* pozīcijas uzkausējums realizēts, nodrošinot sprauslas sagāzuma leņķi ($\alpha = 36^\circ$). Šāds leņķis lietots arī *MAG* eksperimentā, kas nodrošina rezultātu salīdzināšanas iespējas starp abām tehnoloģijām. Tādēļ arī pozīcijās *F*, *VU*, *VD* nodrošināts identisks sprauslas leņķis, lai ir nosakāma uzkausēšanas pozīcijas ietekme uz uzkausējuma raksturlielumiem. Lāzeruzkausēšanas eksperimentā pārbaudīta arī sprauslas leņķa variāciju ietekme uz uzkausējumu raksturlielumiem, paplašinot iegūtās informācijas apjomu.

Pēc veiktās literatūras analīzes var secināt, ka apskatītie lāzeruzkausēšanas eksperimenti veikti vienīgi grīdas (*F*) pozīcijā ar perpendikulāru ($\alpha = 90^\circ$) uzkausēšanas sprauslas novietojumu attiecībā pret sagatavi. No minētā un eksperimentālajā darbā paveicamā izvirzāma **darba hipotēze**: lāzeruzkausēšana ar pulveri sekmīgi realizējama grīdas (*F*) un griestu (*OH*) pozīcijās, un iegūstamie rezultāti ir prognozējami un mērķtiecīgi veidojami.

2. UZKAUSĒŠANAS PARAMETRU UN RAKSTURLIELUMU IDENTIFICĒŠANA

Šajā nodaļā identificēti tehnoloģiskie parametri, uzkausējuma raksturlielumi, kas izmantoti un kontrolēti eksperimentālajā darbā, kā arī apskatīti MAG un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju parametri, kas savstarpēji pielīdzināmi, lai nodrošinātu tehnoloģiju savstarpēju matemātisku salīdzināšanu.

Tehnoloģiskie parametri

MAG uzkausēšanas eksperimentā izmantots metināšanas agregāts *FRONIUS TransPlus Synergic 3200*, kur manuālajā režīmā iestatāmas uzkausēšanas sprieguma (U , V) un stieples padeves (w , m/min) vērtības. Savukārt lietotais uzkausēšanas degļa rotācijas un padeves aprīkojums *SUPERCOMBINATA 40/1* nodrošina uzkausēšanas ātrumu (v , m/min) un uzkausēšanas degļa padevi jeb uzkausējuma soli (f , mm/apgr.).

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā lietots *Fraunhofer IWS* (Drēzdene) laboratorijas diožu lāzera enerģijas avots *Laserline GmbH: LDF 20000-200*, kur iestatāma lāzera jauda (P , W). Lāzeruzkausēšanas ātrumu (v , m/min) un uzkausējuma soli (f , mm/apgr.) nodrošina *KUKA Roboter GmbH* manipulatora roka *KR 60 HA*. Savukārt pulvera padeves (F_{pm} , g/min) daudzums nodrošināts, lietojot pulvera padeves aprīkojumu *GTV GmbH MF-PF2/2*.

Uzkausēšanas procesa parametri

Šeit apkopoti procesu aprakstoši parametri, kas eksperimentālā darbā nolasīti vai aprēķināti.

Uzkausējuma siltuma enerģijas daudzums (Q , J/mm). Apraksta enerģijas daudzumu, kas pievadīts bāzes materiālam. MAG tehnoloģijai Q nosaka pēc 2.1. izteiksmes, zinot vidējās sprieguma U_{av} , strāvas stipruma I_{av} un uzkausēšanas ātrumu v vērtības, kā arī loka enerģijas pārvades efektivitāti η . Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai – pēc 2.2. izteiksmes, zinot lāzera jaudu (P) un v [8], [18].

$$Q = \eta \frac{60 U_{av} I_{av}}{v}. \quad (2.1.)$$

$$Q = \frac{60 P}{v}. \quad (2.2.)$$

Uzkausēšanas vannas apstākļi – pikseļu skaits (T_A) reģistrēts, lietojot *E-MAqS* sistēmu. Sistēma lāzeruzkausēšanas procesa gaitā reģistrē attēla elementa skaitu, kuru temperatūra ir vienāda vai augstāka par iestatīto. Apkopotā informācija atspoguļo uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījumu un apstākļus.

Lāzera intensitāte (I_{LP} , W/mm²) apraksta lāzera jaudas sadalījumu uz lāzera punktu, kas projicējas uz sagataves uzkausējamās virsmas. Pamatā I_{LP} atkarīgs no lāzera jaudas (P) un lāzera punkta laukuma uz uzkausējamās virsmas.

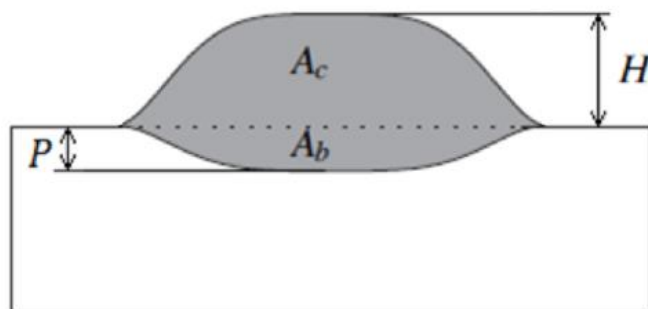
Pulvera plūsmas intensitāte (I_{PF} , %) raksturo pulvera plūsmu – pulvera daudzumu, kas tiek pievadīts bāzes materiālam, uzkausējuma zonā – lāzera punkta ietvaros, attiecībā pret visu pievadīto pulvera daudzumu, izteiktu procentos. Tādējādi I_{PF} norāda, cik procenti pievadītā materiāla ir pievadīts tieši uzkausējuma zonā.

Uzkausējuma raksturlielumi

Uzkausējuma slāņa biezums (H , mm). Nosakot arī H_{min} , kas apraksta minimālo uzkausējuma augstumu, kas iegūstams pie laukuma uzkausējuma, maksimālo uzkausējuma augstumu H_{max} un maksimālo un minimālo augstumu starpību H_{diff} , kas apraksta potenciāli pēcapstrādē nogriežamo materiāla kārtu.

Uzkausējuma ekonomiskuma rādītājs (C_v , %), kas atspoguļo derīgo šķērsriezuma laukumu (A_{vc} , mm²) – uzkausējuma laukums zem H_{min} , attiecību pret visu uzkausējuma laukumu (A_c , mm²) (2.3. izteiksme).

$$C_v = \frac{A_{vc}}{A_c} \cdot 100. \quad (2.3.)$$



2.1. att. Uzkausējuma šķērsriezums [12].

Caurkausējuma dziļums (p , mm) (2.1. att.).

Uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c , %), kas nosakāma ar 2.4. izteiksmi, zinot caurkausējuma laukumu (A_b , mm²) un A_c (2.1. att.) [12].

$$D_c = \frac{A_b}{A_b + A_c} \quad (2.4.)$$

Uzkausējuma šķērsriezuma cietība (HV , kg/mm²), kas apraksta uzkausētā materiāla slāņa mehāniskās īpašības to izmaiņu uzkausējuma profila šķērsgriezumā.

Uzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģisko parametru matemātiskā savietojamība

Eksperiments uzkausēšanas tehnoloģijām veikts ar 1.1. tabulā uzskaitītajiem tehnoloģiskajiem parametriem, ievērojot norādītos diapazonus. Kā minēts iepriekš, promocijas darbā plānots salīdzināt MAG uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas,

kas ir visai atšķirīgas. Tādēļ, lai abas tehnoloģijas būtu matemātiski salīdzināmas, ir jāveic lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru pamatota pielīdzināšana *MAG* parametriem.

Jaudu P lāzeruzkausēšanai nosaka pēc 2.5. izteiksmes, zinot loka *MAG* tehnoloģijas enerģijas pārvades efektivitātes koeficientu η , kā arī uzkausēšanas procesā nolasītās U_{av} un I_{av} vērtības.

$$P = \eta U_{av} I_{av}. \quad (2.5.)$$

Lāzeruzkausēšanas procesā pievadītā pulvera daudzums (F_{pm} , g/min) pielīdzināms *MAG* stieples pievades daudzumam, lietojot 2.6. izteiksmi, kur jāzina uzkausējamā materiāla īpatsvars (ρ , kg/m³), stieples laukums ($S_{0,8st}$, m²), (w , m/min), stieples E_w un pulvera E_{pm} uzkausējuma efektivitātes koeficients.

$$F_{pm} = \frac{1000 \rho S_{0,8st} w E_w}{E_{pm}}. \quad (2.6.)$$

Darbā identificēti uzkausējuma raksturlielumi, kas vislabāk raksturo uzkausējumu, tā ģeometriju un mehāniskās īpašības. Noskaidrots, ka *MAG* un lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas ir matemātiski salīdzināmas, jo tehnoloģiskie parametri ir savietojami, kā arī sakrīt nosakāmie uzkausējuma raksturlielumi.

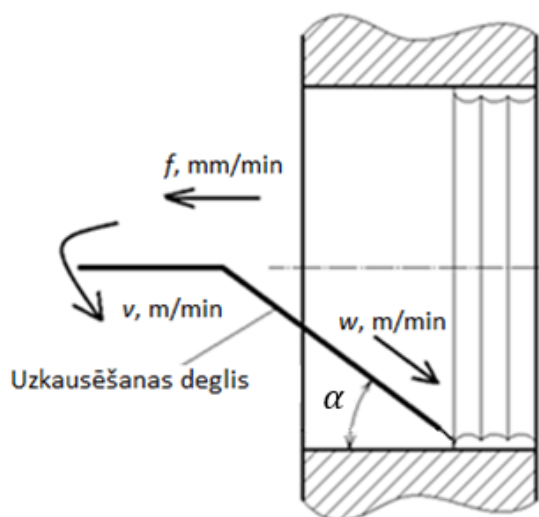
3. MAG UZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS

Šajā nodaļā veikta maģistra darbā [2] izveidoto uzkausējuma paraugu padziļināta analīze, nosakot uzkausējuma raksturlielumus. Eksperiments [2] veikts ar mērķi noskaidrot detalizētu tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem. Paraugu padziļināta analīze noderīga, lai salīdzinātu abas lietotās tehnoloģijas, kā arī izstrādātu matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu prognozei.

MAG eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli

Eksperiments veikts ar *FRONIUS TransPlus Synergic 3200* metināmo aprīkojumu un *SUPERCOMBINATA 40/1* mobilo atjaunošanas iekārtu. Eksperiments veikts 1.1. tabulā uzskaitītajos tehnoloģisko parametru diapazonos ar konstantu $f = 2,8$ mm/apgr.

Uzkausēšanas eksperiments realizēts pēc 3.1. attēlā redzamās shēmas, veidojot uzkausējumu nepārtrauktā spirālē – vienmērīgi pārklājot cilindrisku virsmu. [2] paraugi veidoti vienīgi F uzkausēšanas pozīcijā ar $\alpha = 90^\circ$ sprauslas leņķi.



3.1.att. Uzkausēšanas shēma.

Eksperiments veikts uz *S355J2* (*LVS EN 10149-3*) bāzes materiāla, lietojot stiepli *G3Si1* (3.1. tabula) (0,8 mm) pēc *ISO 14341-A* un 13 l/min aizsarggāzi *M21 EN 439* (80 % Ar un 20 % CO₂), nodrošinot MAG uzkausēšanas procesu pēc *DIN 1910* un *LVS EN ISO 4063:2011*.

3.1. tabula

Metināmās stieples *ISO 14341-A G3Si1* ķīmiskais sastāvs [1]

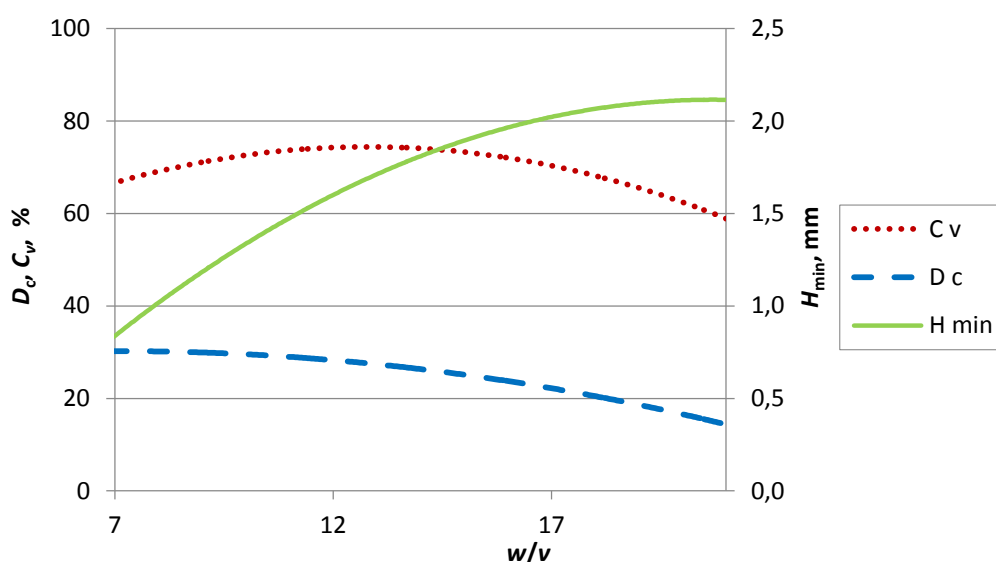
C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %
0,06–0,12	0,7–1,0	1,3–1,6	≤0,025	≤0,025

Eksperimenta paraugu analīze

Uzkausētajiem paraugiem izveidoti makrošlifi, kas kodināti ar vara hlorīdu (10 % $\text{CuCl} \cdot \text{NH}_4 \text{Cl}$ šķīdumu ūdenī), un programmā *SolidWorks* veikta uzkausējuma raksturlielumu noteikšana, apstrādājot ar mērogu uzņemtu parauga fotoattēlu.

MAG uzkausēšanas eksperimenta rezultātos novērots, ka D_c sasniedz 20–40 %, kas vērtējama kā augsta uzkausējuma samaisījuma pakāpe, jo pēc literatūrā [16] sniegtajiem datiem MAG tehnoloģijai būtu jānodrošina 15–25 %.

Secināts, ka būtiski uzkausējuma raksturlielumus ietekmē pievadītā materiāla daudzums, ko tieši ietekmē w , bet netieši – v . Tādēļ ieviests jauns koeficients w/v , kas daudzpusīgāk apraksta uzkausējuma zonā pievadīto materiāla daudzumu. Galveno raksturlielumu $H_{\min}$, D_c un C_v atkarība no koeficienta w/v atainota 3.2. attēla grafikā.



3.2. att. $H_{\min}$, D_c un C_v , atkarība no w/v .

Noskaidrots, ka $H_{\min}$ ir tieši, bet D_c ir apgriezti proporcionāls w/v , bet C_v labākie rādītāji iegūstami pie $w/v = 10$ – 15 vērtībām. Apkopojot eksperimentā veiktos rezultātus, ir secināts, ka labākie uzkausējuma rezultāti realizējami pie stieples padeves ātruma $w = 7,0$ – $7,5$ m/min, kā arī pie koeficienta $w/v = 9$ – 15 vērtībām. Labākie MAG uzkausēšanas tehnoloģiskie parametri apkopoti 1. pielikumā. Ir jāizvairās no lielāko w vērtību lietošanas kopā ar mazāko ātrumu, jo tas veido vienmērīgi kāpjošu laukuma uzkausējuma profilu, kam nav ekonomiska un tehnoloģiska pamatojuma.

4. LĀZERUZKAUSĒŠANAS UN MAG TEHNOLOĢIJU EKSPERIMENTĀLAIS SALĪDZINĀJUMS

Šajā nodaļā veikta MAG un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju eksperimentāla salīdzināšana, noskaidrojot galvenos tehnoloģiju ieguvumus, trūkumus un lietojamību, kā arī uzkausējuma raksturlielumu atšķirības.

Eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta veikšanai, izmantots šāds tehnoloģiskais aprīkojums: *Laserline GmbH LDF 20000-200* diožu lāzera avots, *KUKA Roboter GmbH* manipulators *KR 60HA*, pulvera padeves aprīkojums *GTV GmbH MF-PF 2/2* un sprausla *COAX12*.

Izvēlēti labākie seši MAG eksperimenta paraugi (1. pielikums), kuriem, lietojot 2.1., 2.2., 2.5. un 2.6. izteiksmi, noteikti pielīdzinātie lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskie parametri (4.2. tab.). Abu tehnoloģiju eksperiments veikts vienādos apstākļos – $\alpha = 36^\circ$ un F pozīcijā.

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā lietotie materiāli:

- 1) plakandzelzs: *S355J2 (LVS EN 10149-3)* (350 mm × 80 mm × 12 mm);
- 2) pulveris: *STELLITE® 6*, 150/63 μm (4.1. tab.);
- 3) pulvera transportējošā gāze (Ar) 3 l/min; aizsarggāze (Ar) 15 l/min.

4.1. tabula

Uzkausējamā pulvera *STELLITE® 6* nominālais ķīmiskais sastāvs [33]

Co, %	Cr, %	W, %	C, %	Citi
Bāze	27–32	4–6	0,9–1,4	Ni, Fe, Si, Mn, Mo

4.2. tabula

Salīdzinošā eksperimenta pielīdzinātie tehnoloģiskie parametri

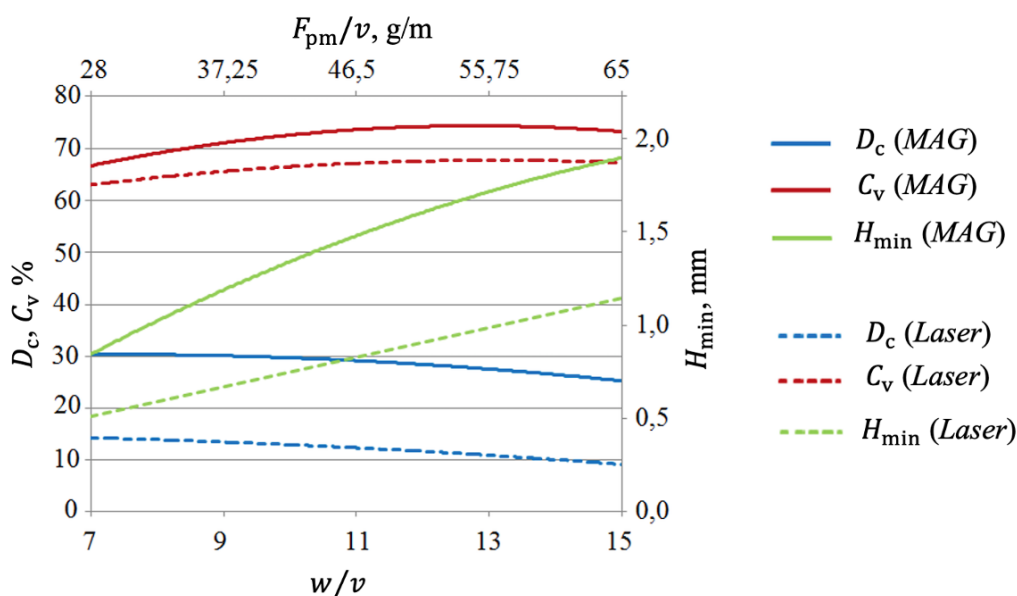
Jauda							
MAG	Paraugs Nr.	5	14	23	7	16	25
	P, W	1687	1653	1651	2073	2021	2038
	$Q, J/mm$	202,5	152,6	123,8	248,7	186,6	152,8
Lāzeruzk.	Paraugs Nr.	1	2	3	4	5	6
	P, W	1660			2040		
	$Q, J/mm$	199,2	153,2	124,5	244,8	188,3	153,0
Ātrums							
MAG	$v, m/min$	0,50	0,65	0,80	0,50	0,65	0,80
Lāzeruzk.	$v, m/s$	0,0083	0,0108	0,0133	0,0083	0,0108	0,0133
Materiāla pievade							
MAG	$w, m/min$	7,0			7,5		
Lāzeruzk.	$F_{pm}, g/min$	30,7			32,9		

Lāzeruzkausēšanas materiālu izvēle ir ļoti plaša. Darbā lietots uzkausējamais pulveris *STELLITE*[®] 6, ko plaši izmanto *Fraunhofer IWS* institūtā, jo tas nodrošina ļoti labas ekspluatācijas īpašības: augstu nodilumizturību, korozijnoturību arī pie augstām temperatūrām (500 °C) un sagaidāmo cietību $HV\ 450\text{--}550\text{ kg/mm}^2$. Turklāt šāda materiāla uzkausēšana konstrukcijas tēraudam ir maz pētīta, līdz ar to veiktais pētījums ar *STELLITE*[®] 6 sniedz jaunas zināšanas [9], [11], [13], [24].

Eksperimenta paraugu analīze

Realizējot lāzeruzkausēšanas eksperimentu, visiem paraugiem novērots viļņains uzkausējums, un tas konstatēts pirms parauga šķērsriezuma analīzes. Veicot sākotnējo uzkausējuma paraugu novērtējumu, pieņemts lēmums uzkausējuma soli samazināt no sākotnējā $f = 2,8\text{ mm}$ uz $f = 2\text{ mm}$. Lāzeruzkausēšanā paraugiem ar samazināto soli $f = 2\text{ mm}$ ir uzlabojies materiāla piepildījums – samazinājusies uzkausējuma augstuma starpība, salīdzinot ar $f = 2,8\text{ mm}$ soli.

Lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas tehnoloģiju rezultāti salīdzināti 4.1. attēla grafikā, kur lāzeruzkausēšanai ieviests pievadītā materiāla daudzuma koeficients F_{pm}/v (g/m), kas analogs MAG tehnoloģijas w/v koeficientam.



4.1. att. F_{pm}/v un w/v ietekme uz eksperimentu rezultātiem.

Secināts, ka lāzeruzkausēšanā uz bāzes virsmas tiek uzkausēts mazāks materiāla daudzums (A_c) un H_{min} pie abām tehnoloģijām pielīdzināta pievadītā materiāla apjoma, kas skaidrojams ar samazinātu uzkausējuma efektivitāti, ko potenciāli ietekmē sprauslas leņķis $\alpha = 36^\circ$. Apstiprinājies, ka MAG tehnoloģija lielo D_c un H_{min} vērtību dēļ nav piemērota mazu un lokālu uzkausējumu realizēšanai, taču ir piemērotāka lielu apjomu uzkausējuma laukumu realizēšanai. Savukārt 4.1. attēlā redzams, ka lāzeruzkausēšanas tehnoloģija uzrādīja būtiski zemākas D_c vērtības, kas ir būtiski pie mazu un lokālu uzkausējumu veidošanas, jo ir samazināts uzkausējuma ķīmiskā sastāva atšķaidījums ar bāzes materiālu.

5. LĀZERUZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS UN VALIDĒŠANA

Ekspieriments veikts, lai noskaidrotu tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem un iegūtu eksperimenta datus, kas nepieciešami raksturlielumu noteikšanas matemātisko izteiksmju izstrādei. Eksperimentālajā darbā pārbaudīta soļa, leņķa α un sprauslas pozīcijas (F , OH , VU un VD) ietekme uz lāzeruzkausēšanas uzkausējuma raksturlielumiem.

Eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā lietots identisks tehnoloģiskais aprīkojums kā pie uzkausēšanas tehnoloģiju salīdzināšanas, kā arī lietoti eksperimenta tehnoloģiskie parametri, kas uzskaitīti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģiskie parametri

Paraugs	1	2	3	4	5	6	7	8
P , kW	1,66	1,66	1,66	2,04	2,04	2,04	1,20	1,40
v , m/min	0,50	0,65	0,80	0,50	0,65	0,80	0,50	0,50
F_{pm} , g/min	30,7	30,70	30,70	32,90	32,90	32,90	14,00	25,00

Eksperimenta paraugu analīze

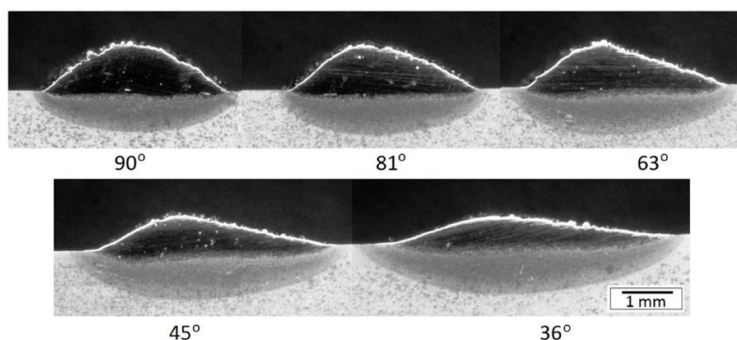
Noskaidrots, ka lielākās H_{min} vērtības un vienmērīgāko uzkausējumu iespējams nodrošināt, lietojot $\alpha = 90^\circ$, turklāt ar mazāko sprauslas soli ($f = 2$ mm), kā nākamo alternatīvu lietot $\alpha = 90^\circ$ un $f = 2,8$ mm un tikai tad $\alpha = 36^\circ$ ar $f = 2$ mm. Aplūkojot rezultātus, secināms, ka $f = 2$ mm ir vienīgi rekomendējoša vērtība lāzeruzkausēšanas veikšanai, kur f vērtību korekcijai ir nepieciešama empīriskā pieeja.

Sprauslas sagāzuma leņķa ietekme

Darbā noteikta leņķa α ietekme uz uzkausējuma raksturlielumiem (5.1. att.). Secināts, ka, α vērtībām samazinoties, samazinās uzkausēšanas efektivitāte (E_{pm}), ko izraisa lāzera intensitātes (I_{LP} , W/mm²) (5.1. izteiksme) un pulvera intensitātes (I_{PF} , %) (5.2. izteiksme) samazinājums.

$$I_{LP} = \frac{P}{S} = \frac{4P \sin \alpha}{\pi D^2}. \quad (5.1.)$$

$$I_{PF} = \left[0.072 \left(\frac{\alpha \pi}{180^\circ} \right) + 0.701 \right] 100. \quad (5.2.)$$



5.1. att. α ietekme uz uzkausējumu šķēsgriezuma formu.

Noskaidrots, ka, samazinoties I_{LP} par 42 % un I_{PF} samazinoties par 8,5 %, A_c ir samazinājies par 37 % pie $\alpha = 36^\circ$, salīdzinot ar rezultātiem pie $\alpha = 90^\circ$. Bet procentuālās vērtības neatbilst raksturlielumu un parametru kvantitatīvo atkarību. Tādēļ uzskaitīto, kā arī neidentificēto parametru un efektu ietekme tiek iekļauta pēc noklusējuma, ja ir izstrādāta matemātiska izteiksme, kas apraksta lietotos tehnoloģiskos parametrus vienā skaitliskā vērtībā.

Uzkausēšanas pozīcijas ietekme

Eksperimentāli noskaidrota uzkausēšanas pozīciju F , VU , OH un VD ietekme uz uzkausējuma raksturlielumiem H , A_c un D_c . Noteiktie koeficienti, kas apkopoti 5.2. tabulā, ir aktuāli pie sprauslas leņķa $\alpha = 36^\circ$ un lietotās pulvera transporta gāzes un aizsarggāzes padeves daudzuma (3 l/min un 15 l/min).

5.2. tabula

Raksturlielumu koeficienti dažādās sprauslas pozīcijām

Raksturlielums	Poz. Nr.	Pozīcija	Koeficients, K_{poz}
H	1	F	1,0
	2	VU	1,1
	3	OH	0,9
	4	VD	0,9
A_c	1	F	1,0
	2	VU	1,2
	3	OH	0,8
	4	VD	1,1
D_c	1	F	1,0
	2	VU	1,1
	3	OH	1,2
	4	VD	1,1

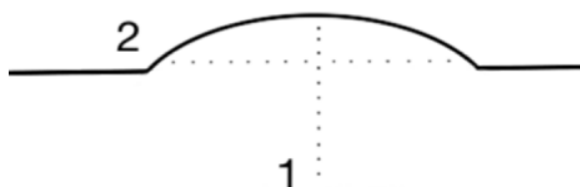
Noskaidrots, ka visās urbumam nepieciešamajās uzkausēšanas sprauslas pozīcijās uzkausējums ir realizējams ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju. Apkopojot iegūtos koeficientus K_{poz} pie F , VU , OH un VD uzkausēšanas sprauslas pozīcijām, secināts, ka galvenie rezultātu ietekmējošie faktori ir pulvera plūsma un izkausētā materiāla plūsma, ko ietekmē gravitācija.

Secināts, ka lāzeruzkausēšanā ar koaksiālā tipa sprauslu augstākās uzkausēšanas efektivitātes vērtības iegūstamas pie perpendikulāra sprauslas novietojums ($\alpha = 90^\circ$), tādēļ, ja ir iespējams, jāizmanto tieši šāds sprauslas novietojums.

Lāzeruzkausējuma un bāzes materiāla cietības mērījumi

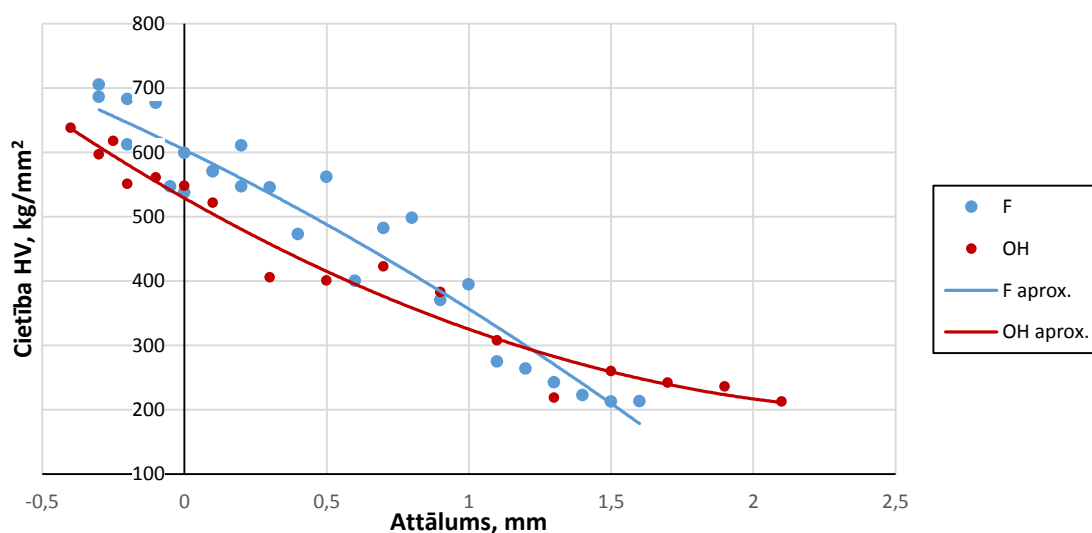
Uzkausējuma cietības mērījumi veikti, lai pārliecinātos par uzkausējuma kvalitāti un iegūtajām mehāniskajām īpašībām. Darbā veikti mikrociētības mērījumi pēc Vikersa skalas (HV) (LVS EN ISO 6507-1:2006), lietojot 0,2 kg svaru un 10 s mērīšanas laiku. Cietības mērījumi pēc HV uzkausējumiem ir piemērotākā mehānisko īpašību pārbaude, jo ar tās palīdzību iespējams noteikt mehāniskās īpašības un to izmaiņu vēlamajā makrošlifa zonā un virzienā. Cietības kontrole ir vienkāršākā uzkausējuma mehānisko īpašību novērtēšana, kas nodrošina informāciju arī par parauga nodilumizturību.

Cietības mērījumi veikti divos dažādos virzienos un mērīšanas lokācijas vietās, kas attēlotas mērījumu shēmā (5.2. att.).



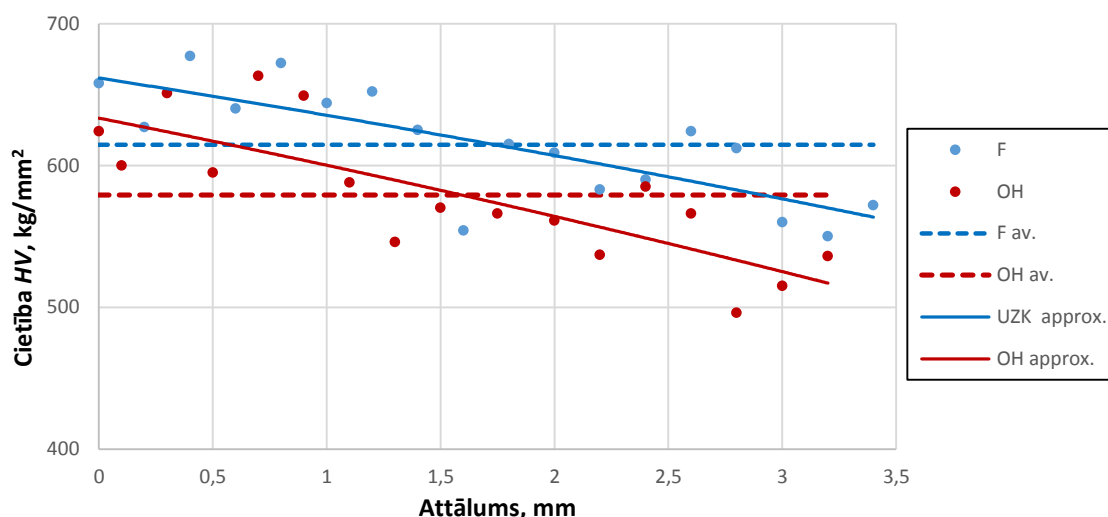
5.2. att. Cietības mērījumu shēma: 1 – vertikālais; 2 – horizontālais pa uzkausējumu.

Analizējot vertikālos cietības mērījumus, noskaidrots, ka uzkausējuma cietību ietekmē uzkausēšanas pozīcija (F, OH). Minētie rezultāti redzami 5.3. attēlā, kur negatīvie attālumi ir uzkausējums (attālums 0 mm ilustratīvi norāda bāzes materiāla virskārtas zonu).



5.3. att. Vertikālie cietības mērījumi pie $\alpha = 36^\circ$.

Darbā veikti horizontāli uzkausējuma cietības mērījumi (5.4. att.), kas realizēti pēc 5.2. attēlā redzamās 2. shēmas aptuveni 0,1 mm attālumā no bāzes materiāla virskārtas. Šādā veidā bija iespēja noskaidrot cietības vērtību izmaiņu atsevišķam uzkausējuma profilam.



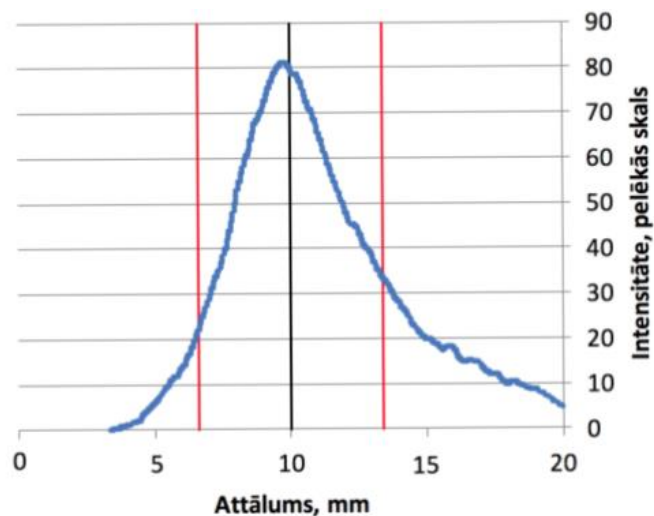
5.4. att. Uzkausējuma horizontālie cietības mērījumi pie $\alpha = 36^\circ$.

Iegūto horizontālo cietības mērījumu raksturs (5.4. att.) liecina, ka ir novērojama $\alpha = 36^\circ$ ietekme uz rezultātu. Lai pārliicinātos par α ietekmi uz horizontālajām cietības vērtībām, darbā veikti cietības mērījumi paraugiem, kas veidoti ar $\alpha = 90^\circ$. Secināts, ka visā profila garumā aproksimētās cietības vērtības pie $\alpha = 90^\circ$ ir tuvu vidējām vērtībām ($HV 591 \text{ kg/mm}^2$), kas sadalītas simetriski ar nelielu vērtību pieaugumu profila malās.

Iegūtie rezultāti liecina, ka horizontālās profila HV vērtības $\alpha = 90^\circ$ paraugu vidusdaļā ir vienādas ar $\alpha = 36^\circ$ paraugu profila vidusdaļas un no sprauslas tālākas zonas HV vērtībām. Savukārt, analizējot $\alpha = 90^\circ$ paraugu horizontālo cietības vērtību pieaugumu uzkausējuma profila malās, noskaidrots, ka to iespaido apaļais lāzera punkts. Lāzera punktam uzkausējuma profila malās ir īsākais lāzera stara ietekmes laiks. Līdz ar to šādi profila malās tiek nodrošināta straujākā uzkausējuma atdzišana, veidojot augstākās cietības vērtības. Salīdzinājumam – pie $\alpha = 90^\circ$ lāzera punkta 0,5 mm vidus segmentā procesa laiks pie $v = 0,5 \text{ m/min}$ aizņem 0,48 s, savukārt profila malā 0,5 mm segmenta procesa laiks aizņem 0,32 s, kas ir par 34 % īsāks procesa laiks (vizualizācija iekļauta 2. pielikumā). Savukārt pie $\alpha = 36^\circ$ profila malās procesa laiks 0,5 mm lāzera punkta segmentam aizņem 0,25 s, kas no $\alpha = 90^\circ$ lāzera punkta vidus segmenta atšķiras par 48 %. Norādītais īsākais uzkausēšanas procesa laiks pie $\alpha = 36^\circ$ ir rezultējies lielākā HV vērtību pieaugumā sprauslai tuvākajā uzkausējuma profila malā. Īsākais uzkausēšanas procesa laiks nav paaugstinājis HV vērtības tālākajā uzkausējuma profila daļā, kā atzīmēts iepriekš, vērtības profila tālākajā daļā ir tuvas $\alpha = 90^\circ$ vidus daļas HV vērtībām.

Darbā apskatīta uzkausējuma vannas temperatūras sadalījuma atšķirības starp $\alpha = 90^\circ$ un $\alpha = 36^\circ$, secināts, ka uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījumu galvenokārt ietekmē pulvera plūsmas intensitāte. Analizējot pulvera plūsmas intensitātes sadalījumu pie $\alpha = 36^\circ$ (5.5. att.), secināts, ka būtiska pulvera plūsmas intensitātes atšķirība ir vērojama starp tuvāko un tālāko uzkausējuma zonu (ap 70 %). Novērotais liek domāt, ka pulvera plūsmas intensitātes koncentrācijai jeb “aizēnojumam” pie HV vērtībām ir zināma ietekme, kur

“aizēnojums” potenciāli absorbē vairāk lāzera enerģijas. Bet tam šajā promocijas darbā nav rasts tiešs izskaidrojums.



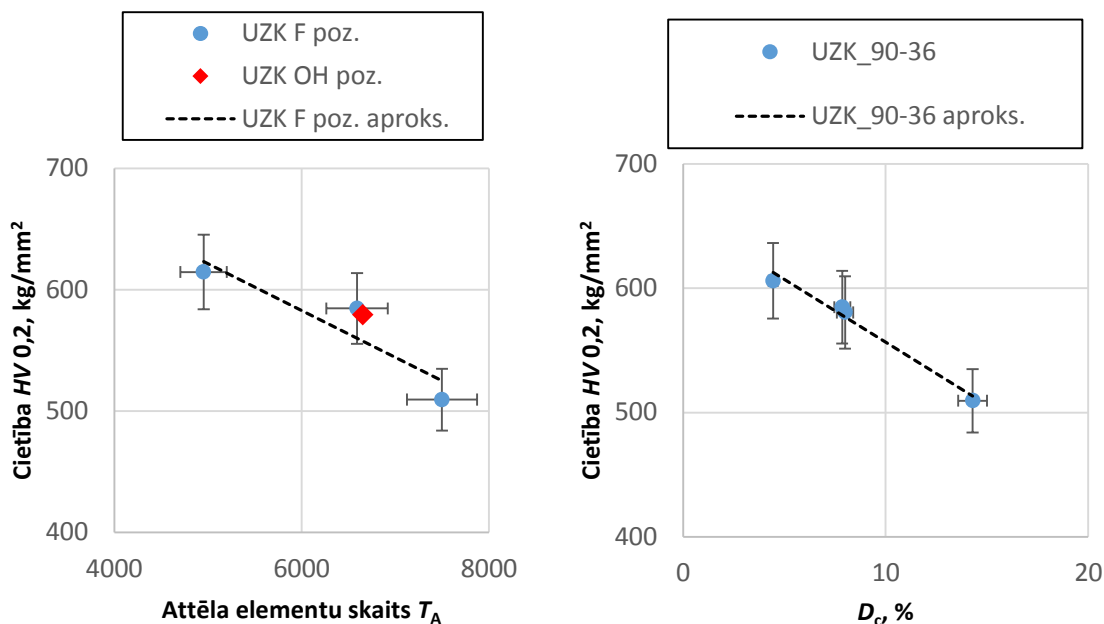
5.5. att. Pulvera intensitātes sadalījums pie $\alpha = 36^\circ$.

Kvantitatīvs uzkausēšanas apstākļu novērtējums

Izvērtējot apskatītos rezultātus, secināts, ka uzkausējuma mehāniskās īpašības ir atkarīgas no lāzera punkta formas, uzkausēšanas pozīcijas un sprauslas leņķa. Minēto uzkausēšanas parametru un apstākļu kopums rezultējas uzkausējuma vannas temperatūras sadalījumā un ģeometrijā, kas darbā analizēta kvantitatīvi ar *E-MAqS* sistēmu, kur uzkausēšanas procesa gaitā reģistrēts attēlu elementu – pikseļu skaits (T_A), kas pārsniedz iestatīto mērķa temperatūru (1500°C), šādā veidā nodrošinot skaitlisku informāciju par uzkausēšanas apstākļiem. Procesā reģistrēti 1000 ieraksti pie 5 s uzkausēšanas. Iegūtie *E-MAqS* dati apkopoti, nosakot vidējo procesa T_A vērtību ietekmi uz vidējām horizontālajām *HV* vērtībām (5.6. att. kreisajā pusē).

Redzams (5.6. att. kreisajā pusē), ka paraugiem ar lielāku T_A samazinās *HV* vērtības, turklāt var pārliecināties, ka *OH* pozīcijas rezultāti (sarkanais punkts) ir tuvi *F* pozīcijas rezultātiem, turklāt T_A un *HV* vērtību korelācija iekļaujas 5 % rezultātu kļūdā. Tas norāda, ka T_A sniegtā informācija lietojama uzkausēšanas apstākļu novērtēšanai.

Redzot, ka T_A vērtību izmaiņa ietekmē uzkausētā materiāla mehāniskās īpašības, darbā pārbaudīta T_A ietekme uz D_c . Noskaidrots, ka, pieaugot T_A , palielinās uzkausējuma samaisījuma pakāpe D_c . Tādēļ secināms, ka raksturlielums *HV* ir atkarīgs no D_c , kas redzams 5.6. attēla labajā pusē. Turklāt D_c ietekme uz *HV* vērtībām novērota arī pie vertikālajiem (5.3. att.) un horizontālajiem (5.4. att.) mērījumiem, kur D_c pie *OH* ir vidēji 1,2 reizes lielāks nekā pie *F* pozīcijas, un tas atspoguļojas rezultātā: pie *OH* pozīcijas paraugiem ir zemākas *HV* vērtības, salīdzinot ar *F* uzkausēšanas pozīciju.



5.6. att. HV vērtību atkarība no T_A pie $\alpha = 36^\circ$ un HV vērtību atkarība D_c .

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģija, pateicoties lietotajam uzkausēšanas materiālam *STELLITE*[®] 6, nodrošina krietni augstākus cietības rādītājus, salīdzinot ar *MAG* tehnoloģiju un bāzes materiālu: vidēji HV 550 kg/mm² pret HV 250 kg/mm² un bāzes materiāla HV 200 kg/mm². Ar *STELLITE*[®] 6 izveidotais materiāla slānis nodrošina būtisku bāzes materiāla virskārtas mehānisko īpašību uzlabojumu, kas paaugstina izstrādājuma nodilumizturību un korozijnoturību. Taču būtiskais cietības pieaugums rada papildu grūtības tālākā mehāniskā apstrādē. Jauniegūtā materiāla slāņa apstrādi iespējams realizēt ar augstapgriezienu frēzēšanu vai lēnu apgriezienu virpošanu, kas tiek realizēta šī brīža urbumu atjaunošanas tehnoloģijā. Potenciāls risinājums ir veikt *STELLITE*[®] 6 uzkausējuma sildīšanu, lai mazinātu uzkausējuma cietību, pēc [34] pie 500 °C augstas temperatūras ir nodrošināma HV 300 kg/mm² cietība. Savukārt uzkausējumu var veidot ar citu uzkausējamo pulveri, piemēram, *Deloro*[™]30 [33], nodrošinot HV 300 kg/mm² robežās un labāku apstrādājamību.

Secināts, ka HV vērtības pamatā ietekmē sprauslas leņķis, sprauslas pozīcija un lāzera punkta forma. Iegūtā informācija par T_A ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem ir būtiska lāzeruzkausēšanā, taču fundamentāliem atzinumiem datu apjoms ir par mazu.

Darbā, apskatot *E-MAqS* sistēmas datus saistībā ar uzkausējuma HV mērījumiem, noskaidrots, ka potenciāli nākotnē T_A vērtību var izmantot uzkausējuma raksturlielumu novērtēšanai vai mērķtiecīgai to izstrādei, veicot uzkausēšanas procesa monitoringu, analīzi un tiešsaistes tehnoloģisko parametru adaptāciju, kas vērsta uz vēlamo mehānisko īpašību izstrādi.

Kopumā visi specializēti uzkausējumi spēj nodrošināt krietni augstākas mehāniskās īpašības nekā konstrukciju tērauds. Tādēļ ir būtiski uzkausējumu realizēt ar paredzamu ģeometriju, lai būtu nepieciešama pēc iespējas mazāka pēcāpstrāde. Tas norāda iemeslu, kādēļ ir būtiski izstrādāt matemātiskās izteiksmes, lai nodrošinātu prognozējamus uzkausējumu raksturlielumus.

Eksperimenta rezultātu ticamības validēšana

Darbā pamatā noteikti divu veidu rezultāti: uzkausējuma šķērsriezuma raksturlielumi un uzkausētā parauga šķērsriezumu cietība. Abu rezultātu ticamība pārbaudīta, nosakot variācijas koeficientu un standarta kļūdu, lietojot vispārzināmas statistikas aprēķinu izteiksmes [1], [3], [17].

Uzkausējuma raksturlielumi noteikti programmā *SolidWorks*, apstrādājot un mērot makrošlifa parauga fotogrāfiju, kas uzņemta mērogā. Darbā, veicot mērījuma kļūdas noteikšanu, tiek pārbaudīta šādas mērījumu metodes piemērotība un precizitāte. Variācijas koeficienta un standarta kļūdas aprēķini veikti A_c , A_b , $H_{\min}$ un $H_{\max}$ raksturlielumiem, 5.3. tabulā apkopoti viena parauga 10 neatkarīgu mērījumu rezultāti.

5.3. tabula

MAG parauga Nr. 16 variācijas koeficients un standarta kļūda

	Variācijas koeficients, %	Standarta kļūda
A_c	0,77	0,16 mm ²
A_b	0,75	0,10 mm ²
$H_{\min}$	0,82	0,004 mm
$H_{\max}$	0,43	0,003 mm

Cietības mērījumiem, kas veikti, lietojot *INNOVATEST NEXUS 4000*TM aprīkojumu, noteikts variācijas koeficients un standarta kļūda, 5.4. tabulā apkopoti viena iespaiduma 10 neatkarīgi rezultātu nolasījumi.

5.4. tabula

Cietības mērījumu variācijas koeficienta un standarta kļūdas noteikšana

Nr.	HV 0,2	$(n_{\text{vid}} - n)^2$	Nr.	HV 0,2	$(n_{\text{vid}} - n)^2$
1	506,2	25,30	6	519,8	73,44
2	508,3	8,58	7	518,8	57,30
3	509,8	2,04	8	507,4	14,67
4	501,6	92,74	9	517,8	43,16
5	511,8	0,32	10	510,8	0,18
n_{vid}		511,23	$\sum (n_{\text{vid}} - n)^2$		317,76
			Standartnovirze		5,94
			Variācijas koeficients, %		1,16
			Standarta kļūda, kg/mm ²		1,88

Iegūtie eksperimenta ticamības rezultāti liecina, ka uzkausējumu raksturlielumu mērīšanas metodika sniedz rezultātus ar mazu variācijas koeficientu un standarta kļūdu, kā arī cietības mērījumi uzrāda labu precizitāti. Līdz ar to darbā veiktie rezultātu nolasījumi ir ar augstu ticamību un zinātniski pamatoti.

6. MATEMĀTISKĀS IZTEIKSMES UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢISKO RAKSTURLIELUMU PROGNOZEI

Darbā izstrādātas MAG un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu noteikšanai, kas nodrošina lietotās tehnoloģijas prognozējamību.

MAG uzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana

Apkopotajiem MAG eksperimenta rezultātiem (3. nodaļa) izstrādātas matemātiskās izteiksmes – 6.1., 6.2. un 6.3. – uzkausējuma raksturlielumu noteikšanai. Pamatā lietots regresijas polinoms, kur raksturlielums ir atkarīgs no tehnoloģiskajiem parametriem un koeficientiem, kas noteikti, lietojot SYSTAT programmu [3], [7], [17].

$$H_{\min} = -19,39 + 2,45U - 10,54v + 0,04w + 0,14Uv + 0,15vw - 0,06U^2 + 3,16v^2. \quad (6.1.)$$

$$D_c = 378,41 - 54,40U + 235,90v + 32,351w - 12,94Uv - 1,88Uw + 8,45vw + 1,88U^2. \quad (6.2.)$$

$$Q = 93,29 - 409,43v + 41,14w - 18,06Uv - 18,64vw + 0,51U^2 + 487,78v^2 - 0,91w^2. \quad (6.3.)$$

Izveidotajām matemātiskajām izteiksmēm veikta ANOVA (angļu val. – *analysis of variance*) analīze, lai noteiktu izlašu vērtību sadalījumu atšķirības (6.1. tab.) [21].

6.1. tabula

MAG matemātisko izteiksmju ANOVA (dispersijas) analīzes dati

	$H_{\min}$	D_c	Q
Noviržu kvadrātu summa			
Regresija	3,24	495,5	53 927,3
Atlikums	0,10	78,5	69,19
Brīvības pakāpju skaits			
Regresija	7	7	7
Atlikums	9	9	9
Dispersija			
Regresija	0,46	70,79	7703,9
Atlikums	0,01	8,72	7,69
F kritērijs	42,57	8,12	1002,07
p vērtība (F testa)	<0,0005	0,003	<0,0005
R^2 (%)	97,1	86,3	99,9

Mazākās determinācijas koeficienta vērtības R^2 ir 86,3 %. Tas norāda, ka izstrādātās izteiksmes ar augstu precizitāti izskaidro iegūtos eksperimenta rezultātus. Izstrādātās

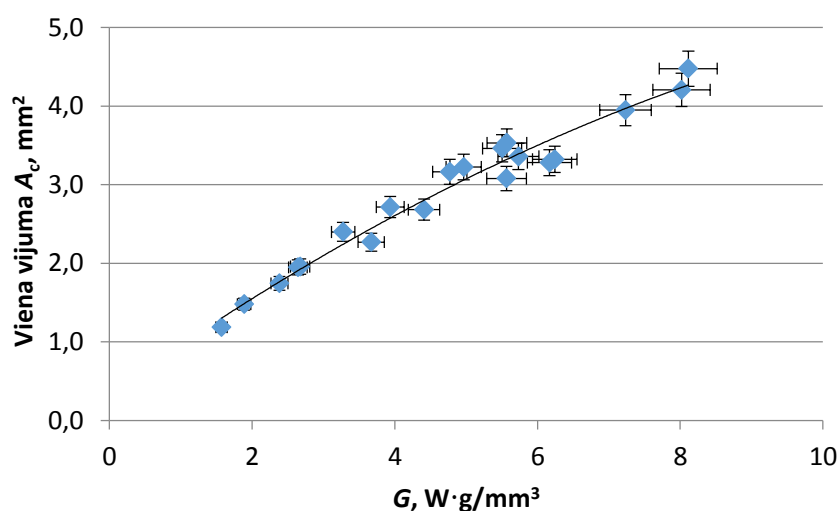
matemātiskās izteiksmes nav salīdzināmas ar citu autoru eksperimentiem, jo nav sakritības lietotajos tehnoloģiskajos parametros.

Lāzeruzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana

Analizējot lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultātus, secināts, ka iespējams ieviest jaunu lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G ($\text{W} \cdot \text{g}/\text{mm}^3$) (6.4. izteiksme), kas apraksta visus lietojamos tehnoloģiskos parametrus vienā.

$$G = \frac{4P \sin \alpha}{\pi D^2} \cdot \frac{F_{\text{pm}}}{v}. \quad (6.4.)$$

Turklāt noskaidrots, ka parametrs G ar augstu precizitāti (96,7 %) apraksta iegūstamās A_c vērtības (6.1. att.). Tādēļ darbā secināts, ka G ērti lietojams uzkausējuma raksturlielumu aprēķināšanai (6.5. izteiksme).



6.1. att. G ietekme uz A_c , rezultāti ar 5 % kļūdu.

$$A_c = -0,02G^2 + 0,65G + 0,33. \quad (6.5.)$$

Darbā pēc 6.5. izteiksmes analogijas izstrādātas: 6.6. izteiksme H noteikšanai ar 95,3 % precizitāti; 6.7. izteiksme H_{min} prognozei ar 70 % precizitāti; 6.8. izteiksme D_c aprēķināšanai ar 81 % precizitāti.

$$H = -0,008G^2 + 0,25G + 0,2. \quad (6.6.)$$

$$H_{\text{min}} = 0,025G^2 - 0,065G + 0,58. \quad (6.7.)$$

$$D_c = 0,7G^2 - 9,77G + 43,64. \quad (6.8.)$$

Turklāt darbā atrasta sasaiste starp viena uzkausējuma A_c un H , kur H iespējams noteikt ar augstu precizitāti (95,2 %), lietojot vienkāršu lineāru izteiksmi – 6.9. izteiksmi.

$$H = 0,38A_c + 0,08. \quad (6.9.)$$

Darbā izstrādāta 6.5. izteiksmes variācija (6.10. izteiksme), kur parametra G koeficienti izteikti ar lineāru vienādojumu, ko apraksta uzkausējamā materiāla īpatsvars (ρ) un uzkausējuma efektivitāte (E_{pm} , pie $\alpha = 90^\circ$) – E_{pm}/ρ . Secināts, ka 6.10. matemātiskās izteiksmes lietojums ir plašāks nekā 6.5. izteiksmē, jo tā izvērtē dažādu materiālu un sprauslu variāciju, zinot ρ un E_{pm} vērtības.

$$A_c = \frac{\left(-1,7 \frac{E_{pm}}{\rho} + 10\right) G^2 + \left(77,83 \frac{E_{pm}}{\rho} + 1,11 \cdot 10^{-12}\right) G + \left(86,5 \frac{E_{pm}}{\rho} + 5\right)}{10\,000}. \quad (6.10.)$$

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru izvēle un aprēķins

Darbā ir izstrādātas matemātiskās izteiksmes, kas precīzi determinē iegūstamos raksturlielumus, zinot lietotos tehnoloģiskos parametrus. Šādā veidā ar augstu precizitāti iespējams noteikt raksturlielumus, bet ne tehnoloģiskos parametrus. Tādēļ darbā veikta matemātisko izteiksmju izstrāde, kas nodrošina tehnoloģisko parametru aprēķinu, lai nodrošinātu vēlamos uzkausējuma ģeometriskos raksturlielumus.

Tehnoloģiskie parametri lāzeruzkausēšanā: P , F_{pm} , v , f aizsarggāze un transportgāze, kā arī jāņem vērā iespējamā uzkausēšanas pozīcija un sprauslas leņķis α . Darbā veiktajā lāzeruzkausēšanas eksperimentā un tā analīzē noskaidroti piemērotākie tehnoloģiskie parametri: uzkausēšanas pozīcija F , sprauslas leņķis $\alpha = 90^\circ$, solis $f = 2$ mm, lāzera punkts 4 mm, transporta gāzes padeve 3 l/min un aizsarggāzes padeve 15 l/min. Minētie parametri lietojami turpmāk, un tas kalpos par bāzi tehnoloģisko parametru P un F_{pm} aprēķinam.

Ģeometriski jaunajam uzkausējuma materiāla slānim ir jānodrošina zināms slāņa augstums pēc mehāniskas pēcapstrādes, teorētiski šo augstumu nodrošina H_{min} , kas ņemts par pamatu tālākiem aprēķiniem. Darbā izstrādāta 6.11. izteiksme, ar kuras palīdzību iespējams noteikt lietojamo P , kas izteikta no 5.1. izteiksmes.

$$P = I_{LP} \frac{\pi D^2}{4 \sin \alpha}. \quad (6.11.)$$

No lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultātiem un rezultātu analīzes izdalīti atsevišķi lineāri vienādojumi – 6.12., 6.13. un 6.14. Lineārie vienādojumi iegūti pēc regresijas vienādojumu izveides.

$$I_{LP} = 37,475H + 67,54. \quad (6.12.)$$

$$H = 0,187G + 0,252. \quad (6.13.)$$

$$G = 4,81H_{min} - 0,073. \quad (6.14.)$$

Jaudas P (W) noteikšanai izmanto 6.11. izteiksmi un, ievietojot 6.12., 6.13. un 6.14. izteiksmes, iegūts vienkāršs aprēķins (6.15. izteiksme) P noteikšanai pēc nepieciešamā uzkausējuma augstuma H_{min} .

$$P = 8,42\pi D^2 (H_{min} + 2,27). \quad (6.15.)$$

Kad P zināms, lietota 6.4. izteiksme un izteikts F_{pm} (g/min), iegūstot 6.16. izteiksmi.

$$F_{pm} = \frac{Gv}{I_{LP}} = \frac{Gv\pi D^2}{P\sin\alpha}. \quad (6.16.)$$

Lietojot 6.16. un 6.14. izteiksmi, iespējams iegūt empīrisku 6.17. izteiksmi F_{pm} (g/min) noteikšanai.

$$F_{pm} = \frac{72,165\pi D^2 v (H_{min} - 0,0015)}{P}. \quad (6.17.)$$

Apakšnodaļā izstrādātās teorētiskās aprēķina izteiksmes – 6.15. un 6.17. – lietojamas lāzeruzkausēšanā pie sprauslas leņķa $\alpha = 90^\circ$, F uzkausēšanas pozīcijas, soļa $f = 2$ mm, lāzera punkta 4 mm, transporta gāzes padeves 3 l/min un aizsarggāzes padeves 15 l/min. Izteiksmes atvieglo tehnoloģiskā procesa izstrādi un tehnoloģisko parametru izvēli, jo tehnoloģiskos parametrus iespējams noteikt aprēķinu ceļā, zinot uzkausēšanas procesā nodrošināmo H_{min} vērtību.

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru aktīvā kontrole un koriģēšana uzkausēšanas procesa gaitā

Analizējot uzkausēšanas eksperimenta rezultātus, noskaidrots, ka ir nepieciešama tehnoloģisko procesu regulēšana procesa gaitā, kas nodrošinātu vienmērīgu uzkausējumu, samazinot mehāniskās apstrādes daudzumu. Industrijā tiek lietota $E-MAqS$ sistēma, kas koriģē lāzera jaudu, vadoties no uzkausēšanas apstākļiem, analizējot uzkausēšanas vannas raksturlielumu T_A . Tādējādi $E-MAqS$ sistēma nodrošina stabilus uzkausēšanas apstākļus, taču tas nedod tiešu informāciju par uzkausējuma raksturlielumiem. $E-MAqS$ sistēmā datu sasaiste ar reāliem uzkausēšanas raksturlielumiem ir iegūstama vienīgi pēc sistemātiskiem empīriskiem eksperimentiem. Tādēļ darbā izstrādātas empīriskas izteiksmes, kas nodrošina uzkausējuma augstumu H koriģēšanu procesa gaitā, pēc nepieciešamības mainot tehnoloģiskos parametrus nepieciešamā virzienā un apmērā.

Piemērotākie lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskie parametri korekcijai uzkausēšanas procesa laikā ir P vai v . Tehnoloģiski vienkāršākais veids ir koriģēt P , tas praksē jau tiek darīts ar $E-MAqS$ sistēmu, un izmaiņas ir veicamas uzreiz, tiklīdz tas ir nepieciešams. Vienīgi parametra P izmaiņas ātrums ir jāveic, nekaitējot uzkausējuma kvalitātei, tādēļ ir jāiestata P korekcijas solis un/vai minimālās un maksimālās P vērtības. Uzkausēšanas ātruma v korekcija tehniski ir iespējama uzreiz, tādēļ pie ātruma korekcijas būtu jā saglabā iespēja noteikt korekcijas soli vai paātrinājumu vai minimālās, maksimālās ātruma vērtības.

Lietojot 6.4. izteiksmi, ieviests aprēķins, kas apraksta korekcijas parametrus P_{izm} un v_{izm} , attiecīgi 6.18. un 6.19. izteiksme, kas paredzētas P vai v vērtību korekcijai reālā laikā, koriģējot tās attiecīgā apjomā un virzienā pēc aprēķinātajām P_{izm} vai v_{izm} vērtībām.

$$P_{izm} = \frac{v\pi D^2 (9,62H_{min} - 5,35H_{kontr} + 1,2)}{4F_{pm}\sin\alpha} - P. \quad (6.18.)$$

$$v_{izm} = \frac{4PF_{pm}\sin\alpha}{\pi D^2(9,62H_{min} - 5,35H_{kontr} + 1,2)} - v. \quad (6.19.)$$

Izstrādātās lāzeruzkausēšanas korekcijas izteiksmes ir teorētiskas izteiksmes, kuru precizitāte darbā nav pārbaudīta. Taču 6.18. un 6.19. izteiksmes dod informāciju par veidu, kā ir iespējama tiešsaistes tehnoloģisko parametru korekcija, ja tiek nodrošināta ticama informācija par H_{kontr} vērtībām.

Nodaļā izstrādātas matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu aprēķinam, lietojot lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G , kas apkopo visus tehnoloģiskos parametrus. Darbā ieviestas arī lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru P un F_{pm} aprēķina izteiksmes, zinot nepieciešamo uzkausējuma augstumu H_{min} . Ieviestas arī teorētiskas izteiksmes, kas paredzētas lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru P un v koriģēšanai uzkausēšanas procesa laikā, izvērtējot iegūto H_{kontr} vērtību. Minētie aprēķini nodrošina būtisku uzlabojumu tehnoloģiskā procesa izstrādē, atvieglojot to. Izstrādātās uzkausēšanas augstuma kontroles izteiksmes potenciāli nodrošina nepieciešamo uzkausējuma augstumu visam uzkausējumam, samazinot nepieciešamo pēcapstrādi.

Izstrādāto lāzeruzkausēšanas raksturlielumu prognozes izteiksmju pārbaude veikta nākamajā nodaļā, kur izteiksmes pārbaudītas ar izteiksmju izstrādi nesaistītiem eksperimentu rezultātiem, t. sk., izmantojot citu autoru publicētos eksperimentus.

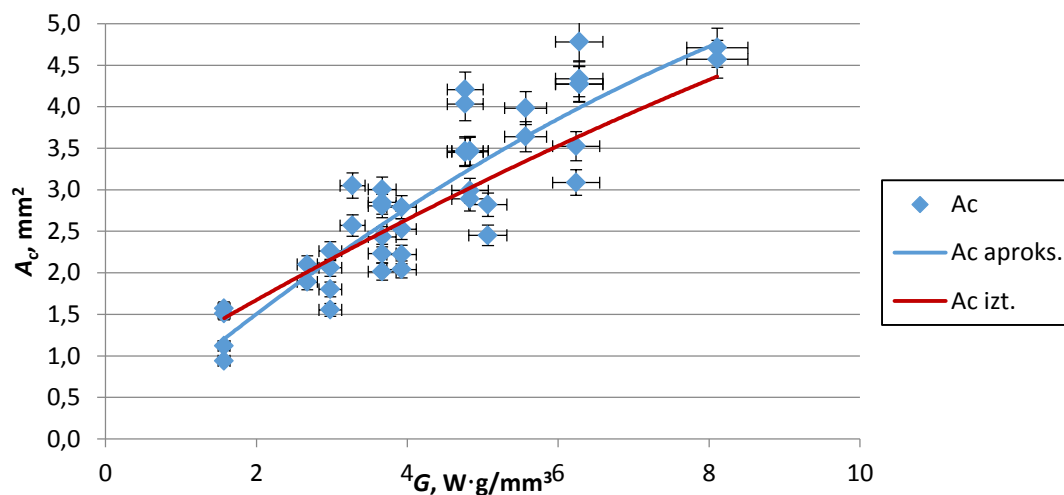
7. LĀZERUZKAUSĒŠANAS MATEMĀTISKO IZTEIKSMJU UN EKSPERIMENĀLO REZULTĀTU PĀRBAUDE

Nodaļas mērķis ir salīdzināt izstrādāto matemātisko izteiksmju aprēķinus ar eksperimenta rezultātiem, kas nav saistīti ar izteiksmju izstrādi.

Darbā veikta A_c , H un D_c izteiksmju – 6.5., 6.6. un 6.8. – precizitātes pārbaude, lietojot determinācijas koeficienta vērtības (R^2), kas aprēķināma ar 7.1. izteiksmi, kur A_c ir eksperimentā nolasītā vērtība, A_{cMod} – aprēķinātā vērtība. R^2 norāda, cik procentos gadījumu ieviestā izteiksme ar lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G izskaidro iegūtos eksperimenta rezultātus [3], [21].

$$R^2 = \left(\frac{\sum A_c \cdot A_{cMod} - \frac{\sum A_c \cdot \sum A_{cMod}}{n}}{\sqrt{\sum A_c^2 - \frac{(\sum A_c)^2}{n}} \cdot \sqrt{\sum A_{cMod}^2 - \frac{(\sum A_{cMod})^2}{n}}} \right)^2. \quad (7.1.)$$

Promocijas darbā izstrādāto lāzeruzkausēšanas izteiksmju pārbaudei izmantoti salīdzināšanas eksperimenta un literatūras avotos [4], [11], [15], [23], [25], [28] atrodamie eksperimentu rezultāti. Piemērs ar A_c rezultātu apkopošanu attēlots 7.1. attēla grafikā, kur ar sarkanu līkni ir ar 6.5. izteiksmi aprēķinātās A_c vērtības, salīdzinošā eksperimenta rezultāti atzīmēti ar ziliem punktiem (norādītas ar 5 % kļūdu), zilā līkne ir eksperimenta rezultātu kvadrātiskā aproksimācija.



7.1. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma laukumu A_c .

Noskaidrots, ka A_c aprēķins izskaidro no 82 % līdz 87 %, H izskaidro 92 %, D_c izskaidro 38 % visiem, savukārt salīdzinošā eksperimenta 62 % iegūto rezultātus (3. pielikums).

Darbā izstrādātās matemātiskās izteiksmes ir lietojamas praktiski, lai ar vienkāršu aprēķinu iegūtu augstas precizitātes lāzeruzkausēšanas raksturlielumu prognozi, tādā veidā atvieglojot un paātrinot uzkausēšanas un atjaunošanas tehnoloģiskā procesa izstrādi un samazinot operācijas laiku.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir pilnībā sasniegts pētījumam izvirzītais mērķis noskaidrot lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējumu raksturlielumiem, salīdzināt šīs tehnoloģijas un izstrādāt matemātiskās izteiksmes raksturlielumu prognozei un izpildīti sākotnēji izvirzītie uzdevumi:

- 1) veikta pieejamo materiāla virsmas uzkausēšanas tehnoloģiju vispusīga analīze;
 - 2) veikta uzkausēšanas eksperimentu un rezultātu analīze, noskaidrojot lāzeruzkausēšanas un MAG raksturlielumu atkarību no tehnoloģiskajiem parametriem, uzkausēšanas pozīcijas un sprauslas leņķa; salīdzināti MAG uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultāti;
 - 3) pārbaudīta uzkausējuma cietība un noskaidroti cietību ietekmējošākie faktori lāzeruzkausēšanā;
 - 4) noteiktas lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas tehnoloģiju matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu prognozei, un tās ir salīdzinātas ar eksperimenta rezultātiem;
 - 5) sniegtas rekomendācijas uzkausēšanas tehnoloģiju praktiskai lietošanai.
- Tādējādi ir iegūti vairāki galvenie rezultāti un secinājumi.

Tehnoloģiju analīzes rezultāti

1. Secināts, ka pie horizontāla urbuma novietojuma virsmas uzkausēšanas pozīcija jāmaina starp grīdas (F), vertikāli augšup (VU), griestu (OH) un vertikāli lejup (VD) pozīcijām.
2. Identificēts lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģisko parametru diapazons. Secināts, ka apskatītie lāzeruzkausēšanas eksperimenti veikti vienīgi grīdas (F) pozīcijā ar perpendikulāru ($\alpha = 90^\circ$) uzkausēšanas sprauslas novietojumu attiecībā pret sagatavi. Turklāt literatūras avotos netika atrasta informācija par pētījumiem, kas apskatītu urbumu uzkausēšanu, kā arī griestu (OH) pozīcijas uzkausēšanu.

Uzkausēšanas eksperimentu un rezultātu analīze

3. Noskaidrots, ka uzkausējuma augstums H galvenokārt ir atkarīgs no pievadītā materiāla daudzuma uzkausējuma zonā, ko savukārt ietekmē materiāla padeves un uzkausēšanas ātrums, kas MAG tehnoloģijas gadījumā ir stieples padeves attiecība pret uzkausēšanas ātrumu w/v , savukārt lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai pulvera padeve pret uzkausēšanas ātrumu F_{pm}/v .
4. Apstiprināts, ka MAG uzkausēšanas tehnoloģija nav piemērota mazu, lokālu uzkausējumu veidošanai, jo tā nodrošina lielas D_c un H_{min} vērtības. MAG uzkausēšanas tehnoloģija efektīvāk izmantojama pie lielu uzkausējama augstumu veidošanas, kur nav nepieciešama specializētu uzkausējuma slāņa veidošana. Turklāt secināts, ka lāzeruzkausēšanā materiāla apjoms, kas uzkausēts, ir mazāks nekā MAG tehnoloģijai, lietojot pielīdzinātus tehnoloģiskos parametrus. Tas skaidrojama ar mazāku lāzeruzkausēšanas efektivitāti.

5. Noskaidrots, ka lāzeruzkausēšanas sprauslas leņķa α variācijai ir būtiska ietekme uz uzkausējuma raksturlielumiem, jo, mainot α , tiek ietekmēta lāzera punkta intensitāte un pulvera plūsma uzkausējuma zonā. Secināts, ka piemērotākā uzkausēšanas sprauslas pozīcija ir F un sprauslas leņķis $\alpha = 90^\circ$, jo tad ir novēroti mazākie materiāla zudumi, līdz ar to uzkausēšanas efektivitāte E_{pm} ir augstāka. Turklāt pie $\alpha = 90^\circ$ iegūtais uzkausējums ir simetrisks, kas veicina vienmērīgu laukuma uzkausējumu veidošanu.
6. Secināts, ka sprauslas uzkausēšanas pozīcija būtiski ietekmē uzkausējuma raksturlielumu H , A_c un D_c vērtības, kas izteikts K_{poz} koeficientos. Ieviestie koeficienti norāda attiecīgās uzkausēšanas pozīcijas uzkausējuma raksturlielumu vērtību atšķirību no F uzkausēšanas pozīcijas. Tas nodrošina iespēju prognozēt raksturlielumu vērtību atšķirīgās uzkausēšanas pozīcijās. Veikto eksperimenta rezultātu analīze liecina, ka ar lāzeruzkausēšanu tehnoloģiju uzkausējumu iespējams nodrošināt visās nepieciešamajās uzkausēšanas pozīcijās, nodrošinot nepieciešamos uzkausējuma raksturlielumus.

Cietību ietekmējošākie faktori lāzeruzkausēšanā

7. Salīdzinot lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas paraugu šķēsgriezuma cietību vērtības, konstatēts, ka lāzeruzkausēšanas paraugiem nodrošinātas paaugstinātas cietību vērtības. Konstatēts, ka MAG uzkausēšanas paraugi, lietojot konstrukcijas tēraudam piemērotu metināšanas stiepli $G3Si1$, nodrošina $HV 250 \text{ kg/mm}^2$ cietību, kas ir 1,25 reizes augstāka cietība, salīdzinot ar bāzes materiāla $S355J2$ $HV 200 \text{ kg/mm}^2$ cietību. Savukārt lāzeruzkausēšana ar pulveri $STELLITE^{\text{®}} 6$ nodrošina $HV 550 \text{ kg/mm}^2$ cietību, kas ir 2,8 reizes lielāka cietība nekā bāzes materiālam. $STELLITE^{\text{®}} 6$ ir specializēts uzkausējuma pulveris, kura vietā lietojams arī cits uzkausējamais materiāls, lai uzlabotu uzkausējuma apstrādājamību.
8. Secināts, ka sprauslas leņķis, sprauslas pozīcija, lāzera punkta forma ietekmē uzkausējuma cietības vērtības. Lāzeruzkausēšanā, lai nodrošinātu vienmērīgas horizontālās HV vērtības, uzkausējumu jāveido ar sprauslas leņķi $\alpha = 90^\circ$. Attiecīgi, ja leņķis nav $\alpha = 90^\circ$, pulvera plūsma nav simetriska, tāpēc tādas arī veidojas uzkausējuma profila horizontālās cietību vērtības.
9. Noskaidrots, ka uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījums ir aprakstāms ar skaitlisku vērtību T_A . Savukārt pierādīts, ka T_A vērtība tieši ietekmē D_c , kas savukārt apgriezti proporcionāli ietekmē HV vērtības, jo D_c vērtību pieaugums norāda uz lielāku uzkausējuma materiāla samaisījumu ar bāzes materiālu, kas samazina iegūstamās uzkausējuma profila HV vērtības.
10. Noskaidrots, ka T_A vērtības skaitliski spēj dot indikācijas par uzkausēšanas apstākļiem, kas ietekmē uzkausējuma raksturlielumu vērtības. Potenciāli nākotnē $E-MAQS$ sistēmas datus, piemēram, T_A , var izmantot uzkausējuma raksturlielumu novērtēšanai vai mērķtiecīgai to izstrādei, veicot uzkausēšanas procesa monitoringu, analīzi un

tiešsaistes tehnoloģisko parametru adaptāciju, kas vērsta uz vēlamo mehānisko īpašību izstrādi.

11. Lāzeruzkausēšanas paraugu šķērsriezuma cietības analīze pierādīja, ka lāzeruzkausēšana nodrošina atbilstošu uzkausējuma kvalitāti, nodrošinot uzkausējumu viendabīgi, ar nelielām cietības vērtību izmaiņām uzkausējuma šķērsriezuma profilā.

Lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas tehnoloģiju matemātiskās izteiksmes

12. Empīriski izstrādātas matemātiskās izteiksmes *MAG* un lāzeruzkausēšanas raksturlielumu noteikšanai (prognozēšanai), tas veikts, lietojot uzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģiskos parametrus. *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijai lietota datu apstrādes programma *SYSTAT* matemātisko izteiksmju noteikšanai. Savukārt lāzeruzkausēšanas matemātisko izteiksmju izveidei lietota programma *Excel*, kur ieviests lāzeruzkausēšanas ietekmes parametrs G , kas apraksta lietotos lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskos parametrus. Lāzeruzkausēšanas ietekmes parametrs G izmantots par pamatu matemātisko izteiksmju veidošanai.
13. Izstrādāto matemātisko izteiksmju adekvātums pārbaudīts, lietojot determinācijas koeficientu (R^2). Secināts, ka izstrādātās matemātiskās izteiksmes uzrāda augstu precizitāti. *MAG* uzkausēšanas matemātiskās izteiksmes D_c , $H_{\min}$ un Q prognozei izskaidro 86,3 %, 97,1 % un attiecīgi 99,9 % eksperimenta rezultātu. Lāzeruzkausēšanā vienam atsevišķam uzkausējumam A_c izteiksme izskaidro no 87 % līdz 96,3 % iegūto rezultātu, H – no 84 % līdz 95,3 %, D_c – no 38 % līdz 81 % un $H_{\min}$ izskaidro 70 % iegūto rezultātu. Šeit apvienoti matemātiskās izteiksmes adekvātuma rādītāji gan no matemātiskās izstrādes, gan no autora eksperimenta rezultātiem, kas nav saistīti ar matemātisko izteiksmju izstrādi, gan no citu autoru eksperimentu rezultātiem.
14. Darbā ieviestas lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru P un F_{pm} aprēķina izteiksmes, kas nodrošina iespēju, zinot nepieciešamo uzkausējuma augstumu, aprēķināt minētos tehnoloģiskos parametrus. Turklāt darbā ieviestas teorētiskas izteiksmes, kas paredzētas lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru koriģēšanai uzkausēšanas procesa laikā, izvērtējot iegūtos tehnoloģiskos parametrus un tos nodrošinot nemainīgus visu uzkausēšanas procesa laiku.
15. Darbā izstrādātās uzkausējumu raksturlielumu prognozes matemātiskās izteiksmes uzrāda augstu precizitāti un ir lietojamas praktiskajā darbā, lai prognozētu iegūstamos rezultātus. Savukārt tehnoloģisko parametru aprēķinu un kontroles izteiksmes potenciāli atvieglo uzkausēšanas tehnoloģisko procesu izstrādi, kā arī samazina uzkausēšanas un pēcapstrādes laiku.

Rekomendācijas uzkausēšanas tehnoloģiju praktiskai lietošanai

16. Lai pēc uzkausēšanas tehnoloģijas būtu nepieciešama pēc iespējas mazāka pēcapstrāde, ir jāizveido iespējami vienmērīgāks uzkausējuma profils, kas realizējams *MAG* tehnoloģijai pie $w/v = 8,5\text{--}11$, lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai $F_{pm}/v = 28\text{--}$

65 g/m. Minētie tehnoloģiskie parametri w/v un F_{pm}/v apraksta materiāla padevi uzkausējuma zonā, kas visbūtiskāk ietekmē uzkausējuma ģeometrijas raksturlielumus H un A_c .

17. Lāzeruzkausēšanai ar koaksiāla tipa sprauslu piemērotākā uzkausēšanas pozīcija ir F , savukārt piemērotākais sprauslas leņķis ir $\alpha = 90^\circ$. Leņķi, kas atšķirīgs no $\alpha = 90^\circ$, ieteicams lietot vienīgi tad, ja ar α samazināšanu var atrisināt uzkausējamās virsmas pieejamības jautājumu, kā arī situācijā, ja jāuzkausē OH pozīcijā, pie OH lietojot $\alpha = 36^\circ$, kas ir pārbaudīts eksperimentāli.
18. Lai nodrošinātu konstantas mehāniskās īpašības, rekomendējams veikt uzkausēšanas procesa monitoringu, lietojot, piemēram, $E-MAqS$ sistēmu, kas nodrošina jaudas regulāciju procesa gaitā. Minētais nodrošina konstantus uzkausēšanas apstākļus.
19. Darba izstrādes laikā saredzēta iespēja attīstīt uzkausēšanas aprīkojumu, kas uzlabotu gan ārējo, gan iekšējo virsmu, t. sk. urbumu uzkausēšanu, nodrošinot uzkausējumu $F-VU-OH-VD$ pozīcijās. Lāzeruzkausēšanas aprīkojuma sprauslai uzkausējuma zonā jānodrošina pulvera un lāzera stara pievade ar savstarpēji nesakrītīgām asīm – atdalītām asīm, kur lāzera stars uzkausējuma zonā pievadīts zem šaura leņķa, bet uzkausēšanas pulvera pievade nodrošināta perpendikulāri bāzes materiālam ar simetrisku lāzera stara “aizēnojamu”. Minētie uzlabojumi potenciāli nodrošinātu drošu aprīkojuma ekspluatāciju, augstāku uzkausējuma kvalitāti un mazāku uzkausējuma raksturlielumu atkarību no uzkausēšanas pozīcijas. Tas sasniezams, jo lāzera optikas elementi būtu tālāk no uzkausējuma zonas un uzkausējuma profils veidotos simetrisks visās uzkausējuma pozīcijās.

Apstiprināta izvirzītā hipotēze: lāzeruzkausēšana ar pulveri sekmīgi realizējama grīdas (F) un griestu (OH) pozīcijās, un iegūstamie rezultāti ir prognozējami un mērķtiecīgi veidojami. Noskaidrots, ka OH pozīcijas uzkausējumu jāveic ar $\alpha = 36^\circ$ sprauslas $COAX12$ sagāzumu, šādi mazinot risku bojāt aprīkojumu.

Darbā veiktie pētījumi un **izdarītie secinājumi ir būtisks jaunums mašīnzinību zinātnē** un ražošanas tehnoloģijās. Zinātniskā novitāte ir eksperimentāli noskaidrotās lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju iespējas uzkausējumu realizēt visās uzkausēšanas pozīcijās un ar mainīgu sprauslas leņķi, kur iegūstami prognozējami uzkausējuma raksturlielumi. Darbā izstrādātās matemātiskās izteiksmes lietojamas ražošanā, lai samazinātu operācijas laiku.

Turpmākie soļi, kas nepieciešami lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas attīstībai, ir promocijas darbā izstrādāto matemātisko aprēķinu tālāka attīstība, rezultātus validējot ar plašākiem lāzeruzkausēšanas eksperimentiem. Nepieciešams attīstīt fleksiblas uzkausēšanas sprauslas pēc darbā sniegtajām rekomendācijām. Jāattīsta uzkausēšanas vannas monitoringa sniegto datu lietošana mehānisko īpašību prognozei un koriģēšanai uzkausēšanas procesa laikā. Nepieciešams veikt uzkausējuma mikrostruktūras analīzi, lai salīdzinātu izveidoto materiāla struktūru atsevišķām uzkausējuma zonām un noskaidrotu struktūru atkarību no pulvera plūsmas. Minētais kopumā attīstītu lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju un padarītu to pieejamāku.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Auziņš, J., Janševskis, A. Eksperimentu plānošana un analīze. Rīga: RTU Izdevniecība. 2007, 255 lpp.
2. Ratkus, A. Maģistra darbs, Ekskavatora kausa urbumu atjaunošanas tehnoloģijas pētījumi. Rīga, RTU. 2011, 99 lpp.
3. Antony, J. Design of Experiments for Engineers and Scientists. *Elsevier Science & Technology Books*. 2003, 156 p.
4. Carcel, B., Serrano, A., Zanbrono, J. Laser cladding of TiAl intermetallic alloy on Ti6Al4V. Process optimization and properties. *Physics Procedia*. 2014, Vol. 56, pp. 284–293.
5. Chattopadhyay, R. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes. *Kluwer Academic Publishers*, Hingham, USA. 2004, 392 p.
6. Cheikh, El. H., Courant, B., Branchu, S. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012, Vol. 50, pp. 413–422.
7. Choteborsky, R., Navratilova, M., and Hrabe, P. Effects of MIG process parameters on the geometry and dilution of the bead in the automatic surfacing. *Research in Agricultural Engineering*. 2011, Vol. 57, no. 2, pp. 56–62.
8. Dowden, J. M. The Theory of Laser Materials Processing: Heat and Mass Transfer in Modern Technology. *Springer Science & Business Media*. 2009, 404 p.
9. Ferozhkhana, M. M., Duraiselvamb, M., Ganesh Kumarc, K., Ravibharathd, R. Plasma Transferred Arc Welding of Stellite 6 Alloy on Stainless Steel for Wear Resistance. *Procedia Technology*. 2016, Vol. 25, pp. 1305–1311.
10. Fischer, A., Bobzin, K., (eds.) Friction, Wear and Wear Protection. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim. 2009, 758 p.
11. Guo, S., Chen, Z., Cai, D. Prediction of Simulating and Experiments for Co-based Alloy Laser Cladding by HPDL. *Physics Procedia*. 2013, Vol. 50, pp. 375–382.
12. Hofman, J. T., de Lange, D. F, Pathiraj, B., Meijer, J. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, Vol. 211, pp. 187–196.
13. Houdková, Š., Pala, Z., Smazalová, E., Vostřák, M. Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2016, 13 p.
14. Lijun, S., Guangcheng, Z., Hui, X., Xianfeng, X., Simeng, L. Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016, Vol. 24, pp. 116–124.
15. Lin Chun-Ming. Parameter optimization of laser cladding process and resulting microstructure for the repair of tenon on steam turbine blade. *Vacuum*. 2015, Vol. 115, pp. 117–123.
16. Bach, Fr.-W., Laarmann, A., and Wenz, T., (eds.). Modern Surface Technology. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim. 2006, 338 p.

17. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments, 5th Ed. *John Wiley & Sons*. 2001, 699 p.
18. Olson, D. L., Dixon, R., and Liby, A. L., (eds.). *Welding: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam. 2012, 389 p.
19. Palani, P. K., Murugan, N. Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding. *Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London Limited*. 2006, Vol. 30, pp. 669–676.
20. Petroyiannis, P. V., Pantelakis, Sp. G., Haidemenopoulos, G. N. Protective role of local Al cladding against corrosion damage and hydrogen embrittlement of 2024 aluminum alloy specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2005, Vol.44, pp. 70–81.
21. Robert, L. Mason, Richard, F. Gunst, James, L. Hess. Statistical Design and Analysis of Experiments. *Applications to Engineering and Science*, 2nd Ed. John Wiley & Sons. 2003, 728 p.
22. Robles Hernández, F. C., Okonkwo, A. O., Kadekar, V., Metz, T., Badi, N. Laser cladding: The alternative for field thermite welds life extension. *Materials and Design*. 2016, Vol. 111, pp. 165–173.
23. Saqib, S., Urbanic, R. J., Aggarwal, K. A. Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths. *Procedia CIRP* 17. 2014, pp. 824–829.
24. Singh, R., Kumar, D., Mishra, S. K., Tiwari, S. K. Laser cladding of Stallite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance. *Surface & Coatings Technology*. 2014, Vol. 251, pp. 87–97.
25. Sohrabpoor, H. Modelling and optimizing of parameters in laser powder deposition of Fe-based alloy on ASTM 36 mild Steel by ANFIS and imperialist competitive algorithm. *Optik*. 2016, Vol. 127, pp. 4031–4038.
26. Sun, Y., Hao, M. Statistic analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd: YAG laser. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012, Vol. 50, pp. 985–995.
27. Tabernero, I., Lamikiz, A., Ukar, E. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, Vol. 210, pp. 2125–2134.
28. Zhang, K., Liu, W., Shang, X. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. *Optics & Laser Technology*. 2007, Vol. 39, pp. 549–557.
29. www.esab.co.uk/, resurss apskatīts 2011. g. 20 decembrī.
30. www.lincolnelectric.com, resurss apskatīts 20.01.2017.
31. www.esab.com, resurss apskatīts 20.01.2017.
32. www.hobartbrothers.com, resurss apskatīts 20.01.2017.
33. www.nittanylasertech.com, resurss apskatīts 03.07.2014.
34. www.stellite.com/ne/home.html, resurss apskatīts 10.03.2013.
35. <http://exocor.com>, resurss apskatīts 2017. g. februārī.

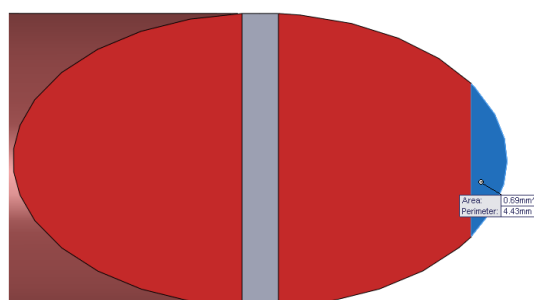
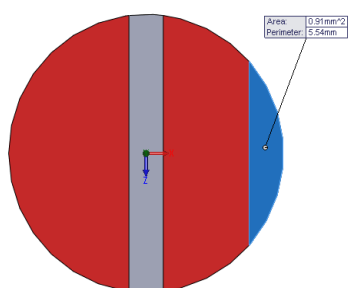
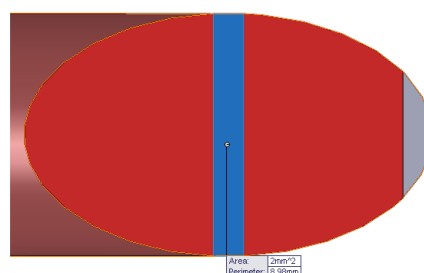
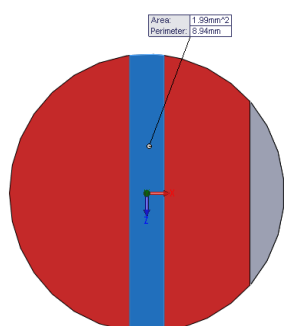
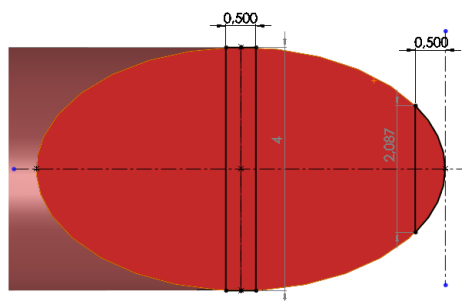
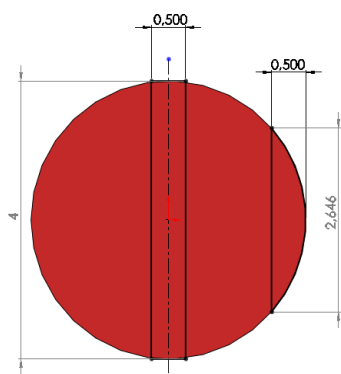
PIELIKUMI

Paraugi ar labāko uzkausējuma efektivitāti un vienmērīgāko caurkausējumu

Paraugs Nr.	U , V	v , m/min	w , m/min	w/v	C_v , %	$ p_{\text{diff}} $
5	19	0,50	7,0	14,0	71,9	0,35
7	22	0,50	7,5	15,0	70,0	0,19
14	19	0,65	7,0	10,8	78,8	0,29
16	22	0,65	7,5	11,5	76,1	0,13
23	19	0,80	7,0	8,8	85,3	0,20
25	22	0,80	7,5	9,4	70,3	0,35

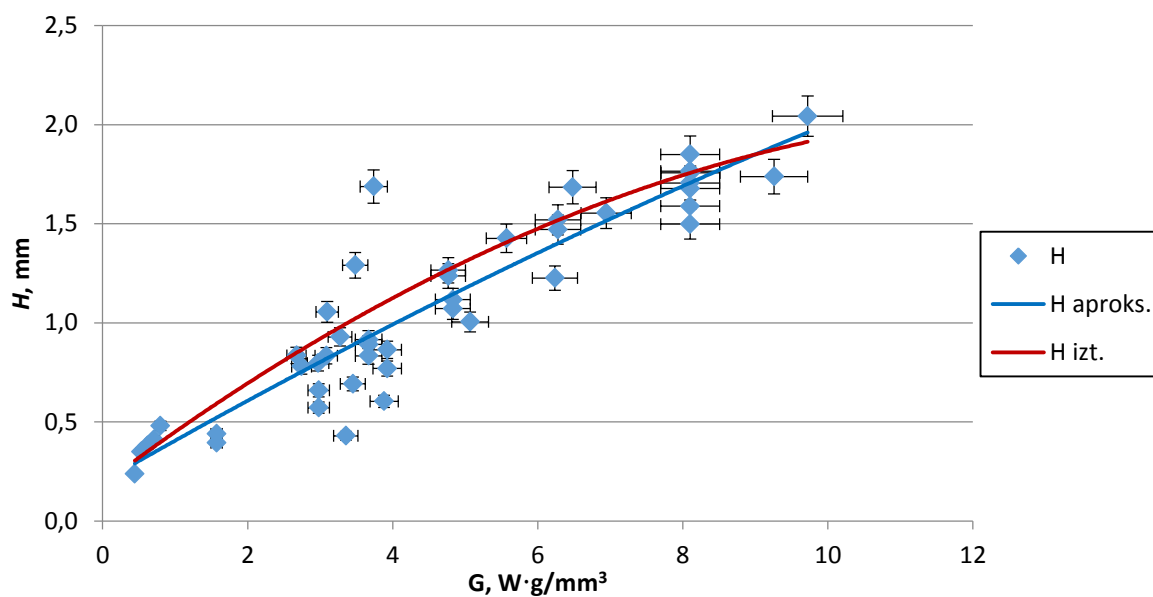
2. pielikums

Lāzera punkta segmentu garumi pie $\alpha = 90^\circ$ un $\alpha = 36^\circ$

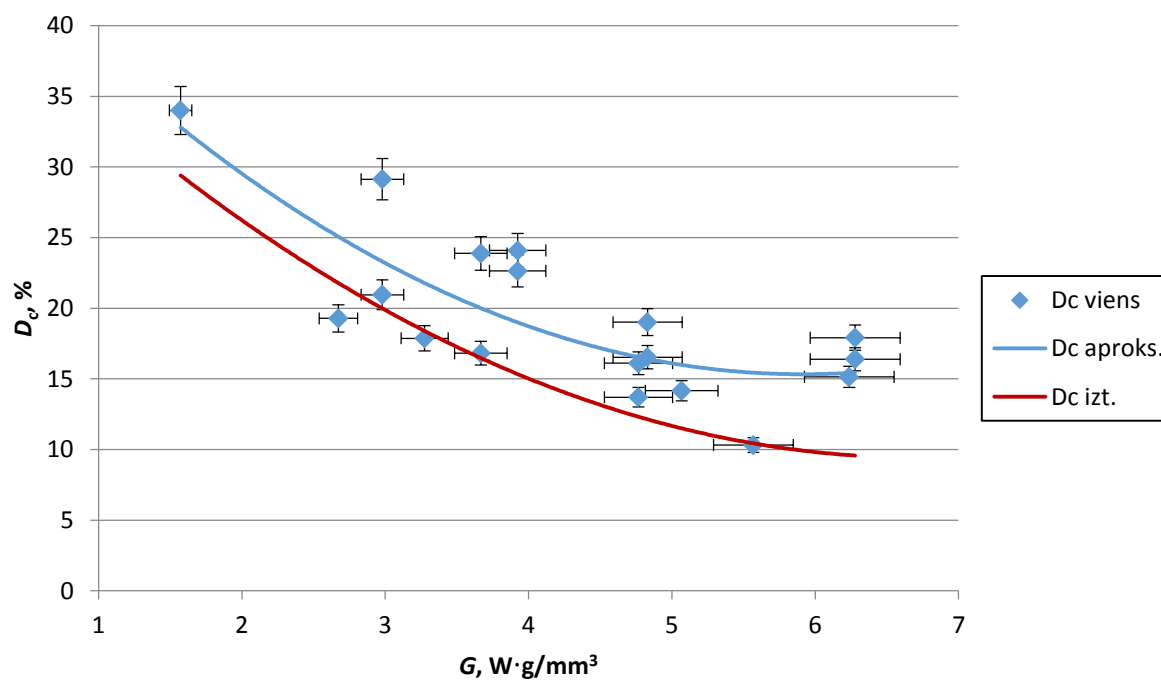


Lāzera punkta segments	Vidus	Mala	Mala
$\alpha, ^\circ$	90	90	36
$v, \text{ mm/s}$	8,33	8,33	8,33
L pie 0,5 mm segmenta, mm	4	2,646	2,087
$t, \text{ s}$	0,48	0,32	0,25
% īsāks t par 90 vidu, %	0	-34	-48

3. pielikums



Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu H , rezultāti norādīti ar 5 % kļūdu.



Parametra G ietekme uz D_c , salīdzinot modelētās vērtības un salīdzinošā eksperimenta rezultātus.