

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 darbs

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

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 apgūvē 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.

Anotācija

Attīstoties metāla virskārtas uzlabošanas tehnoloģijām, tādām kā lāzeruzkausēšana, tām kļūstot pieejamākām un fleksiblākām, palielinās ražotāju interese. Minētais rada nepieciešamību pēc jauniem un specializētiem, tehnoloģiju attīstošiem pētījumiem, kas palielina tehnoloģiju iespējas materiālu virskārtas uzlabošanas un remonta virzienos un padara tehnoloģiju saistošu plašākai industrijas daļai.

Vadoties no industrijas aktivitātēm un pieprasījuma metāla virskārtu modificēšanas jomā, izstrādāts promocijas darbs ar tēmu: “Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģiju analīze un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju pētījumi”. Promocijas darba mērķis ir piemērotākajām materiāla slāņa uzkausēšanas tehnoloģijām noskaidrot tehnoloģisko parametru un apstākļu ietekmi uz iegūstamā uzkausējuma raksturlielumiem un izstrādāt matemātiskas izteiksmes raksturlielumu prognozei. Papildus minētajam darbam izvirzīti sekojoši uzdevumi: veikt uzkausēšanas eksperimentus un rezultātu analīzi, noskaidrojot lāzeruzkausēšanas raksturlielumu atkarību no uzkausēšanas pozīcijas un sprauslas leņķa; pārbaudīt uzkausējuma cietību un noskaidrot cietību ietekmējošos faktorus lāzeruzkausēšanā; sniegt rekomendācijas tehnoloģiju praktiskai pielietošanai gan ārējo, gan iekšējo materiāla virsmu atjaunošanā.

Darbā veikta materiāla slāņa uzkausēšanas tehnoloģiju analīze, nozīmīgāko uzkausējuma raksturlielumu identificēšana, eksperimentu izstrāde un rezultātu analīze. Noskaidrots, ka lielākie tehnoloģiskie ieguvumi izstrādājuma kvalitātes un daudzpusības nodrošināšanai ir realizējami, lietojot lāzeruzkausēšanu, kas rada iespēju veidot mazus un lokālus uzkausējumus.

Noskaidrots, ka uzkausējuma raksturlielumi galvenokārt ir atkarīgi no pievadītā materiāla daudzuma uzkausējuma zonā, ko savukārt ietekmē materiāla padeves un uzkausēšanas ātrums.

Eksperimentāli apstiprināts, ka lāzeruzkausēšanas tehnoloģija ir realizējama visās uzkausēšanas pozīcijās, bet, mainot uzkausēšanas pozīciju, kā arī sprauslas leņķi, tiek ietekmēta uzkausējamā materiāla plūsma un jaudas intensitāte, kas rada uzkausējuma vannas apstākļu izmaiņu, ietekmējot uzkausējuma raksturlielumu vērtības, t.sk. mehāniskās īpašības.

Noteiktas lāzeruzkausējumu cietību vērtības un secināts, ka bāzes materiāla temperatūra, sprauslas leņķis, sprauslas pozīcija, lāzera punkta forma, uzkausējuma samaisījuma pakāpe un uzkausēšanas vannas temperatūras ietekmē uzkausējuma cietības vērtības. Savukārt uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījums apraksta uzkausējuma profila cietību vērtību raksturu.

Darbā izstrādātas matemātiskās izteiksmes, kur lāzeruzkausēšanā raksturlielumi aprakstāmi ar ieviestu jaunu lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru, kas ietver visus lietotos tehnoloģiskos parametrus. Izstrādātās matemātiskās izteiksmes būtiski uzlabo tehnoloģiju prognozējamību un tās pielietojamas ražošanā, lai samazinātu operācijas laiku un paaugstinātu izstrādājuma kvalitāti. Iegūtie rezultāti ir būtiski, jo turpmākiem pētījumiem un attīstības virzieniem ir nodrošināta plaša informācijas bāze. Darbā sniegtas praktiska rakstura rekomendācijas uzkausēšanas praktiskai realizēšanai.

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, darba mērķus un uzdevumus, 7 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 21 pielikumus, 64 attēlus, 27 tabulas, kopā 129 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 60 nosaukumi.

Abstract

With the development of metal coating renovation technologies, such as laser cladding, to make them more accessible and more flexible, the interest of manufacturers in these technologies is increasing. This has led to the need for new and specialized, technology-driven research which enhances the technology's potential for renewal and repair of materials and has made the technology more mainstream across a wider swathe of industries.

Based on these industrial activities and the need for modification of metal coatings, a doctoral thesis has been developed with the theme: "Analysis of Material Surface Renewal Technologies and Research of Laser Cladding Technology". The aim of the thesis is to clarify the influence of technological parameters and conditions on the characteristics of the coating obtained and to develop the mathematical expression for predicting the characteristics of the technologies for creating a layer of material. In addition, the following tasks have been defined: to undertake cladding experiments and analysis of the results by determining the dependence of the laser cladding characteristics on the cladding position and nozzle angle; to test the hardness of the coating and to determine the factors affecting the hardness in laser cladding; to give recommendations on the practical application of the technology for the restoration of both external and internal surface materials.

The analysis of the technology for applying layers of material, the identification of the most important characteristics of the cladding, the development of experiments and the analysis of the results were performed in this work. It has been determined that the main technological advantages of quality and universality of products are achieved by means of laser cladding, which makes it possible to create small, local cladding.

It has been assumed that the characteristics of the coating largely depend on the amount of material conveyed to the coating area which, in turn, is affected by the material feed rate and the speed of cladding.

It has been experimentally confirmed that laser cladding technology is possible for all cladding positions, but the change of the position of the cladding, along with the nozzle angle, affects the flow of the material and the power intensity, which causes changes in the geometry of melt pool and affects the values of the coating characteristics, including its mechanical qualities.

The hardness values of the laser coated materials have been determined and it was concluded that the nozzle angle, nozzle position, the shape of the laser point, the degree of coalescence of the cladding and the melt pool temperature all influence the hardness values of the cladding. In turn, the distribution of the temperature of the melt pool describes the nature of the hardness values of the cladding profile.

Mathematical expressions have been developed in this work, to describe the characteristics of the laser cladding, with the introduction of a new laser cladding impact parameter that includes all the technological parameters used. The developed mathematical expression significantly improves the predictability of the technology and its application in production, in order to shorten the time of operation and improve the quality of the product. The results

obtained are important for more extensive research and development in the field. The work provides valid recommendations for the practical realization of cladding.

The dissertation is written in Latvian, it contains an introduction, the goals and tasks of the work, 7 chapters, conclusions, a bibliography, 20 appendices, 68 figures, 27 tables and a total of 129 pages. The bibliography contains 60 titles.

SATURS

TABULU SARAKSTS	8
ATTĒLU SARAKSTS	9
PIELIKUMU SARAKSTS	11
DARBĀ IZMANTOTIE UN LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI	12
IEVADS	14
Tēmas aktualitāte	14
Problēmas nostādne	15
Darba mērķis un uzdevumi	16
1. MATERIĀLA VIRSMAS UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢIJU ANALĪZE UN PILNVEIDOŠANA	17
1.1. Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģijas	17
1.2. Atjaunošanas tehnoloģiju pilnveidošanas nepieciešamība	18
1.3. Metāla virsmas atjaunošanas tehnoloģijas	19
1.4. <i>MAG</i> uzkausēšanas tehnoloģijas apskats	21
1.5. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas apskats	24
1.6. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas aprīkojums	30
2. UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢISKO PARAMETRU UN RAKSTURLIELUMU IDENTIFICĒŠANA	37
2.1. Uzkausēšanas tehnoloģiskie parametri	37
2.2. Uzkausēšanas procesa parametri	37
2.3. Uzkausējuma raksturlielumi	38
2.4. Uzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģisko parametru matemātiskā savietojamība	41
3. <i>MAG</i> UZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS	43
3.1. <i>MAG</i> uzkausēšanas eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli	43
3.2. <i>MAG</i> uzkausēšanas eksperimenta paraugu analīze	45
3.3. <i>MAG</i> eksperimenta analītiskā daļa	45
4. LĀZERUZKAUSĒŠANAS UN <i>MAG</i> TEHNOLOĢIJU EKSPERIMENTĀLAIS SALĪDZINĀJUMS	50
4.1. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli	50
4.2. Salīdzināšanas eksperimenta apraksts	53
4.3. Salīdzināšanas eksperimenta norise	54
4.4. Salīdzināšanas eksperimenta analītiskā daļa	55
5. LĀZERUZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS UN VALIDĒŠANA	59
5.1. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta aprīkojums un parametri	59
5.2. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta apraksts	60
5.3. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta analītiskā daļa	62
5.3.1. Sprauslas soļa maiņas analīze	62
5.3.2. Sprauslas leņķa variēšanas analīze	64
5.3.3. Sprauslas pozīciju maiņas analīze	69

5.3.4.	Lāzeruzkausējuma cietības mērījumi.....	72
5.4.	Eksperimentu rezultātu ticamības validēšana	79
6.	MATEMĀTISKĀS IZTEIKSMES UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢISKO RAKSTURLIELUMU PROGNOZEI	82
6.1.	MAG uzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana	82
6.2.	Lāzeruzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana	85
6.3.	Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru aprēķina izteiksmes.....	87
6.4.	Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru aktīvā kontrole un koriģēšana uzkausēšanas procesa gaitā	89
7.	LĀZERUZKAUSĒŠANAS MATEMĀTISKO IZTEIKSMJU UN EKSPERIMENĀLO REZULTĀTU PĀRBAUDE	91
	SECINĀJUMI.....	100
	IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....	104
	PIELIKUMS	108

TABULU SARAKSTS

1.1. tabula Materiāla S355J2 ķīmiskais sastāvs	18
1.2. tabula Eksperimenta parametri [10]	22
1.3. tabula Eksperimenta parametri [23]	23
1.4. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri [13].....	28
1.5. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri [40].....	29
1.6. tabula Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru diapazons.....	30
2.1. tabula MAG uzkausēšanas eksperimenta parametri.....	41
2.2. tabula Lāzeruzkausēšanas eksperimenta parametri.....	41
3.1. tabula MAG uzkausēšanas aprīkojums un funkcija	43
3.2. tabula Metināmās stieples ISO 14341-A G3Si1 ķīmiskais sastāvs [46]	44
3.3. tabula MAG uzkausēšanas eksperimenta parametri.....	44
3.4. tabula Labākie paraugi pēc uzkausējuma efektivitātes un caurkausējuma	49
4.1. tabula Lāzeruzkausēšanas aprīkojums un funkcija	51
4.2. tabula Uzkausējamā pulvera <i>STELLITE</i> [®] 6 nominālais ķīmiskais sastāvs	52
4.3. tabula Uzkausējamā pulvera <i>STELLITE</i> [®] 6 fizikāli mehāniskās īpašības.....	52
4.4. tabula Lāzeruzkausēšanas pārbaudes eksperimenta tehnoloģiskie parametri, kas tiešā veidā pielīdzināti MAG parametriem	52
5.1. tabula Lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģiskie parametri	59
5.2. tabula Uzkausēšanas rezultātu koeficienti pie dažādām sprauslas pozīcijām	70
5.3. tabula MAG uzkausēšanas eksperimenta parauga Nr.16 rezultāta Ac variācijas koeficienta un standarta kļūdas aprēķins.....	79
5.4. tabula Parauga Nr.16 variācijas koeficients un standarta kļūda.....	80
5.5. tabula Lāzeruzkausēšanas eksperimenta cietības mērījumu variācijas koeficienta un standarta kļūdas noteikšana.....	81
6.1. tabula MAG uzkausēšanas raksturlielumu <i>ANOVA</i> analīzes dati	83
7.1. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [15]	94
7.2. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [35]	94
7.3. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [45]	95
7.4. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [23]	97
7.5. tabula Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti pie 450°C [6]	97

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att. Iekšējā cilindriskā virsma – urbums.....	17
1.2. att. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas pētījumu skaits <i>ScienceDirect</i> datu bāzē.....	21
1.3. att. Uzkausēšanas deglis [45].	21
1.4. att. Uzkausēšanas aprīkojums [45].....	22
1.5. att. Lāzeruzkausēšanas process [48].....	25
1.6. att. Lāzeruzkausēšanas procesa realizēšanas veidi [38].	25
1.7. att. Uzkausēšanas aprīkojums [54].....	26
1.8. att. Iekšējo virsmu uzkausēšanas aprīkojums [56].	26
1.9. att. Uzkausējuma augstuma (H) atkarība no lietotā lāzera punkta izmēra un lietotās jaudas (P), pie $v = 0,36$ m/min $F_{pm} = 4$ g/min [40].	29
1.10. att. Uzkausējuma platuma (W_c) atkarība no lietotā lāzera punkta izmēra un lietotās jaudas (P), pie $v = 0,36$ m/min $F_{pm} = 4$ g/min [40].....	29
1.11. att. Iekšējo uzkausējumu sprausla <i>COAXid</i> [54].	31
1.12. att. Daudzfunkcionāla uzkausējumu sprausla <i>COAX12</i> [54].	32
1.13. att. <i>E-MAqS</i> fiksēto pikseļu skaits pie >1500 °C.	33
1.14. att. <i>E-MAqS</i> izveidotais uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījums.....	34
1.15. att. Lāzera stara ģeometrijas pārbaudes aprīkojums Focus Monitor FM [50].	34
1.16. att. Primes Lāzera skenēšan [50].	35
1.17. att. <i>ImageJ</i> attēla analīze, intensitātes noteikšana.	36
2.1. att. Uzkausējumu šķērsriezumu laukumu shēma; A_c – viss uzkausējumu laukums; A_{vc} – derīgais uzkausējuma laukums.....	39
2.2. att. Uzkausējuma, caurkausējuma šķērsriezuma shēma. H – uzkausējuma augstums, p – caurkausējuma dziļums, A_c – uzkausējuma laukums un A_b – caurkausējuma laukums [15].	40
3.1. att. <i>MAG</i> uzkausēšanas shēma.	44
3.2. att. Uzkausējuma, caurkausējuma modelis programmā SolidWorks.	45
3.3. att. Uzkausējuma maksimālās (H_{max}), minimālās (H_{min}) un augstumu starpības (H_{diff}) vērtību atkarība no uzkausēšanas sprieguma (U) un stieples padeves ātruma (w).	46
3.4. att. Uzkausētā šķērsriezuma laukumu – kopējā (A_c), derīgā (A_{vc}) un derīgā uzkausējuma procentuālā apjoma (C_v) atkarība no w	47
3.5. att. Derīgā uzkausējuma procentuālā apjoma (C_v), minimālā uzkausējuma augstuma (H_{min}) un uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) atkarība no materiāla daudzuma (w/v).	48
4.1. att. Eksperimenta tehnoloģiskais aprīkojums.....	50
4.2. att. Uzkausēšanas sprauslas fokusa attāluma iestatīšana.....	54
4.3. att. Nr.4 parauga uzkausējums pie $\alpha = 36^\circ$ un 2,8 mm uzkausējumu soļa.	54
4.4. att. Nr.4.1 parauga uzkausējums pie $\alpha = 36^\circ$ un 2 mm uzkausējumu soļa.	55
4.5. att. Uzkausējuma augstuma vērtības (H_{min} , H_{max} un H_{diff}) pie $f = 2,8$ mm.....	55
4.6. att. Uzkausējuma augstuma vērtības (H_{min} , H_{max} un H_{diff}) pie $f = 2$ mm.	56

4.7. att. Materiāla daudzuma F_{pm}/v un w/v ietekme uz lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas eksperimenta rezultātiem.	57
5.1. att. Uzkausējuma pozīciju shēma.	60
5.2. att. Uzkausēšanas process OH pozīcijā.	61
5.3. att. Virsskats VU un VD uzkausēšanas sprauslas pozīcijai (sprauslas iestatīšana).	61
5.4. att. Paraugu Nr.3.2 un 3.3 uzkausējums pie $\alpha = 90^\circ$ ar $f = 2,8$ mm un $f = 2$ mm soli... 62	62
5.5. att. H_{diff} atkarībā no F_{pm}/v un f , pie $\alpha = 90^\circ$ un 36° un $P = 1660$ W.....	62
5.6. att. H_{min} atkarībā no F_{pm}/v un f , pie $\alpha = 90^\circ$ un 36° un $P = 1660$ W.....	63
5.7. att. Parauga Nr.7. uzkausējuma šķērsriezuma profili pie variētām α vērtībām.	64
5.8. att. Uzkausējuma šķērsriezuma laukumu izmaiņas, mainoties α	64
5.9. att. Lāzera intensitātes ILP izmaiņas, mainoties α	65
5.10. att. Lāzera punkts sānskatā pie dažādām leņķa α vērtībām.	66
5.11. att. Lāzera punkta profila intensitātes (ILP) izmaiņa fokusā (0) un ārpus fokusa.....	66
5.12. att. Pulvera plūsmas intensitāte (IPF) pie sprauslas pozīcijas $\alpha = 90^\circ$	67
5.13. att. Pulvera plūsmas intensitāte (IPF) pie sprauslas pozīcijas $\alpha = 36^\circ$	68
5.14. att. Pulvera plūsmas intensitātes (IPF) izmaiņas atkarībā no sprauslas sagāzuma leņķa, individuālie rezultāti uzrādīti ar 5 % kļūdu.....	68
5.15. att. ILP un IPF intensitāšu izmaiņas, mainoties α	69
5.16. att. Ac rezultātu atkarība no uzkausēšanas pozīcijas paraugiem Nr.7 un Nr.8, rezultāti norādīti ar 5% kļūdu.....	70
5.17. att. Rezultātu koeficienti pie F , VU , OH un VD uzkausēšanas pozīcijām.	71
5.18. att. Cietības mērījumu shēma: 1 – vertikālais; 2 – horizontālais.	72
5.19. att. Vertikālie cietības mērījumi pie $\alpha = 36^\circ$	72
5.20. att. Uzkausējuma horizontālie cietības mērījumi pie $\alpha = 36^\circ$	73
5.21. att. Uzkausējuma horizontālie cietības mērījumi pie $\alpha = 90^\circ$	74
5.22. att. Uzkausējuma vannas temperatūras sadalījums ($E-MAqS$ vizualizācija) un uzkausējuma profils pie $\alpha = 36^\circ$ un $\alpha = 90^\circ$	75
5.23. att. Pulvera intensitātes sadalījums pie $\alpha = 36^\circ$	75
5.24. att. HV vērtību atkarība no procesa vidējām TA vērtībām pie $\alpha = 36^\circ$	76
5.25. att. Dc vērtību atkarība no TA un α	77
5.26. att. HV vērtību atkarība no Dc	77
6.1. att. Nomērītās un aprēķinātās H_{min} vērtības.....	84
6.2. att. G parametra ietekme uz Ac , atsevišķie mērījumi norādīti ar 5 % kļūdu.	85
6.3. att. Uzkausējuma augstuma (H) atkarība no uzkausējuma laukuma (Ac), atsevišķie rezultāti norādīti ar 5% kļūdu.....	86
7.1. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma laukumu Ac , rezultāti ar 5 % kļūdu.....	92
7.2. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu H	95
7.3. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu H , rezultāti norādīti ar 5 % kļūdu. .	96
7.4. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma samaisījuma pakāpi Dc , rezultāti ar 5 % kļūdu.	98

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums Materiāla S355J2 fizikālās īpašības. Metināmās stieples ISO 14341–A G3Si1 ķīmiskais sastāvs	109
2. pielikums Uzkausēšanas sprausla <i>COAX12</i>	110
3. pielikums <i>E-MAqS</i> uzkausēšanas uzraudzības sistēma	111
4. pielikums Primes Laser Diagnose Focus Monitor FM aprīkojums	112
5. pielikums MAG metināmais aprīkojums „FRONIUS TransPlus Synergic 3200”	113
6. pielikums Tehnoloģiskais aprīkojums „SUPERCOMBINATA 40/1”	114
7. pielikums Laserline GmbH diožu lāzers LDF 20000-200 specifikācija	115
8. pielikums KUKA Roboter GmbH KR 60 HA specifikācija	116
9. pielikums GTV GmbH MF –PF 2/2 specifikācija	117
10. pielikums MAG uzkausēšanas eksperimenta analītiskās daļas matemātiskās izteiksmes	118
11. pielikums HIGHYAG Lasertechnologies Optiskais kabelis	119
12. pielikums Laserline GmbH optikas specifikācija	120
13. pielikums Lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas salīdzināšanas eksperimenta analītiskās daļas matemātiskās izteiksmes	121
14. pielikums Lāzera punkta konstruēšana pie $\alpha = 36^\circ$	122
15. pielikums Lāzera punkta segmenta garumi pie $\alpha = 90^\circ$ un $\alpha = 36^\circ$	123
16. pielikums MAG matemātiskā modeļa alternatīva uzkausējuma laukuma un minimālā uzkausējuma augstuma noteikšanai	124
17. pielikums Apraksts izteiksmes (6.13) izstrādāšanai	125
18. pielikums Lāzeruzkausēšanas eksperimenta un modelētās A_c vērtības determinācijas koeficienta aprēķinam (6. nodaļā) izteiksmei (7.2.)	126
19. pielikums Lāzeruzkausēšanas eksperimenta un modelētās A_c vērtības determinācijas koeficienta aprēķinam (6. nodaļā) izteiksmei (7.3.)	127
20. pielikums Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu H , salīdzinot modelētās H vērtības un citu autoru publikācijās atrodamos eksperimenta rezultātus. Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu D_c , salīdzinot modelētās D_c vērtības un citu autoru publikācijās atrodamos eksperimenta rezultātus	128
21. pielikums Parametra G ietekme uz D_c , salīdzinot modelētās vērtības un salīdzinošā eksperimenta rezultātus	129

DARBĀ IZMANTOTIE UN LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

Izmantotie saīsinājumi:

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

Izmantotie apzīmējumi:

A_b	– caurkausējuma šķērsriezuma laukums, mm ² ;
A_c	– uzkausējuma šķērsriezuma laukums, mm ² ;
α	– uzkausējuma sprauslas leņķis pret sagatavi, °;
Ar	– argons;
A_{vc}	– derīgā uzkausējuma šķērsriezuma laukums, mm ² ;
CO ₂	– ogļskābā gāze;
C_v	– uzkausējuma šķērsriezuma laukuma tehnoloģiskuma un ekonomiskuma pamatotības rādītājs, %;
D_c	– <i>Dilution</i> (angl.) – uzkausējuma un bāzes materiāla samaisījuma pakāpe, %;
E_{pm}	– pulvera uzkausējuma efektivitāte, %;
E_w	– stieples uzkausēšanas efektivitāte, %;
F_{pm}	– pulvera padeve, g/min;
F_{wcm}	– uzkausētās stieples masa, g/min;
F_{wm}	– pievadītās stieples masa, g/min;
f	– padeve jeb uzkausējuma solis, mm/apgr.;
G	– lāzeruzkausēšanas ietekmes parametrs, $\frac{W \cdot g}{mm^3}$;
G_{izm}	– lāzeruzkausēšanas ietekmes parametra korekcijas vērtība, $\frac{W \cdot g}{mm^3}$;
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 200g – HV0,2, kg/mm²;
 I – strāvas stiprums, A;
 I_{av} – procesa strāvas stiprums, A;
 I_{LP} – lāzera intensitāte, W/mm²;
 I_{PF} – pulvera plūsmas intensitāte, pulvera daudzums, kas tiek pievadīts uzkausējuma zonā – lāzera punktā, %;
 K_{poz} – uzkausēšanas pozīcijas koeficients;
 L – distance starp uzkausēšanas sprauslu un bāzes materiālu, mm;
 n – rotācijas ātrums, apgr./min;
 η – loka enerģijas pārvades efektivitāte ($MAG \eta = 0,8$);
 p – caurkausējuma dziļums, mm;
 p_{first} – pirmā uzkausējuma caurkausējuma dziļums, mm;
 p_{last} – pēdējā uzkausējuma caurkausējuma dziļums, mm;
 p_{diff} – pēdējā un pirmā caurkausējuma starpība, mm;
 P – lāzera uzkausēšanas jauda, W;
 P_{izm} – lāzera uzkausēšanas jaudas korekcija, W;
 s – standartnovirze;
 S – lāzera punkta laukums, mm²;
 $s_{\text{Ac vid}}$ – vidējā aritmētiskā standartklūda;
 ρ – īpatsvars, g/mm³;
 Q – siluma ievade bāzes materiālā, J/mm;
 $S_{0.8\text{st}}$ – uzkausēšanas stieples laukums, mm²;
 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;

IEVADS

Darba autoram, darbojoties industriālās tehnikas remonta nozarē, ir pieredze, ka remonts tiek veikts 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, nostiprinot bojātās konstrukcijas vai mezglu elementus. Bieži ir nepieciešams virsmas atjaunošanas remonts, kur tiek atjaunots bojātais materiāla slānis ar uzkausēšanas tehnoloģiju gan ārējām, gan iekšējām virsmām – urbumiem. Virsmas atjaunošana ārējām brīvi pieejamām virsmām ar uzkausēšanu realizējama fiksētā grīdas (*F*) uzkausējuma pozīcijā. Un uzkausējuma izmēru kontrole un uzkausēšanas pozīcija nesagādā tehnoloģiskus sarežģījumus. Turklāt pastāv ārējās virsmas uzkausējumi, kas jāveic manuāli uz rakšanas aprīkojuma kontakta virsmām, nodrošinot aprīkojumam jaunu nodilumizturīgu pārklājumu. Manuālam uzkausēšanas pielietojumam augsta izmēru precizitāte nav nepieciešama, jo netiek piemērota pēcapstrāde un uzkausētā – atjaunotā virsma kontaktējas vienīgi ar pārvietojamo materiālu.

Savukārt urbumu atjaunošanu jārealizē precīzi, jo uzkausējumam ir jānodrošina jauns materiāla slānis, kuru mehāniski apstrādājot un ievērojot ražotāja paredzēto izmēru pielaidi, tiek izveidota jauna sēža. Turklāt urbuma salāgojuma sēža ir korpusa, rāmja, izlices vai industriālās tehnikas kausa sastāvdaļa, kur sēžas bojājums nozīmē visa izstrādājuma bojājumu, kura nomaiņa ne vienmēr ir ekonomiski pamatota. Urbuma atjaunošana ir tehnoloģiski sarežģīta, jo urbumam ir ierobežota piekļuve, apgrūtināta uzkausējumu izmēru kontrole. Kā arī urbuma novietojums – uzkausēšanas pozīcija, ir atkarīga no lielgabarīta industriālā aprīkojuma novietojuma, kas ne vienmēr ir brīvi pārvietojams, lai nodrošinātu nemainīgu vertikālu uzkausēšanas pozīciju. Tādēļ remonta tehnoloģijās ir būtiska urbumu uzkausēšanas tehnoloģija, kur iegūtās zināšanas ir adaptējamas, lai realizētu ārējās virsmas uzkausējumus.

Tēmas aktualitāte

Aizvien pieaug industrijas pieprasījums pēc virskārtu atjaunošanas un modificēšanas tehnoloģijām, kas atjauno un uzlabo detaļu ekspluatācijas īpašības. Tāpat aktuāla ir 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 pielietotas gan ārējo, gan iekšējo virsmu atjaunošanai, lai novērstu mehānisku bojājumu vai izdilumu izstrādājumiem, kas ekspluatējami atkārtoti, un nav jāveic jauna, dārga aprīkojuma iegāde. 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, tādas kā *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 pielietojums 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, nodrošina izcilu uzkausējuma samaisījuma pakāpi un procesa kontroli.

Lāzeruzkausēšana ir populāra jaunu izstrādājumu ārējo virsmu modificēšanā, bet, tehnoloģijai kļūstot pieejamākai, to sāk plašāk pielietot arī metāla izstrādājumu remonta vajadzībām. Ņemot vērā, ka šī ir salīdzinoši jauna un moderna remonta-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 pielietojumu 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 pielietojamību, izvērtējot tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem, nodrošinot būtisku pienesumu mašīnbūves zinātnes nozarē.

Problēmas nostādne

Ekspluatējot industriālo tehniku un aprīkojumu, veidojas salāgojamo detaļu materiāla virsmas izdilumi un bojājumi, kur bojājumu risks palielinās, ja netiek ievērota ikdienas apkope – mezglu eļļošana, ja aprīkojumam lietotie materiāli nav piemēroti paredzētajai slodzei, kā arī, ja lietotais aprīkojums nav piemērots veicamajam darbam. Savlaicīgi veicot salāgojumu dilstošo elementu nomaiņu, brīvkustība tiek mazināta, bet, ja nomaiņa ir novēlota, tad izdilums – brīvkustība pastiprinās un tas bojā pamata aprīkojumu. Ir gadījumi, kad pamata aprīkojuma vai izstrādājuma nomaiņa nav rentabla, tad tiek izskatītas bojātā mezgla remonta iespējas, kur nozīmīga loma ir urbuma remonta tehnoloģijai.

Urbuma atjaunošanas tehnoloģijas pamatā ir četras nozīmīgas atjaunošanas operācijas: atjaunošanas iekārtas bāzēšana, bojājuma izvirpošana, materiāla virsmas atjaunošana un urbuma izvirpošana līdz nepieciešamajam izmēram. Jebkurai minētajai operācijai ir nozīmīga loma kvalitatīva gala rezultāta iegūšanā. Šajā darbā galvenā uzmanība tika vērsta uz materiāla virsmas atjaunošanas procesu, specializējoties uz urbumu uzkausēšanu, jo analogi pētījumi nav zināmi.

Kvalitatīvi veikta urbuma atjaunošana spēj atjaunot bojātā izstrādājuma salāgojumu sēžas un nodrošināt aprīkojumam pilnvērtīgas ekspluatācijas īpašības. Remonta laiks un izmaksas ir atkarīgas no izstrādātā un pielietotā tehnoloģiskā procesa. Tādēļ galvenais materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģiju izaicinājums ir nodrošināt prognozējamu tehnoloģisko procesu, lai uzkausējuma raksturlielumi un mehāniskās īpašības ir nosakāmas pirms uzkausējuma veikšanas ar mērķi samazināt virsmas pēcapstrādi. Tehnoloģiju prognozējamība uzlabojama, izstrādājot matemātiskās izteiksmes uzkausēšanas raksturlielumu prognozei.

Virsmas atjaunošanas tehnoloģijai ir nepieciešams nodrošināt lokālus un maza apjoma laukumu uzkausējumus, kas atsevišķos gadījumos būtiski samazina remonta laiku un materiāla izlietojumu, nodrošinot minimālu pēcapstrādi un iespēju veikt preventīvus remontus. Turklāt virsmas atjaunošanas tehnoloģiju jāspēj pielietot, adaptēt arī sarežģīti pieejamu virsmu uzkausēšanai, līdz ar to attīstot aprīkojumu, tiek paplašināta uzkausēšanas tehnoloģiju pielietojamība.

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 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 un *MAG* 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 matemātiskas izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu prognozei un salīdzināt tās ar eksperimenta rezultātiem;
5. Sniegt rekomendācijas uzkausēšanas tehnoloģiju praktiskai pielietošanai.

1. MATERIĀLA VIRSMAS UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢIJU ANALĪZE UN PILNVEIDOŠANA

Promocijas darbā apskatīta urbuma atjaunošanas tehnoloģija, orientējoties vienīgi uz materiāla virsmas uzkausēšanas operāciju, bet paturot prātā, ka pēc uzkausēšanas ir nepieciešama pēcapstrāde, lai nodrošinātu urbumam nepieciešamos ģeometriskos izmērus. Darbā pievērsta uzmanību urbumu uzkausēšanai, jo tā ir tehnoloģiski izaicinoša, bet iegūtās zināšanas izmantojamas un adaptējamas jebkādu uzkausējumu veidošanā pie apskatītajām tehnoloģijām.

Šajā nodaļā apskatīts atjaunojamais objekts, objekta materiāls un pieejamās materiāla virsmas uzkausēšanas tehnoloģijas. Kā arī apskatīti tehnoloģiju izvērtēšanas kritēriji un izskaidrota materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģiju attīstības, pilnveidošanas nepieciešamība. Turklāt ir veikts uzkausēšanas tehnoloģiju literatūras apskats un izvirzīta promocijas darba hipotēze.

1.1. Materiāla virsmas atjaunošanas tehnoloģijas

Urbums (1.1. att.) industrijā kalpo kā salāgojuma bāze: sēža tapai, slīdgultnim, kur urbums ir korpusa, rāmja, izlices vai industriālās tehnikas kausa sastāvdaļa. Lielākoties minēto aprīkojumu gabarīti ir lieli un līdz ar to urbuma novietojums, kā arī uzkausēšanas pozīcija, ir atkarīga no lielgabārīta industriālā aprīkojuma novietojuma. Jo lielie aprīkojuma izmēri to liedz iestiprināt cangās, koordinātu virpā vai citās stacionārās iekārtās, nodrošinot nemainīgu grīdas (F) vai vertikālu (V) uzkausēšanas pozīciju. Sekojoši pastāv situācijas, kad, urbumam atrodoties horizontāli (1.1. att.), un uzkausēšanu veicot pa spirāli (industrijā plaši lietots paņēmieni), uzkausēšanas pozīcija cikliski mainās starp F , vertikāli augšup (VU), griestu (OH) un vertikāli lejup (VD) pozīcijām. Minētajā horizontālā urbuma novietojuma gadījumā urbumu uzkausēšanu iespējams realizēt ar *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju, pielietojot specializētu mobilo tehnoloģisku aprīkojumu, kas apskatīta sekojošā apakšnodaļā.



1.1. att. Iekšējā cilindriskā virsma – urbums.

Industriālo iekārtu rāmju, kausu stiprinājumiem un salāgojumiem visbiežāk izmanto konstrukciju tēraudu S355J2 (LVS EN 10149-3 [42]) (1. pielikums). Materiāla ķīmiskais sastāvs iekļauts 1.1. tabulā. Šāds materiāls ir plaši pielietots labo fizikāli mehānisko īpašību, plašās pieejamības un cenas dēļ.

1.1. tabula

Materiāla S355J2 ķīmiskais sastāvs

C, % max	Si, % min	Mn, % max	P, % max	S, % max	Al, % min	Nb, % max	V, % max	Ti, % max
0,18	0,15	1,6	0,03	0,015	0,015	0,09	0,1	0,22
Nb, V un Ti kopējo daudzumu ierobežo LVS EN 10149-3 [42] no 0,15–0,15%								

Mobilā atjaunošanas tehnoloģija

Mobilās atjaunošanas tehnoloģijas nodrošina remonta iespējas lielgabarīta izstrādājumiem, jo atjaunošanas iekārta tiek bāzēta un uzstādīta uz atjaunojamā izstrādājuma. Šajā bāzēšanas operācijā tiek ievērotas visas nepieciešamās ražotāja norādītās urbuma pozīcijas, aprakstošais izmērs un pielaižu kopums. Iekārtas uzstādīšanas operācijā tiek fiksēti aprīkojuma balsti, kas netiks pārvietoti visas virsmas atjaunošanas operācijas laikā.

Kad veikta iekārtas bāzēšana un bojājuma izvirpošana, un izveidota cilindriskā virsma, ir jāizveido jauns materiāla slānis visai virsmai nepieciešamajā biezumā. Vienmērīgu materiāla pārklājumu cilindriskai virsmai iespējams nodrošināt, uzkausēšanas procesu veicot pa nepārtrauktu spirāli. Ņemot vērā, ka iekārta ir bāzēta uz lielgabarīta atjaunojamā izstrādājuma, tad rotācijas un padeves kustības ir jānodrošina materiāla uzkausēšanas sprauslai.

Noslēdzošajā operācijā ar izvirpošanas aprīkojumu atdala lieko materiāla slāni, lai iegūtu cilindrisku virsmu un nodrošinātu urbumam nepieciešamo izmēru, kas ļauj lietot oriģinālās rezerves daļas.

Iekšējo cilindrisko virsmu atjaunošana ir tehnoloģiski sarežģīta, jo urbumam ir ierobežota piekļuve, sarežģīta izmēru kontrole, kā arī urbuma novietojums ir atkarīgs no negabarīta industriālā aprīkojuma novietojuma.

Autoram, pateicoties uzņēmumam SIA “Alfis”, kas veic kausu, izliču u.c. izstrādājumu sēžu atjaunošanu, ir bijusi 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 salīdzinājumā ar bāzes materiālu S355J2 (LVS EN 10149-3).

1.2. 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 [7], [18], [26]. Remonta tehnoloģiju attīstība, t.sk. urbumu atjaunošanā, nodrošina lētāku un pieejamāku

tehnoloģiju, kas uzlabo pakalpojuma pieprasījumu. Turklāt industrija ir ieinteresēta attīstīt fleksiblu remonta tehnoloģiju, lai nodrošinātu kvalitatīvu plaša spektra pakalpojumu klāstu, resp., ar vienu tehnoloģisko iekārtu var veikt dažādus remontus. Tā attīstāma, pilnveidojama un nepieciešamības gadījumā adaptējama iekšējo un ārējo virsmu atjaunošanā, atjaunojot urbumus, slīdgultņus, vadīklas 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 pie zemes rakšanas, ostas kraušanas un ražošanas aprīkojumā, tiek pielietoti arī kuģu industrijā un naftas ieguvē, jo šādi tiktu būtiski paplašinātas atjaunošanas tehnoloģiju iespējas. Slīdgultņiem būtiski nodrošināt materiāla virskārtas nodilumizturību [8], [12], [16]. Šāds tehnoloģiju pielietojums 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 [24], 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 (5–10%) uzkausētā materiāla “atšķaidīšanu” ar bāzes materiālu [20], [32]. Lokālo bojājumu atjaunošanas pētījumi šajā darbā netiek apskatīti, bet, izprotot to nozīmību industrijā, tehnoloģiju izvēlē šāda specializēšanās iespēja tika ņemta vērā.

1.3. Metāla virsmas atjaunošanas tehnoloģijas

Kā minēts iepriekš, lai realizētu materiāla virsmas atjaunošanu un uzlabošanu, ir jālieto specializēti materiāli. Šādi materiāli ir pieejami *MAG* tehnoloģijai [57], [58], [59], bet stieples uzkausēšanas materiāla daudzveidība ir būtiski ierobežota. Turklāt autoram 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 diametra [57], [58], [59]. Turklāt ir zināms, ka *MAG* uzkausēšanas tehnoloģija veido lielu caurkausējumu, kas paaugstina D_c vērtības. Kā arī, *MAG* uzkausēšanas tehnoloģija nodrošina 2–4 mm augstu uzkausējumu iegūšanu, kas apgrūtina tehnoloģijas pielietojumu pie lokāliem un maziem uzkausējumiem, jo būtisks materiāla slānis pēcapstrādē ir jānogriež [2], [20].

Tādēļ, lai nodrošinātu plašākas variēšanas iespējas dažādu specializētu individuāli piemērotu un kombinējamu materiālu slāņu izveidošanai, nepieciešams lietot tehnoloģiju, kurā

izmanto pulvera materiālu, jo šāda tipa pievadmateriāls nodrošina plašākas materiāla izvēles un kombinācijas iespējas [20].

Industrijā ir dažādas virsmas veidošanas tehnoloģijas, kur pievadmateriāls ir pulveris, bet visas nav piemērotas lokālu, precīzi orientētu materiālu virskārtu atjaunošanai. Tādēļ darbā netika apskatītas uzsmidzināšanas tehnoloģijas LVS EN 657:2005 [41], kas iepriekšminētās prasības neizpilda, piedevām uzsmidzināšanas tehnoloģijām lielākoties jānodrošina uzsmidzināšanas distance virs 100 mm līdz atjaunojamai virsmai, ko sarežģīti realizēt grūti piekļūstamām virsmām [19], [35], [47], [49]. Tādēļ darbā meklēta iespēja eksperimentus veikt ar pulvera uzkausēšanas tehnoloģijām.

Uzkausēšana tehnoloģija tiek realizēta, lietojot standarta metināšanas tehnoloģijas, uz bāzes materiāla uznesot pilnībā vai daļēji izkausētu materiālu. Uzkausējuma un bāzes materiāla sasaiste veidojas ar caurkausējumu – izkausēta bāzes materiāla virskārta savienojas ar izkausētu uznesamo materiālu, un nodrošinot augstu savienojuma izturību. Uzkausēšanu realizējot adekvāti – ievērojot tehnoloģiskos režīmus, kā arī lietojot piemērotus uzkausējuma materiālu, caurkausējuma zona nekad nebūs vājākais posms uzkausējumā [20].

Uzkausēšanas procesu specificēšana un kvalificēšana tiek veikta pēc standarta LVS EN ISO 15614-7:2007 ([43]). Ar pulvera uzkausēšanas tehnoloģijām iespējams izveidot gan lokālus, gan laukuma uzkausējumus, ko iespējams realizēt no 0,5 mm līdz 8 mm [2], [20].

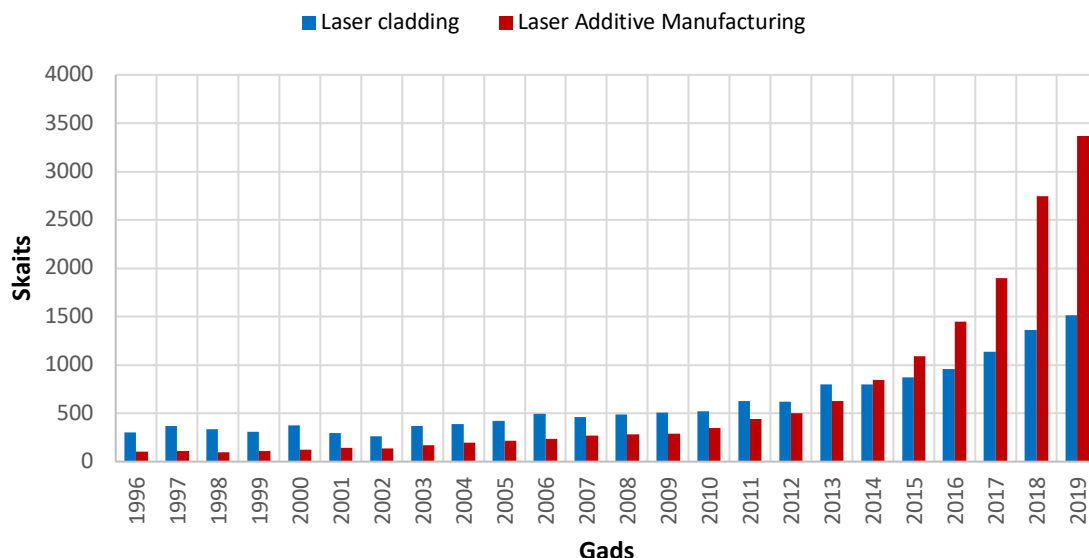
Kvalitatīva uzkausējuma izveidošanai nepieciešams procesu realizēt pusautomātiski, jo tas ir būtisks priekšnosacījums vienmērīga un kvalitatīva materiāla slāņa izveidošanai. Tas attiecas uz vienmērīgu uzkausēšanas degļa pārvietojuma realizēšanu (uzkausēšanas ātrumu v (m./min) un padevi f (mm/apgr.)), uzkausējamā materiāla un aizsarggāzes pievadi [2], [20].

Darba izstrādes procesā tika identificētas un apskatītas tikai divas pulvera uzkausēšanas tehnoloģijas, **Plazmas loka uzkausēšana (PAW – Plasma arc welding (angl.))** jeb 15. process pēc LVS EN ISO 4063:2011 [44] un **lāzeruzkausēšanas** tehnoloģija. Abas apskatītās tehnoloģijas tiek attīstītas un uzlabotas, vadoties no industrijas nepieciešamības un tehnoloģiskā progresa iespējām. Lai arī lāzeruzkausēšanas tehnoloģija ir zināma jau vairāk kā 20 gadus, tieši pēdējo gadu laikā industrija ir ieinteresēta materiāla slāņa uzkausēšanā ar lāzeruzkausēšanu, tādēļ vērojama strauja tehnoloģijas attīstība. Jo lāzeruzkausēšanas tehnoloģija ir perspektīva gan aviācijas industrijā, gan ražošanā, arī veidojot kompozītmateriālus. Pateicoties tehnoloģijas uzlabojumiem un pilnveidošanai, ir kļuvuši lētāki un pieejamāki galvenie enerģijas (*power source (angl.)*) un pārvades mezgli.

Par lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas aktualitāti industrijā iespējams pārliecināties, apskatot pētījumus *ScienceDirect* datubāzē, kas saistīti ar lāzeruzkausēšanu. Sekojoši dati apkopoti 1.2. attēla grafikā, meklējot pa gadiem lāzeruzkausēšanas pētījumus ar terminiem: *Laser Cladding* un *Laser Additive Manufacturing* (visos meklējuma laukos, lietojot “UN” funkciju starp terminu vārdiem), kas pamatā ietver lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas praktisko pielietojamību un attīstību.

Pēc 1.2. attēla grafika redzams, ka ar *Laser Cladding* tēmu 2009. gadā vēl bija ap 500 pētījumu, bet līdz 2019. gadam šo pētījumu skaits ir trīskāršojies, sasniedzot 1513 pētījumus. Straujāku industrijas intereses pieaugumu izpelnījusies *Laser Additive Manufacturing*, kur no

291 pētījuma 2009. gadā pētījumu skaits ir desmitkārtšojies, 2019.gadā sasniedzot 3371 pētījumu.



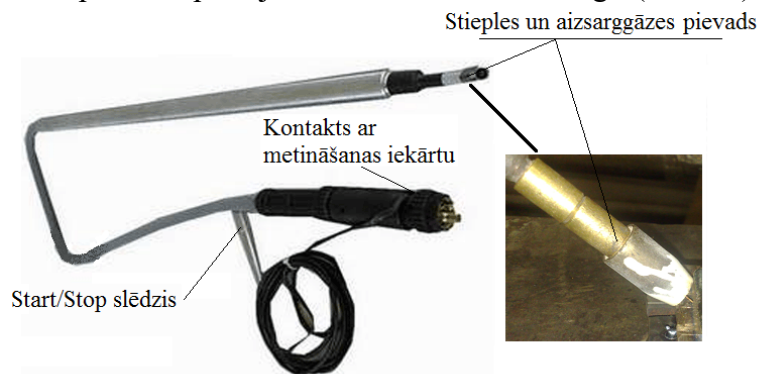
1.2. att. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas pētījumu skaits *ScienceDirect* datu bāzē.

Turklāt ar Fraunhofer IWS institūtu (Drēzdene, Vācija), kas specializējies lāzeruzkausēšanā, ir nodibināta laba sadarbība, kas darba autoram nodrošināja iespēju apgūt lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju, praktizēties uzkausēšanā, piedalīties projektu realizēšanā, kā arī izstrādāt disertācijas eksperimentālo daļu.

Tādējādi, ņemot vērā lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas potenciālu un pieejamību izpētei, darbā strādāts ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju, kā arī ar *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju. Pamatā *MAG* uzkausēšanas tehnoloģija kalpos kā references tehnoloģija, lai salīdzinātu iegūtos rezultātus ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju. Sekojošās apakšnodaļās ir veikts tehnoloģiju un literatūras apskats.

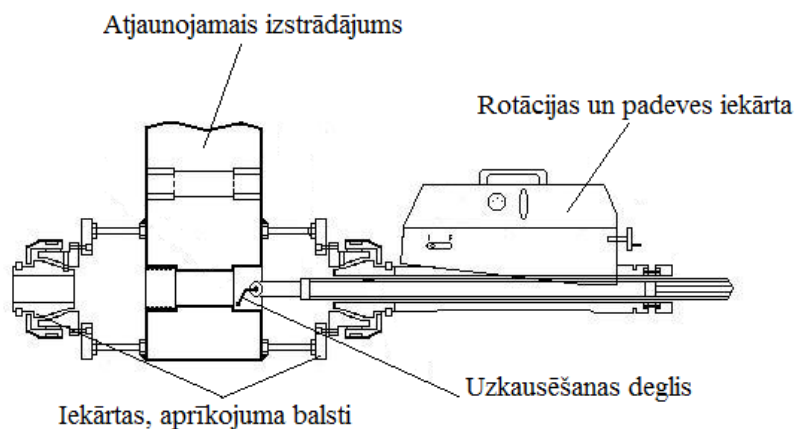
1.4. *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas apskats

Vadoties no autora pieredzes, kvalitatīvu *MAG* uzkausējuma procesa realizēšana urbumiem ir iespējams realizēt ar speciālu aprīkojumu – uzkausēšanas degli (1.3. att.).



1.3. att. Uzkausēšanas deglis [45].

Attēlā 1.3. redzamajam uzkausēšanas deglim ir jānodrošina vienmērīga rotācijas un padeves kustība, kas ļauj izveidot nepārtrauktu spirālveida uzkausējumu, pārklājot urbumu ar vienmērīgu spirālveida kustību. Degļa rotācijas un padeves kustību nodrošināšana ar iekārtu „*SUPERCOMBINATA 40/I*”, kuras uzstādīšanas un uzkausēšanas pozīcija parādīta 1.4. attēlā.



1.4. att. Uzkausēšanas aprīkojums [45].

MAG uzkausēšanā lietojamajos tehnoloģiskos parametrus, strāvas stiprumu (I , A), spriegumu (U , V) un stieples pievadi (w , m/min) nodrošina standarta metināšanas agregāts. Savukārt uzkausēšanas ātrumu (v , m/min) un uzkausējuma soli jeb padevi (f , mm/apgr.) nodrošina 1.4. attēlā redzamā rotācijas un padeves iekārta.

Literatūras avotos pieejamie uzkausēšanas eksperimenti

Minēts iepriekš, ka autors veicis eksperimentālo darbu un izstrādājis maģistra darbu [2], lietojot *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju, bet promocijas darba ietvaros apskatīti citu autoru pētījumi, lai noskaidrotu uzkausēšanas tehnoloģisko parametru diapazonu, pētījuma virzienu, kā arī pētījumos veikto datu apstrādi.

Avots 1. Literatūras avotā [10] aprakstītajā pētījumā veikts uzkausēšanas eksperiments ar *MIG* tehnoloģiju, lai noskaidrotu parametru ietekmi uz uzkausējuma augstumu (H), uzkausējuma platumu (W_c), caurkausējuma dziļumu (p) un uzkausējuma samaisījuma pakāpi (D_c , %). Pētījumā par bāzes materiālu izmantots 25 mm biezs konstrukciju tērauds (S235JR), uzkausējums veidots perpendikulāri ($\alpha = 90^\circ$) bāzes materiālam, F pozīcijā ar 1,6 mm *OK Tubrodur 15.43 tube* stiepli. Eksperimentā izveidots viens atsevišķs uzkausējums, lietojot parametrus, kas apkopoti 1.2. tabulā. Sekojoši, lietojot regresijas vienādojumu, noskaidrotas matemātiskās izteiksmes rezultāta prognozēšanai pēc lietotajiem tehnoloģiskajiem parametriem U , I un v .

1.2. tabula

Eksperimenta parametri [10]

Tehnoloģiskie parametri	Faktors				
	-2	-1	0	1	2
U , V	28	30	32	34	36
I , A	180	200	225	250	270
v , cm/min	20	30	40	50	60

Apskatot sniegto informāciju par eksperimenta [10] tehnoloģiskajiem parametriem, secināts, ka nav norādīta pilnīga informācija: nav minētas stieples padeves vērtības (w , m/min) un aizsarggāzes veids, un pievades daudzums (l/min). Turklāt eksperimentā lietota MIG tehnoloģija, kā arī 1,6 mm stieple, ko nav iespējams izmantot iekārtā „*SUPERCOMBINATA 40/I*”. Ņemot vērā iepriekš minēto, pētījums [10] neatpoguļo pilnīgu informāciju, līdz ar to pētījumā aprakstītā informācija ir izmantojama informatīvos nolūkos – izvērtējot rezultātu apkopošanu un metodoloģiju.

Avots 2. Publikācijā [23] ir izstrādātas eksperiments, kur uzkausēšana veikta uz 20 mm bieža konstrukcijas tērauda (S235JR) ar 1,2 mm pildstiepli 317L (AWS: A5-22-95; EN12073), kur procesā lietota aizsarggāze 95 % Ar un 5 % CO₂ maisījums ar padevi 16 l/min Uzkausēšanā veidots viens atsevišķs uzkausējums, kur uzkausēšana realizēta perpendikulāri ($\alpha = 90^\circ$) F pozīcijā. Eksperimentā izveidoti 20 paraugi, variējot: stāvas stiprumu (I , A), uzkausēšanas ātrumu (v , cm/min) un distanci starp uzkausēšanas sprauslu un bāzes materiālu (L , mm), lietotie parametri apkopoti 1.3. tabulā.

1.3. tabula

Eksperimenta parametri [23]

Tehnoloģiskie parametri	Faktors				
	-1,682	-1	0	1	1,682
I , A	176	190	210	230	244
v , cm/min	26	29	34	39	42
L , mm	15	17	20	23	25

Rezultātā literatūras avotā [23] izveidotajiem paraugiem noteikta uzkausējuma ģeometrija: caurkausējuma dziļums (p , mm), uzkausējuma augstums (H , mm) un uzkausējuma platums (W_c , mm), kā arī noteikta uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c , %). Un sekojoši izstrādātas matemātiskas izteiksmes raksturlielumu prognozei, lietojot regresijas vienādojumu, kas sastāv no lietotajiem tehnoloģiskajiem parametriem.

Lai arī avotā [23] ir pilnīgāka informācija, salīdzinot ar avotu [10], arī šo avotu var izmantot kā paraugu rezultātu apkopošanā un matemātisko izteiksmju izstrādē, bet nevis kā references pētījumu, kas kalpotu rezultātu salīdzināšanai.

Apakšnodaļā secināts, ka pētījumi [10], [23] var kalpot kā paraugi matemātisko izteiksmju izveidē raksturlielumu prognozei. Jo minētajos literatūras avotos veiktie eksperimenti neizvērtē laukuma uzkausēšanas aspektu un uzkausējumu veic ar iekārtai „*SUPERCOMBINATA 40/I*” nepiemērota izmēra stieplēm. Turklāt apskatītie literatūras avoti ļauj secināt, ka Maģistra darbā [2] *MAG* uzkausēšanas eksperiments ir veikts pamatoti plašā tehnoloģisko parametru diapazonā (3.3. tabulā iekļauti [2] eksperimentā lietotie tehnoloģiskie parametri). Avota [2] eksperimentā ir uzkausēts laukums (veikti vairāki sekojoši uzkausējumi), arī iegūtie paraugi uzrādīja labu kvalitāti. Būtiskākais maģistra darba trūkums ir, ka eksperiments veikts vienīgi F uzkausēšanas pozīcijā, kas samazinās lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas salīdzināšanas iespējas.

Izvērtējot minēto, avota [2] uzkausēšanas eksperiments tika izmantots disertācijas eksperimentālajā daļā, kur eksperimenta paraugi apskatīti atkārtoti, lai veiktu detalizētu paraugu raksturlielumu noteikšanu. Papildus uzkausējuma augstumam noteikts uzkausējuma un caurkausējuma laukumus, kas ļauj aprēķināt D_c . Šāda atkārtota raksturlielumu analīze nepieciešama, lai būtu iespēja izstrādāt matemātiskas izteiksmes uzkausēšanas rezultātu prognozei plašākam skaitam uzkausēšanas raksturlielumu.

1.5. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas apskats

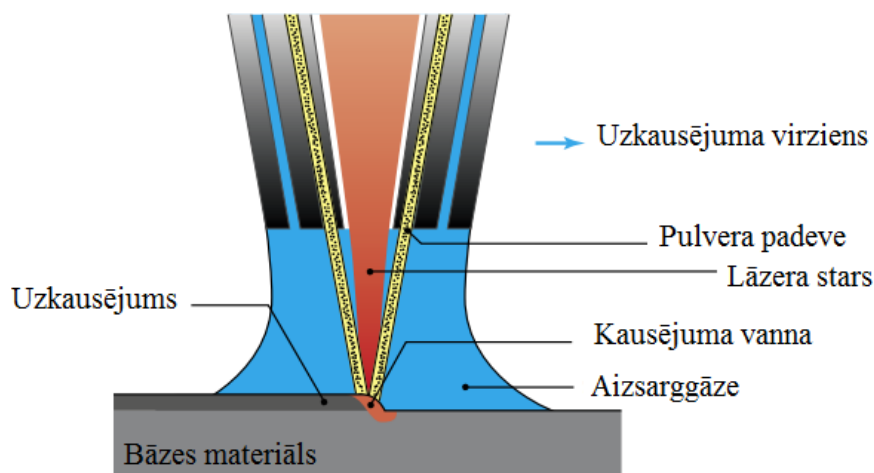
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijā lieto dažādus lāzera starojuma avotus: oglekļa dioksīdu (CO_2); cietvielu lāzeru (Nd:YAG^1), diožu un diska lāzerus, kam atšķirīgi izstarotās gaismas viļņa garumi (no 250 nm līdz 10 μm). Par jaudas avotu lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai vislabāk piemērots diožu lāzera avots, jo, salīdzinot ar citiem lāzera avotiem, diožu aprīkojums ir kompaktāks, kas nodrošina labāku stara kvalitāti. Un, pielietojot optiskos elementus, lāzera punktu izmērus iespējams mainīt plašā diapazonā, tādā veidā uzlabojot uzkausēšanas produktivitāti un fleksibilitāti. Kā arī diožu lāzeri nodrošina lielāko lāzera efektivitāti (ap 40 %), precīzu jaudas kontroli, turklāt lietotais lāzera gaismas spektrs ir ar mazāku gaismas viļņa garumu, kas nodrošina labu lāzera jaudas absorbcijas spēju plašam metālu klāstam [14], [20], [27], [38], [39].

Ar lāzeruzkausēšanu jauno materiāla kārtu iespējams iegūt biezumā no 1 mm līdz par 10 mm, kur pie maksimālajām uzkausējuma vērtībām, pēc [48], ir nepieciešams lietot tikai noteiktus materiālus un darboties ar īpašu piesardzību, jo pastāv liels iekšējais spriegums [14], [20], [27], [48].

Lāzeruzkausēšanas procesa (1.5. att.) realizēšanai ir nepieciešams liels skaits tehnoloģiskā aprīkojuma: lāzers kā jaudas avots, optika, uzkausēšanas sprausla, sprauslas vai bāzes materiāla pārvietošanas aprīkojums, kā arī pulvera un aizsarggāzes padeves aprīkojums. Optika paredzēta nepieciešamā lāzera punkta veidošanai, savukārt uzkausēšanas sprausla nodrošina pievadmateriāla, aizsarggāzes vienmērīgu pievadi – izkļiedi uzkausējuma zonā [14], [27], [38].

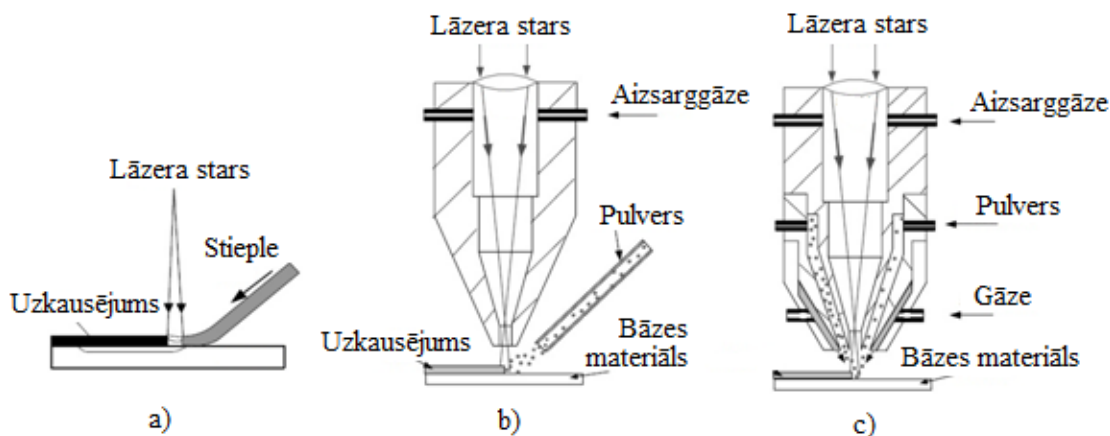
Lāzera stars no jaudas avota tiek pārvadīts pa optisku kabeli un uz bāzes materiālu novadīts caur optiskajām lēcām, kas nodrošina nepieciešamo lāzera punkta izmēru un enerģijas intensitāti uzkausējamai virsmai. Uzkausējuma zonai ir nodrošināta aizsargatmosfēra divos pamata veidos, uzkausēšanas zonā ievadītais pulveris tiek transportēts ar aizsarggāzi (Ar), kā arī aizsarggāze tiek pievadīta no lāzera optikas elementu puses, lai tos aizsargātu ar aizsarggāzes plūsmas palīdzību no pulvera iekļūšanas optikā. Sekojoši, pulveri pievadot lāzera stara rajonā, tiek veikta lāzeruzkausēšana, kur lāzera starā pievadītais pulveris tiek izkausēts kopā ar izkausētu bāzes materiāla virskārtu, kas atdziestot sacietē un veido uzkausējumu ar caurkausējuma zonu.

¹ *neodymium-doped yttrium aluminium garnet (angl.)* - neodīma legētais itrija, alumīnija kristāla lāzers



1.5. att. Lāzeruzkausēšanas process [48].

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģija realizējama trīs pamata veidos, kas atšķiras pēc uzkausējamā materiāla veida un materiāla pievadīšanas paņēmiena (1.6. att.).



1.6. att. Lāzeruzkausēšanas procesa realizēšanas veidi [38].

Uzkausēšana ar stiepli (1.6. att. a)) izceļas ar augstu uzkausējuma efektivitāti, procesa tīrību, bet ražīguma rādītāji ir zemāki, ja salīdzina ar pulvera uzkausēšanu. Ja stieples pievadi uzkausējuma procesa zonā realizē no sāna, kā redzams 1.6. a) attēlā, tad uzkausēšanu var realizēt tikai vienā virzienā. Bet uzkausējumu iespējams realizēt visos virzienos, pielietojot specializētu uzkausējuma galvu, kur stieple uzkausējuma zonā tiek ievadīta pa vidu, bet lāzera stars sākotnēji sadalīts trīs staros, bet uzkausējuma zonā sakopots ap pievadīto stiepli. Pēdējais paņemiens uzlabo procesa ražīgumu un nodrošina uzkausēšanu jebkurā virzienā, bet aprīkojuma izmērs ir būtiski lielāks, kas samazina tehnoloģijas pielietojamību grūti pieejamās vietās [17], [54].

Lāzeruzkausēšanā ar pulveri (1.6. b)), kur materiāls pievadīts no sāna, līdzīgi kā pie uzkausēšanas ar stiepli, procesa virzieni ir ierobežoti, jo visos uzkausēšanas virzienos nav garantējami vienādi uzkausēšanas apstākļi. Lai nodrošinātu iespēju uzkausējumu veikt visos virzienos, tiek lietotas koaksiālas sprauslas (1.6. c)). Koaksiālajām sprauslām ap lāzera staru tiek veidots vienmērīgs pulvera profils, kas, tuvojoties uzkausējuma zonai, pārklājas ar lāzera

staru, kas to izkausē. Vienmērīgo pulvera profilu realizē ar gredzenveida kanālu vai atsevišķiem, simetriski novietotiem punktveida kanāliem. Labākus uzkausējuma efektivitātes rādītājus iespējams nodrošināt ar gredzenveida kanālu, bet daudzveidīgākas uzkausēšanas pozīcijas iespējams realizēt ar atsevišķiem punktveida kanāliem, taču tas samazina uzkausējuma efektivitāti, ražīgumu un kvalitāti [5], [37].

Lāzeruzkausēšanā populārākā metode ir uzkausēšana ar pulveri, izmantojot koaksiāla tipa sprauslas, jo šī metode ir ražīgāka un fleksiblāka, kā arī pulvera veidā pieejamais un variējamais materiāla daudzums ir krietni lielāks, salīdzinot ar stieples materiāliem. Turklāt pieejamais pulvera uzkausēšanas tehnoloģiskais aprīkojums ir kompaktāks izmēros, kas ir aktuāli pie grūti pieejamu virsmu uzkausēšanas.

Lielākoties lāzeruzkausēšanas sistēmas ir uzstādītas uz dažāda veida CNC¹ darbagaldu vai manipulatoru bāzes (1.7. att.). Manipulatori plaši izmantoti to fleksibilitātes dēļ, kas nodrošina plašākas manipulācijas iespējas.



1.7. att. Uzkausēšanas aprīkojums [54].

Visbiežāk tiek lietots universāls lāzeruzkausēšanas aprīkojums, kas piemērots ārējo virsmu uzkausēšanai, kur būtiskāka ir uzkausēšanas ražība un efektivitātes rādītāji. Bet pastāv arī specializētu sprauslu modifikācijas, kas, piemēram, paredzētas urbumu uzkausēšanai (1.8 att.), kur aprīkojums ir kompaktāks un uzkausējuma ražības rādītāji ir zemāki.



1.8. att. Iekšējo virsmu uzkausēšanas aprīkojums [56].

¹ CNC – Computer Numerical Control (angl.)- datorvadības darbagaldi

Lāzera punkts. Uzkausējumu veidošanā lielākoties tiek lietots apaļš lāzera punkts izmēru diapazonā no 2 mm līdz 4 mm. Mazākus lāzera punkta izmērus izvēlas lokālu, precīzu uzkausēšanas procesu realizēšanā. Savukārt uzkausēšanas ražības palielināšanai tiek izmantoti lielāka izmēra lāzera punkti. Praksē tiek lietoti optikas elementi – lāzera stara homoganizētāji, kas ļauj iegūt lāzera punktu taisnstūra formā, būtiski palielinot punkta izmērus. Taisnstūra formas lāzera punkta īsākā mala atrodas uzkausēšanas garenpadeves virzienā, kas ļauj samazināt enerģijas pievadi bāzes materiālam, līdz ar to samazināt uzkausējuma samaisījuma pakāpi [27], [38].

Lāzeruzkausēšanas jauda. To izvēlas, izvērtējot lietotā lāzera punkta izmērus un lāzera jaudas intensitāti (I_{LP} , W/mm²), kas jānodrošina vismaz 70 W/mm² līdz 100 W/mm². Turklāt lāzera stara mijiedarbības laikam ar bāzes materiālu jānodrošina 0,01 s līdz 1 s, lai nodrošinātu uzkausēšanas procesu un minimālus uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) rādītājus. Savukārt uzkausēšanas pulvera daudzums jānodrošina robežās no 0,001 g/mm² līdz 0,002 g/mm². Minētie tehnoloģiskie diapazoni nav tiešie tehnoloģiskie parametri, bet šīs vērtības jāņem vērā, izvērtējot eksperimentā lietojamos tehnoloģiskos parametrus [38].

Literatūras avotos pieejamie lāzeruzkausēšanas eksperimenti

Lāzeruzkausēšanas literatūras apskatā ir aplūkoti lāzeruzkausēšanas eksperimenti, kuros publicēti eksperimenta parametri un iegūtie uzkausējuma ģeometriskie rezultāti, lai noskaidrotu citu autoru pieredzi eksperimentālajā darbā ar pulvera lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju un noteiktu lietojamos lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskos parametrus.

Avots 1. Literatūras avotā [9] publicēts lāzeruzkausēšanas eksperiments, kas veikts ar koaksiāla veida sprauslu, uzkausējot vienu uzkausējumu F pozīcijā ar $\alpha = 90^\circ$, variējot tehnoloģiskos parametrus. Eksperiments veikts ar mērķi noskaidrot tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma ģeometriju: platumu (W_c , mm), augstumu (H , mm), uzkausējuma laukumu (A_c , mm²), caurkausējuma laukumu (A_b , mm²) un caurkausējuma dziļumu (p , mm). Uzrādītie tehnoloģiskie parametri: jauda (P , W), pulvera pievade (F_{pm} , g/min) un uzkausēšanas ātrums (v , m/min). Lai arī eksperimentā parādīti visi nepieciešamie tehnoloģiskie parametri, taču no avota [9] nav pielietojami parametri P un F_{pm} , jo minētais eksperiments veikts ar ļoti mazu lāzera punkta izmēru ($\varnothing 0,53$ mm). Šāda lāzera punkta izmēri nav piemēroti lielu uzkausēšanas virsmu pārklāšanai, jo uzkausēšanas process nav produktīvs. No avota [9] parametru diapazonu noteikšanai izmantojams vienīgi lietotais uzkausēšanas ātrums (v) diapazons (0,3 m/min līdz 0,9 m/min).

Avots 2. Plānotā lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģisko parametru izvērtēšanas nolūkos apskatīts pētījums [13]. Avotā [13] detalizēti uzskaitīti lietotie tehnoloģiskie parametri, un eksperimentā noteikts uzkausējuma platums (W_c , mm) un augstums (H , mm) vienam atsevišķam uzkausējumam, kas veidots F pozīcijā pie $\alpha = 90^\circ$. Piedevām, uzkausēšanas process realizēts ar diožu lāzera avotu, lietojot optiku, kas nodrošina 4 mm lāzera punkta izmēru. Avotā minēts, ka, lietojot minēto tehnoloģisko aprīkojumu un zemāk uzskaitītos tehnoloģiskos parametrus (1.4. tabula), tiek nodrošināts uzkausējuma augstums vidēji 0,9 mm robežās.

Avotā [13] lietotie uzkausēšanas tehnoloģiskie parametri nodrošina vēlamos urbuma uzkausēšanas ģeometriskos rezultātus. Tādēļ apskatītā pētījuma parametri, kas uzskaitīti 1.4. tabulā, ņemti vērā plānotā uzkausēšanas eksperimenta parametru diapazona izvērtēšanā.

1.4. tabula

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri [13]

Paraugs	P , W	v , m/min	F_{pm} , g/min
1	1550	0,36	8
2	1550	0,54	13
3	1550	0,72	18
4	1750	0,36	8
5	1750	0,54	13
6	1750	0,72	18
7	1950	0,36	8
8	1950	0,54	13
9	1950	0,72	18

Avots 3. Aplūkojot literatūras avota [36] lāzeruzkausēšanas eksperimentā izmantos tehnoloģiskos parametrus, secināts, ka arī šajā darbā ir lietoti un minēti visi lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskie parametri (P , v , F_{pm}) un uzkausējums veikts F pozīcijā pie $\alpha = 90^\circ$. Pētījumā izvērtēta atsevišķi veidota uzkausējuma ģeometrija. Bet galvenais trūkums, kādēļ nav iespējams izmantot šo literatūras avotu – nav minēts lietotā lāzera punkta lielums. Līdz ar to nav zināma lietotās jaudas intensitāte. Vienīgais tehnoloģiskais parametrs, ko var pielietot parametru diapazonu izvērtēšanai, ir uzkausēšanas ātrums $v = 0,6$ m/min

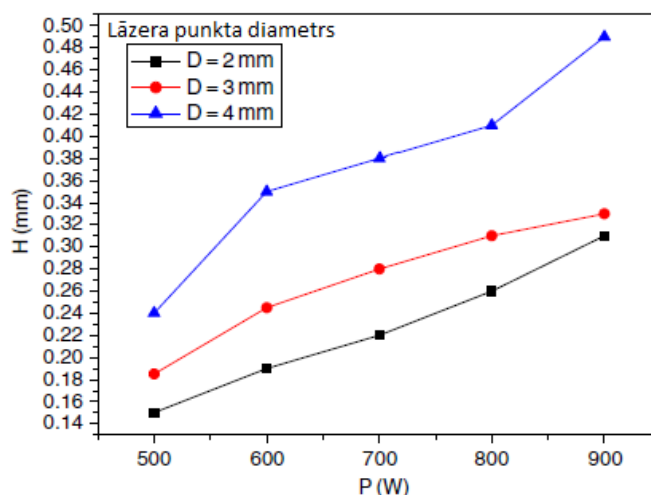
Avots 4. Līdzīga situācija ir ar [33] literatūras avotu, kur vienīgais adaptējamais raksturlielums ir uzkausēšanas ātrums, kas lietots diapazonā no 0,43 m/min līdz 0,77 m/min, piedevām uzkausējums veikts F pozīcijā pie $\alpha = 90^\circ$. Avotā [33] nav norādīts pievadītā uzkausēšanas pulvera daudzums adekvātās un atkārtojamās mērvienībās, t.i., norādīts vienīgi tehnoloģiskā aprīkojuma diska rotāciju skaits minūtē. Pulvera piegādes aprīkojuma diska rotācija ir tikai viens lielums, kas raksturo laikā pievadītā materiāla daudzumu. Darba [33] autors nav veicis pulvera piegādes aprīkojuma kalibrēšanu pie dažādiem diska rotācijas ātrumiem, lai noteiktu F_{pm} (g/min). Līdz ar to eksperiments [33] nav atkārtojams.

Avots 5. Savukārt [40] literatūras avotā ir sniegta informācija par eksperimentu, kur visi lietotie tehnoloģiskie parametri ir zināmi. Turklāt eksperimenta gaitā lāzera punkta izmēri ir variēti, lāzera punkta izmēru nodrošinot 2 mm, 3 mm un 4 mm vērtībās. Visi [40] literatūras avotā lietotie tehnoloģiskie parametru diapazoni uzskaitīti 1.5.tabulā. Uzkausējums veikts F pozīcijā pie $\alpha = 90^\circ$.

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri [40]

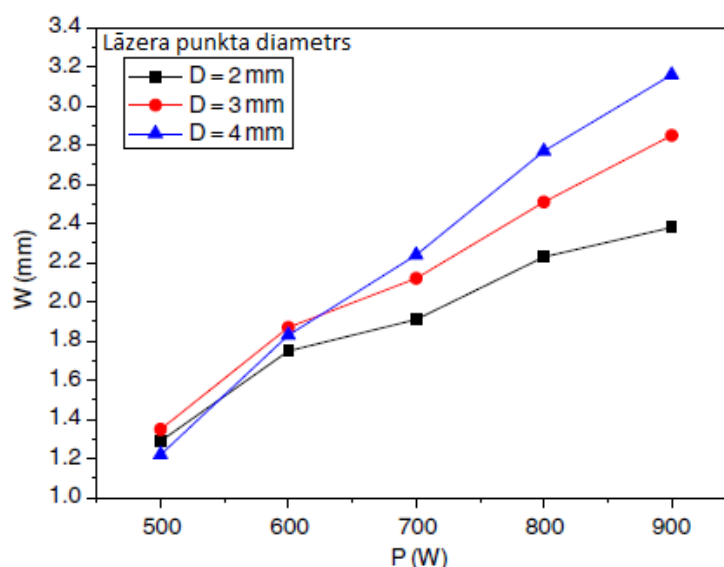
P, W	$v, m/min$	Lāzera punkta diametrs, mm	$F_{pm}, g/min$
500–900	0,12–0,6	2–4	2–10

Aplūkojot eksperimenta rezultātus, kas iegūti avotā [40], secināts, ka iegūtas mazas H vērtības (no 0,15 mm līdz 0,6 mm). Uzkausējuma augstuma vērtību atkarība no lietotās P un dažādiem lāzera punkta izmēriem parādīta 1.9. attēlā. Redzams (1.9. att.), ka, lietojot lielāko lāzera punkta izmēru (4 mm) un lielāko P , iegūstamas lielākās H vērtības.



1.9. att. Uzkausējuma augstuma (H) atkarība no lietotā lāzera punkta izmēra un lietotās jaudas (P), pie $v = 0,36$ m/min $F_{pm} = 4$ g/min [40].

Aplūkojot P un lāzera punkta izmēra ietekmi uz uzkausējuma platumu (W_c) (1.10. att.), secināts, ka pie lielākajiem lāzera punkta izmēriem iegūto uzkausējumu platums būs vislielākais, kā arī, pieaugot P , palielinās W_c .



1.10. att. Uzkausējuma platumā (W_c) atkarība no lietotā lāzera punkta izmēra un lietotās jaudas (P), pie $v = 0,36$ m/min $F_{pm} = 4$ g/min [40].

Attēlā 1.10. redzamajā grafikā iespējams novērot, pie kādām P vērtībām ir iegūstams uzkausējums, kur W_c ir platāks kā lāzera punkta diametrs: $W_c = 2$ mm pie 2 mm lāzera punkta iegūstams ar $P = 725$ W. Savukārt, lietojot 3 mm lāzera punktu, tas būtu realizējams ar $P = 950$ W, bet pie 4 mm lāzera punkta $W_c = 4$ mm būtu sasniedzamas lietojot, $P > 1100$ W. Lielākās W_c vērtības ir nepieciešamas produktīvāka procesa realizēšanai, jo nepieciešams uzkausēt virsmas laukumu, savukārt lielākās H vērtības nodrošina iespēju uzkausēt mazāk uzkausējumu slāņi. Līdz ar to secināts, ka optimāli uzkausēšanas rezultāti būtu iegūstami, lietojot 4 mm lāzera punkta izmērus pie $P > 1100$ W.

Veicot literatūras apskatu par lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju, noskaidrots, ka apskats ir pielietojams plānotā eksperimenta tehnoloģisko parametru diapazona noteikšanai. Noskaidrots, ka par P , v un lāzera punkta izmēriem pieejamajā literatūrā ir atrodama gana detalizēta informācija. Tāpat ir pieejama informācija par uzkausējuma zonā pievadītā materiāla daudzumu (F_{pm}), kas ir atkarīgs no visiem lietotajiem un iepriekš nosauktajiem uzkausēšanas parametriem. Literatūras avotā [38] minētais F_{pm} pulvera pievades daudzums ir izteikts atkarībā no lāzera punkta laukuma, kas ir robežās no 0,001 g/mm² līdz 0,002 g/mm². Savukārt analogiski izsakot F_{pm} vērtību literatūras avotos [13], [30], [40], noskaidrots, ka pievadītā materiāla diapazonu var paplašināt no 0,001 g/mm² līdz 0,011 g/mm². Minētais ņemts vērā F_{pm} tehnoloģiskā parametra diapazonu izvērtēšanā.

Lāzeruzkausēšanas literatūras apskatā pēc literatūras avotu analīzes, sekojoši 1.6. tabulā izvirzīti eksperimentālās daļas parametru diapazoni.

1.6. tabula

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru diapazons

P , W	v , m/min	L_p , mm	F_{pm} , g/min
1100–2000	0,5–0,8	4	10–33

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. Literatūras avotos netika atrasta arī informācija par eksperimentiem un pētījumiem, kas apskatītu urbumu uzkausēšanu, un netika atrasti pētījumi par lāzeruzkausēšanas procesa realizēšanu griestu (OH) uzkausēšanas pozīcijā.

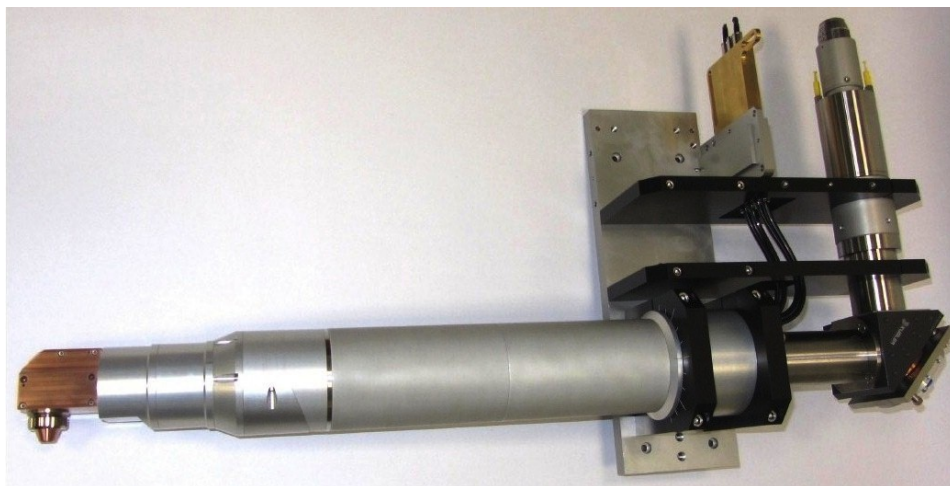
Šajā apakšnodaļā secinātais, kā arī iepriekš (1.1. nodaļā) izteiktais tehnoloģiskais izaicinājums uzkausējumu veidot urbumā pie nelabvēlīga tā novietojuma, pamato šim darbam izvirzīto **hipotēzi**: Lāzeruzkausēšana ar pulveri sekmīgi realizējama grīdas (F) un griestu (OH) pozīcijās, un iegūstamie rezultāti ir prognozējami un tehnoloģiski mērķtiecīgi veidojami.

1.6. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas aprīkojums

Apakšnodaļā apskatīts pieejamais lāzeruzkausēšanas aprīkojums, kas izmantots lāzeruzkausēšanas eksperimentālajā darbā uzkausējuma veikšanai, kā arī uzkausēšanas procesa monitorēšanai un apstākļu identificēšanai.

ERASMUS prakse¹ Fraunhofer IWS institūtā (12 mēneši) promocijas darba autoram sniedza iespēju veikt eksperimentus ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju, un lietot pasaules līmeņa lāzeruzkausēšanas aprīkojumu. Tādēļ promocijas darba izstrādē izmantots Fraunhofer IWS institūtā pieejamais tehnoloģiskais aprīkojums.

Industrijas pieprasījums pēc iekšējām lāzeruzkausējuma sprauslām nav dominējošs, tādēļ Fraunhofer IWS institūtam ir aktuāla tikai viena urbumu uzkausējumu sprausla *COAXid* (1.11. att.), kas attīstīta no iepriekšējiem sprauslu dizaina variantiem.



1.11. att. Iekšējo uzkausējumu sprausla *COAXid* [54].

COAXid sprauslas tehnoloģiskā specifikācija [54]:

1. Lietojamā lāzera jauda: līdz 3 kW;
2. Minimālais iekšējais diametrs: $\varnothing 100$ mm;
3. Sniedzamība: 375 mm (pie $\varnothing 100$ mm), ir pieejami pagarinājumi;
4. Sprauslas uzkausēšanas leņķis pret sagatavi ir konstants $\alpha = 90^\circ$;
5. Sprausla stacionāri iestatāma uzkausēšanas pozīcijā;

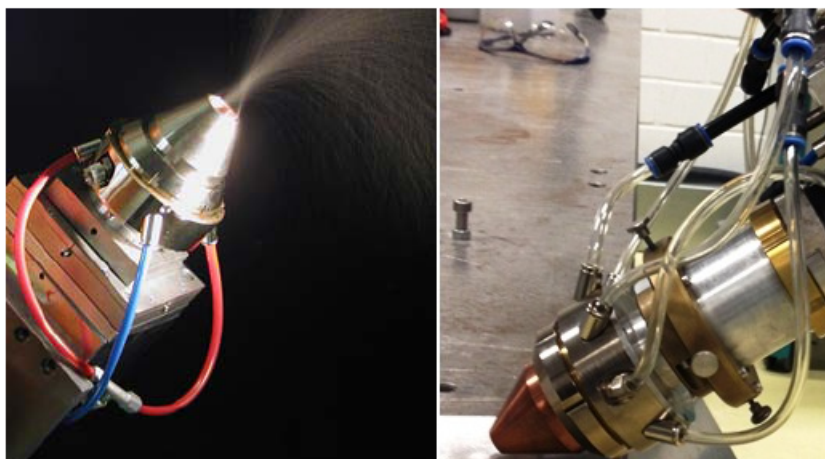
Urbumu uzkausēšana ar sprausla *COAXid* tiek veikta, sprauslu iestatot nepieciešamajā uzkausēšanas pozīcijā (F vai V, vai jebkurā nestandarta pozīcijā, kas ir starp minētajām pozīcijām) un distancē no sagataves, kur sprauslai nodrošināta vienīgi padeves kustība (f , mm/apgr.), bet sagatave iestiprināta cangās un tiek rotēta. Minētais konceptuāli atšķiras no vēlamās mobilas urbumu uzkausēšanas tehnoloģijas principiem, kur urbums ir liela aprīkojuma sastāvdaļa, un aprīkojams nav orientējams brīvi, un nav iestiprināms cangās rotācijai. Zinot, ka *COAXid* ir vienīgais pieejamais urbumu lāzeruzkausēšanas aprīkojums, pieļauta iespēja tehnoloģijas attīstības nolūkā veikt eksperimentu ar *COAXid* sprauslu urbumā, mainot uzkausēšanas pozīcijas manuāli starp *F–VU–OH–VD* pozīcijām, kur konstantā uzkausēšanas pozīcija saglabāta nemainīga vienam uzkausējamam paraugam.

Sekojošā *COAXid* tehnoloģiskā aprīkojuma piemērotības izvērtēšanas gaitā ir veiktas konsultācijas ar Fraunhofer IWS institūta speciālistiem, un sprauslai *COAXid* noskaidrots būtisks ierobežojums – sprauslai nav nevēlama *OH* uzkausēšanas pozīcija. Jo ar sprauslu

¹ ERASMUS prakses periods no 01.11.2013 – 31.10.2014

COAXid uzkausējums tiek veikts perpendikulāri uzkausējamai virsmai, un optiskie elementi (aizsargstikls, spogulis) atrodas aptuveni 30–35 mm attālumā no uzkausējuma zonas. Sprauslai ar minētajiem tehnoloģiskajiem raksturlielumiem dažkārt pat pie urbumu uzkausēšanas *F* pozīcijā, aizsarggāzes plūsmai neizdodas novērst neuzkausētā, reflektējošā stara un pulvera nokļūšanu lāzera kanālā, bojājot optiku. Bojājot optisko aizsargstiklu, tiek būtiski “aizturēta” lāzera stara virzība uz bāzes materiāla virsmu, kur daļa stara enerģijas tiek akumulēta aizsargstiklā, to sildot, vienlaicīgi samazinot uzkausējuma ražību. Ja ar šādu aizsargstikla bojājumu tiek turpināts strādāt, tad tiek būtiski samazināta uzkausējuma kvalitāte, kā arī iespējams neatgriezeniski bojāt sprauslas spoguli vai lēcu. Lai arī aprīkojumam *COAXid* ir nodrošināta pastāvīga dzesēšana, tā šādu bojājumu gadījumā nespēj novadīt radušos siltumu, kas nav normāla ekspluatācija. Tādēļ var secināt, ka lāzeruzkausēšana *OH* uzkausēšanas pozīcijā ar *COAXid* sprauslu ir pat bīstama, jo *OH* pozīcijā gravitācijas ietekmē neuzkausētās pulvera daļiņas uz aizsargstikla nonāks ar krietni lielāku varbūtību, kā pie *F* uzkausēšanas pozīcijas. Ņemot vērā iepriekš minētos *COAXid* tehnoloģiskā aprīkojuma ierobežojumus, šī sprausla netika pielietota uzkausēšanas eksperimentālās daļas realizēšanai.

Sekojoši izvērtēta iespēja eksperimentālajā darbā pielietot universālu uzkausēšanas sprauslu *COAX12* (1.12. att.), kas pamatā paredzēta ārējo virsmu uzkausēšanai, kā arī sprausla ir piemērota trīs dimensiju uzkausējumu veidošanai pie dažāda sprauslu novietojuma. Minēto ar sprauslu *COAX12* iespējams realizēt, jo pulveris uzkausēšanas zonā tiek pievadīts caur četriem kanāliem, kas simetriski novietoti ap lāzera staru, tādā veidā gravitācija maz ietekmē pulvera pārvietojumu uz uzkausējumu zonu. Turklāt aprīkojuma pozīcija, pretstatā *COAXid*, ir brīvi variējama, kā arī *COAX12* sprauslai tuvākais optiskais elements atrodas aptuveni 200 mm attālumā no uzkausējuma zonas, kas samazina potenciālo bojājuma risku. Bet sprauslas *COAX12* tehnoloģiskā aprīkojuma gabarīti ir ierobežojošais faktors grūti sasniedzamu virsmu uzkausēšanā.



1.12. att. Daudzfunkcionāla uzkausējumu sprausla *COAX12* [54].

Sprauslas *COAX12* tehniskie parametri [54] (2. pielikums):

1. Lietojamā lāzera jauda: līdz 6 kW;
2. Veidojamais uzkausējuma platums: 2–6 mm;
3. Realizējamā pulvera padeve: 10–75 g/min;
4. Uzkausēšana visos virzienos, 3D struktūru veidošana.

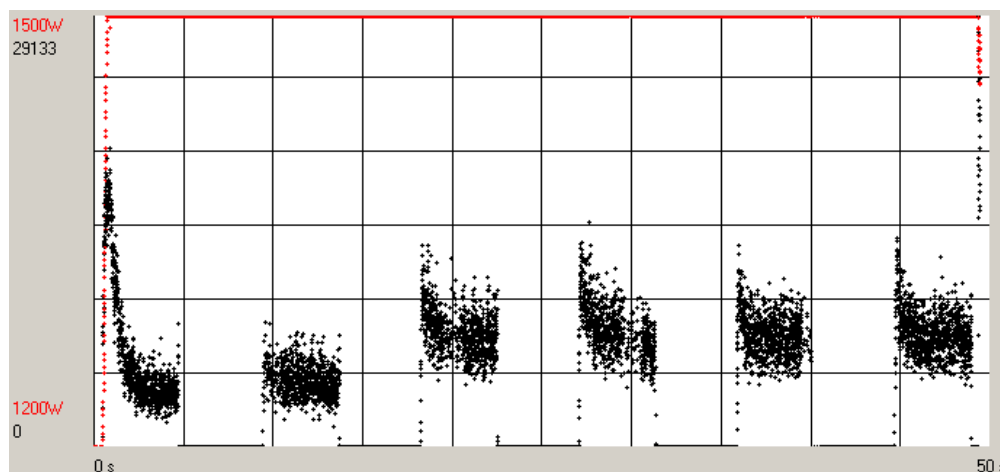
Izvērtējot aplūkoto informāciju un aprīkojuma pieejamību, eksperimentu veikšanai tika lietota *COAX12* sprausla. Lai arī sprausla *COAX12* nav radīta urbumu uzkausējumu veikšanai, eksperimentālajā darbā tika pārbaudītas un salīdzinātas būtiskās urbuma uzkausēšanas pozīcijas *F–VU–OH–VD*, kas spēs nodrošināt būtisku informāciju par lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskajām iespējām. Turklāt eksperimentā iegūtās zināšanas var palīdzēt attīstīt kompaktu, fleksiblu, kā arī urbumu uzkausēšanai piemērotu lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko aprīkojumu.

Eksperimentālajā darbā ar *COX12* sprauslu sprauslai nodrošināts sagāzuma leņķis $\alpha = 36^\circ$, kas identisks *MAG* uzkausēšanas eksperimenta sprauslas leņķim [2], lai nodrošinātu iespēju salīdzināt abu tehnoloģiju iegūtos rezultātus pie maksimāli pietuvinātiem uzkausēšanas apstākļiem *F* uzkausēšanas pozīcijā. Turklāt leņķis $\alpha = 36^\circ$ būtiski samazina aprīkojuma bojājuma risku, kad uzkausējums realizēts *OH* pozīcijā. Līdz ar to uzkausējums pozīcijās *F–VU–OH–VD* veikts ar $\alpha = 36^\circ$, lai nodrošinātu iespēju salīdzināt iegūtos rezultātus lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas ietvaros.

Uzkausēšanas procesa diagnostikas sistēma

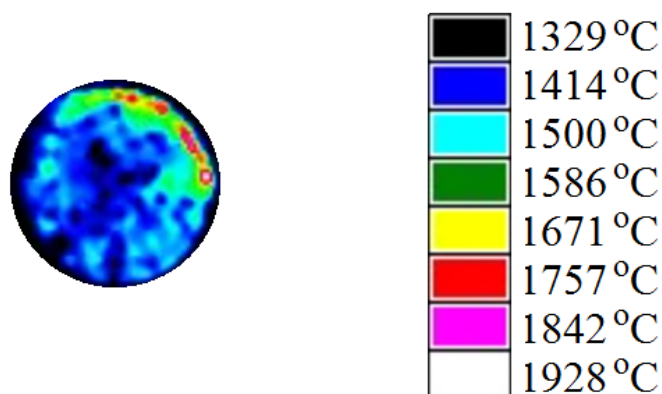
E-MAqS kameras un programmnodrošinājuma sistēma (3. pielikums), kas izstrādāta Fraunhofer IWS institūtā, paredzēta uzkausēšanas procesa apstākļu monitoringam un regulēšanai. Promocijas darba uzkausēšanas eksperimentā *E-MAqS* sistēma izmantota tikai uzkausēšanas datu nolasīšanai un tālākai apstrādei.

E-MAqS sistēma izmanto *EIA* standarta *B/W* (melnbalta) tipa kameru ar *CCD SONY ICX414* attēla skenēšanas sensoru, kas veic melnbaltā attēla pēcapstrādi, nodrošinot temperatūras lauku atpazīšanu. Pēc apstrādes katrs attēla elements – pikselis (ar izmēru $9,9 \mu m \times 9,9 \mu m$) atspoguļo aktuālās temperatūras vērtības. Turklāt ar *E-MAqS* programmatūras nodrošināto iespēju tiek uzskaitīts pikseļu skaits, kas sasniedzis minimāli norādīto temperatūru uzkausējuma vannā. Līdz ar to nosakot kausējuma vannas apstākļus – pikseļu skaitu (T_A), iegūstama informācija par uzkausējuma apstākļiem, kas dod iespēju novērot uzkausējuma apstākļu izmaiņas viena parauga ietvaros, kā arī šos apstākļus salīdzināt starp paraugiem. Sekojošos 1.13. un 1.14. attēlos ir redzami *E-MAqS* sistēmas grafiki – ar piefiksēto pikseļu skaitu un uzkausējuma apstākļu vizuālu rezultātu atspoguļojumu.



1.13. att. *E-MAqS* fiksēto pikseļu skaits pie $>1500^\circ C$.

Attēlā 1.13. redzam viena atsevišķa uzkausējuma (pirmā kolonna) un piecu sekojošu uzkausējumu vannas piefiksēto pikseļu skaitu, kas pārsniedz mērķa temperatūru. Kā redzams, tad atsevišķā un vairāku uzkausējumu pirmā uzkausējuma (1.13. attēlā otrā kolonna) vannas apstākļi ir tuvi. Bet nemainīga uzkausējuma vanna izveidojas pēc otrā uzkausējuma (trešā kolonna), kas saglabājas turpmāko uzkausējuma laiku. Atsevišķā uzkausējuma lielās sākuma pikseļu vērtības novērojamas, jo procesa sākumā pulveris nav sasniedzis savas iestatītās padeves vērtības, tiklīdz iestatītās vērtības ir sasniegtas – vannas apstākļi stabilizējas. Šis pirmā uzkausējuma sākuma vērtības netika iekļautas rezultātu izvērtēšanā.

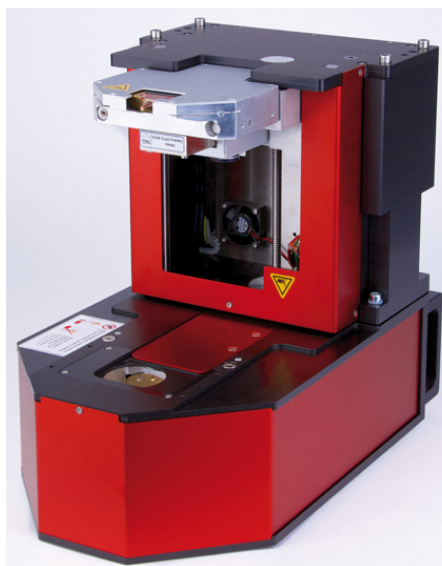


1.14. att. *E-MAqS* izveidotais uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījums.

Uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījums (1.14. att.) nodrošina papildus iespēju vizuāli novērtēt uzkausējuma apstākļus pie atšķirīgiem uzkausēšanas procesa parametriem un pozīcijām.

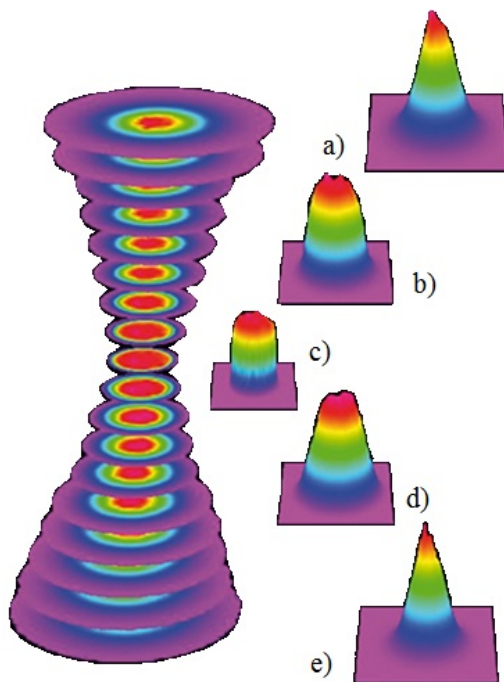
Lāzera stara diagnostikas sistēma

Lāzera stara analīzei tika izmantots Fraunhofer IWS pieejamais **Primes Laser Diagnose Focus Monitor FM** aprīkojums, kas paredzēts lāzera stara ģeometrijas pārbaudei, jaudas sadalījuma un fokusa noteikšanai (1.15. att.). Iekārta sastāv no lāzera stara skenēšanas, lāzera jaudas absorbēšanas aprīkojuma, kā arī programmas *LaserdiagnoseSoftware* informācijas analīzei un atainošanai.



1.15. att. Lāzera stara ģeometrijas pārbaudes aprīkojums Focus Monitor FM [50].

Lāzera stara skenēšana tiek veikta ar skenēšanas uzgali (4. pielikums), kam izveidots $20\ \mu\text{m}$ urbums, kas mazu daļu lāzera enerģijas pārraida uz detektoru un piefiksētais rezultāts tiek apstrādāts ar *Primes* programmnodrošinājumu. Mērīšanas shēma un uztvērējuzgalis attēlots 4. pielikumā. Skenēšana tiek veikta dažādos iestatāmos augstumos, kas ļauj detalizēti analizēt stara ģeometriju, kā arī pārbaudīt – kalibrēt lāzera fokusa attālumu un izmērus. Vizualizēts rezultāta attēlojums parādīts 1.16. attēlā.

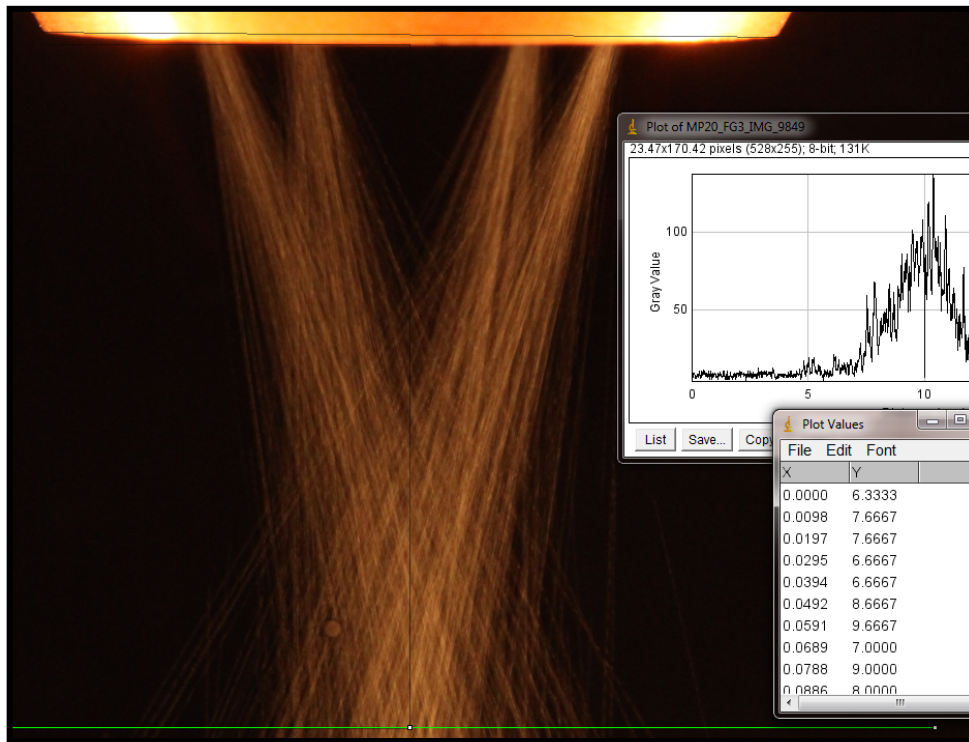


1.16. att. Primes Lāzera skenēšan [50].

Lāzera punkta jaudas intensitātes noteikšana ir nepieciešama, lai noskaidrotu lāzera fokusa pozīciju un pārlicinātos par pielietotās optikas atbilstību un precizitāti. Attēlā 1.16. redzams, ka jaudas intensitāte lāzera fokusā c) ir optimāla un vienmērīgs jaudas sadalījums ir visā punkta laukumā. Turpretim ārpusfokusa a) un e) lāzera intensitātes sadalījumā redzams, ka augstākā intensitāte ir lāzera punkta vidū, bet punkta perimetrā intensitāte ir krietni zemāka, kas būtiski ietekmē lāzeruzkausēšanas kvalitāti.

Pulvera plūsmas pārbaudes metode

Pulvera plūsma analizēta, lietojot *ImageJ* programmu (1.17. att.), apstrādājot COAX 12 sprauslas pulvera plūsmas fotouzņēmumu, kas veidota uz melna fona, pie eksperimentā lietotajiem tehnoloģiskajiem režīmiem. Pulvera plūsmas analīze veikta, lietojot programmas *ImageJ* rīku *Plot Profile*, nosakot attēla gaismas intensitāti (*Gray Value*) lāzera fokusa attālumā (zaļā līnija 1.17. att.).



1.17. att. *ImageJ* attēla analīze, intensitātes noteikšana.

Apakšnodaļā izvērtētas pieejamās lāzeruzkausēšanas sprauslas un pieņemts lēmums eksperimenta uzkausējumus veikt ar *COAX12* sprauslu fiksētās *F–VU–OH–VD* pozīcijās. Sprauslas sagāzuma leņķis $\alpha = 36^\circ$ izmantots, lai būtu droša eksperimenta veikšana *OH* pozīcijā, kā arī, lai nodrošinātu iespēju labāk salīdzināt lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas rezultātus. Turklāt apakšnodaļā apskatīts lāzeruzkausēšanas procesa, kā arī diagnostikas aprīkojums un metodika, kas izmantota promocijas darbā.

2. UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢISKO PARAMETRU UN RAKSTURLIELUMU IDENTIFICĒŠANA

Uzkausējumu ir būtiski realizēt tehnoloģiski un ekonomiski pamatotu, nodrošinot vienmērīgu uzkausējuma profilu, jo noslēdzošā apstrādē urbums vai jebkāda cita virsma tiek mehāniski apstrādāta, nodrošinot nepieciešamos izmērus. Uzkausējuma ģeometrija ietekmē apstrādē atdalāmo materiāla daudzumu un sekojoši arī operācijas ilgumu. Turklāt, uzlabojot uzkausējuma vienmērību, ir samazināma vibrācijas un citu nevēlamu faktoru ietekme mehāniskā pēcapstrādē.

Ņemot vērā iepriekš minēto un darbā izvirzīto mērķi, eksperimentāli jānoskaidro tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējumu raksturlielumiem. Šajā nodaļā identificēti tehnoloģiskie parametri, uzkausēšanas procesa parametri un uzkausējuma raksturlielumi, kas pielietoti eksperimentālajā darbā. Turklāt noteikti lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju parametri, kas savstarpēji pielīdzināmi, lai nodrošinātu iespēju tehnoloģijas savstarpēji salīdzināt.

2.1. Uzkausēšanas tehnoloģiskie parametri

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri ir atkarīgi no pielietotās tehnoloģijas, kā arī no lietotā tehnoloģiskā aprīkojuma. Abas darbā lietotās uzkausēšanas tehnoloģijas atšķiras galvenokārt ar enerģijas avotu un pievadītā materiāla veidu, tādēļ tieši šie tehnoloģiju parametri *MAG* uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģijām ir atšķirīgi.

***MAG* uzkausēšanas** eksperimentā izmantots universāls metināšanas agregāts „*FRONIUS TransPlus Synergic 3200*” (5. pielikums), 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*” (6. pielikums) nodrošina uzkausēšanas ātrumu (v , m/min) un uzkausēšanas degļa padevi jeb uzkausējuma soli (f , mm/apgr.).

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā lietots diožu lāzera enerģijas avots *Laserline GmbH: LDF 20000-200* (7. pielikums), kur iestatāma lāzera jauda (P , W). Lāzeruzkausēšanas sprauslas pārvietošanu – uzkausēšanas ātrumu (v , m/min) un uzkausējuma soli (f , mm/apgr.) nodrošina *KUKA Roboter GmbH* manipulatora roka KR 60 HA (8. pielikums). Savukārt pulvera padeves (F_{pm} , g/min) daudzums nodrošināts, lietojot pulvera padeves aprīkojumu *GTV GmbH MF-PF2/2* (9. pielikums).

2.2. Uzkausēšanas procesa parametri

Šajā apakšnodaļā uzskaitīti uzkausēšanas procesa parametri, kas noteikti uzkausēšanas procesa gaitā un apraksta uzkausēšanas procesa enerģijas daudzumu.

Uzkausējuma siltuma enerģijas daudzums (Q) (*Heat input* (angl.)) raksturo pievadīto siltuma enerģiju uzkausēšanas procesa gaitā. Šādā veidā ir iespējams salīdzināt un novērtēt divu atšķirīgu uzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģiskos parametrus. *MAG* tehnoloģijai Q tiek

aprēķināts pēc izteiksmes (2.1), kur zināma procesa vidējā strāva (I_{av}) un vidējais spriegums (U_{av}), uzkausēšanas ātrums (v , mm/min) un *MAG* loka efektivitāte (η , %) [53]. I_{av} un U_{av} ir nolasāms no metināšanas aprīkojuma uzkausēšanas procesa laikā. Savukārt lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai Q aprēķināms pēc izteiksmes (2.2), zinot uzkausējuma jaudu (P , W) un uzkausējuma ātrumu (v , mm/min) [11], [22], [53].

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

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

Uzkausēšanas vannas apstākļi – pikseļu skaits (T_A) reģistrēts, lietojot *E-MaQS* sistēmu. Sistēma lāzeruzkausēšanas procesa gaitā reģistrē attēla elementu skaitu, kuru temperatūra ir vienāda vai augstāka par iestatīto. Apkopotā informācija atspoguļo uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījumu un apstākļus. Detalizētāka informācija par sistēmu ir iekļauta 1.6. nodaļā.

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 % pievadītā materiāla ir pievadīts tieši uzkausējuma zonā.

2.3. Uzkausējuma raksturlielumi

Uzkausējuma raksturlielumi apraksta uzkausējumu ģeometriskos, raksturojošos un mehāniskos rādītājus, kas paredzēti rezultātu kvalitatīvai un kvantitatīvajai analīzei.

Uzkausējuma slāņa biezums. Nozīmīgākais uzkausējuma biezuma raksturlielums ir minimālais uzkausējuma augstums (H_{min}), jo tas apraksta jauniegūtā materiāla kārtas biezumu. Noslēdzošajā operācijā ir jāizveido cilindrisks urbums un H_{min} ir maksimālais iegūstamais slāņa augstums, kas nodrošina cilindrisku virsmu. No uzkausējuma nodrošinātās H_{min} ir atkarīgs uzkausējamo slāņu skaits, izvirpošanas operācijas veids un ilgums, kā arī operācijā lietotais instruments. H_{min} nevar kontrolēt eksperimenta gaitā, kā arī reālos remonta apstākļos. Uzkausējuma augstuma aprakstīšanai izmanto arī maksimālo slāņa augstumu (H_{max}), kā arī maksimālo un minimālo vērtību starpību vērtību (H_{diff}), kur H_{diff} būtībā ir pēcapstrādē nogriežamā materiāla kārtas. Rezultāti attēloti 2.1. attēlā un aprēķins redzams (2.3) izteiksmē.

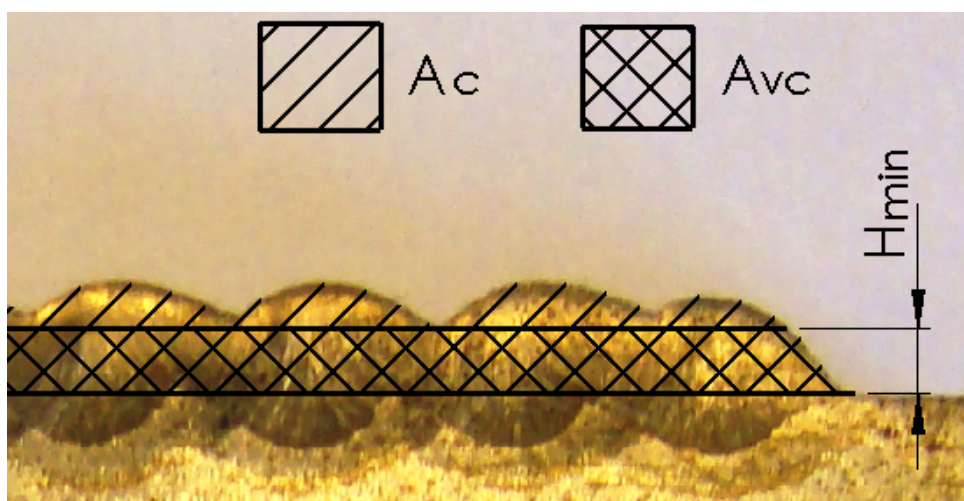
$$H_{diff} = H_{max} - H_{min}. \quad (2.3)$$

Tehnoloģiski un ekonomiski pamatotu uzkausējumu iespējams realizēt, ja tiek nodrošinātas iespējami mazākas H_{diff} vērtības. No uzkausējuma slāņa biezuma un vienmērības ir atkarīgs apstrādē atdalāmā materiāla daudzums, līdz ar to arī apstrādes operācijas ilgums un izmaksas. Turklāt, samazinot H_{diff} , reljefa viļņainumu, iespējams samazināt ciklisku slogojuma daudzumu, vibrācijas un citus nevēlamus faktorus mehāniskās apstrādes gaitā.

Uzkausējuma ekonomiskuma rādītājs. Parametrs C_v pielietojams, lai raksturotu ekonomiski pamatota uzkausējuma augstumu, kuru nosaka divu un vairāku virsmas uzkausējumiem. C_v parametrs atspoguļo derīgā uzkausējuma šķērsriezuma laukumu (A_{vc}) attiecību pret visu uzkausējuma šķērsriezuma laukumu (A_c), izteiksme (2.4). A_{vc} nodrošina 100 % materiāla piepildījumu (nodrošinot cilindrisku urbumu), tas ir uzkausējuma šķērsriezuma laukums, kas atrodas zem H_{min} . Uzkausējuma šķērsriezuma laukumu A_{vc} un A_c parametru shēma attēlota 2.1. attēlā.

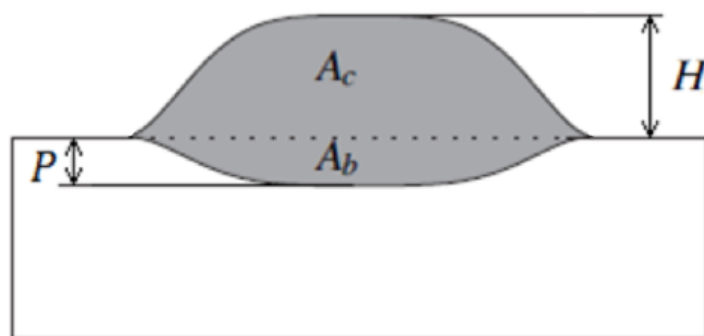
$$C_v = \frac{A_{vc}}{A_c} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

Lietojot C_v vai A_c un A_{vc} laukumu starpību, ir iespējams noteikt potenciāli nogriežamā materiāla slāņa apjomu, bet reālā pēcāpstrādē nogriežamā vienmēr būs nedaudz lielāka, jo H_{min} praksē tiks nodrošināts ar zināmu rezervi.



2.1. att. Uzkausējumu šķērsriezumu laukumu shēma; A_c – viss uzkausējumu laukums; A_{vc} – derīgais uzkausējuma laukums.

Caurkausējuma dziļums. Uzkausēšanas procesā, kā jebkurā metināšanas operācijā, veidojas izkausēta materiāla vanna, kur samaisās izkausētais bāzes materiāls ar pievadmateriālu, veidojot bāzes materiāla caurkausējumu. Caurkausējuma dziļums (p) (2.2. att.) apraksta uzkausējamā materiāla slāņa sasaistīšanās dziļumu ar bāzes materiālu. Jānodrošina vienmērīgu caurkausējumu, jo mainīgs caurkausējuma dziļums nozīmē mainīgu uznesamā materiāla slāņa sasaisti ar bāzes materiālu un teorētiski iespējami atšķirīgu uzkausējuma samaisījuma pakāpi (D_c), kas apskatīta sekojoši [15], [20], [29].



2.2. att. Uzkausējuma, caurkausējuma šķēsgriezuma shēma. H – uzkausējuma augstums, p –caurkausējuma dziļums, A_c – uzkausējuma laukums un A_b – caurkausējuma laukums [15].

Uzkausējuma samaisījuma pakāpe. Noskaidrots ka, veidojot uzkausējumu, veidojas caurkausējuma – samaisījuma zona, šai samaisījumu zonai ir no bāzes un uzkausējamā materiāla atšķirīgs ķīmiskais sastāvs, tādēļ tas ir būtisks parametrs, jo tas ietekmē uzkausējuma fizikāli mehāniskās īpašības Samaisījuma zonu kvantitatīvi pieņemts aprakstīt kā uzkausējuma samaisījuma pakāpi¹ (D_c). D_c izsaka procentos un aprēķina pēc izteiksmes (2.6), kas ir caurkausējuma laukuma (A_b) (2.2. att.) dalījums ar visu izkausēto materiāla šķēsgriezuma laukumu, kur daļa ir caurkausējuma laukums (A_c) [15], [20], [29].

$$D_c = \frac{A_b}{A_b + A_c}. \quad (2.5)$$

No caurkausējuma un sekojoši no D_c nav iespējams izvairīties, ja tiek lietotas uzkausēšanas tehnoloģijas, caurkausējums nodrošina arī uzkausējuma sasaistīšanos ar bāzes materiālu. Tādēļ caurkausējums ir jānodrošina vienmērīgs visā uzkausējuma laukumā.

Pie uzkausējumu veidošanas samaisījuma pakāpei ir jābūt minimālai, lai samazinātu uznestā materiāla samaisīšanos – atšķaidīšanos ar bāzes materiālu. Uzkausētā materiāla slāņa sajaukšanās apjomi visbūtiskākie ir pie virskārtu modificējošiem pārklājumiem, kas uzlabo korozijas noturību un nodiluma izturību. Šādos gadījumos industriālā prakse (pieredze darbā Fraunhofer IWS institūtā) liecina, ka uzkausējumam samaisījums tiek veidots zem 10 %. Bet pieejamā literatūrā [15], [20], [29]. nav viennozīmīgi norādīts, ka zemākās vērtības ir labākās.

Paraugu šķēsgriezuma cietību vērtības (HV , kg/mm^2) darbā noteiktas uzkausējumam, lai pārlicinātos par uzkausējuma kvalitāti, mehāniskajām īpašībām un noskaidrotu bāzes materiāla cietību vērtību izmaiņu. Mikrociētības mērījumi veikti pēc Vikersa skalas (LVS EN ISO 6507-1:2006), lietojot 0,2 kg svaru un 10 s mērīšanas laiku. Šāds cietību mērījums uzkausējumiem ir piemērotākais, jo mehānisko īpašību pārbaude iespējama vēlāmajās makrošlifa zonās.

¹ *Dilution (angl.) jeb Degree of fusion (angl.)*, kur pēc <http://termini.lza.lv> *dilution* tiek tulkots kā atšķaidījums

MAG uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskie un procesa parametri, kā arī uzkausējuma raksturlielumi apkopoti 2.1. un 2.1. tabulā. Tabulās uzskatāmi redzams, ka abām uzkausēšanas tehnoloģijām nosakāmi identiski uzkausējumu raksturlielumi, bet daļa tehnoloģisko parametru atšķiras, tos nepieciešams pielīdzināt, lai nodrošinātu iespēju matemātiski salīdzināt abas lietotās tehnoloģijas.

2.1. tabula

MAG uzkausēšanas eksperimenta parametri

Tehnoloģiskie parametri*		Procesa parametri		Uzkausējuma raksturlielumi
U, V	$\rightarrow$	<u>Mērāmie</u>	$\rightarrow$	<u>Mērāmie</u>
$v, m/min$		I_{av}, A		A_c, mm^2 A_{vc}, mm^2
$w, m/min$		U_{av}, V		H_{max}, mm H_{min}, mm
$f, mm/apgr.$		<u>Aprēķināmie</u>		p, mm $HV, kg/mm^2$
		$Q, J/mm$		<u>Aprēķināmie</u>
				H_{diff}, mm
				$D_c, \%$ $C_v, \%$

2.2. tabula

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta parametri

Tehnoloģiskie parametri*		Procesa parametri		Uzkausējuma raksturlielumi
P, W	$\rightarrow$	<u>Mērāmie</u>	$\rightarrow$	<u>Mērāmie</u>
$v, m/min$		Temperatūra ($t^\circ C$) un T_A uzkausēšanas vannas apstākļi		A_c, mm^2 A_{vc}, mm^2
$F_{pm}, g/min$				H_{max}, mm H_{min}, mm
$f, mm/apgr.$		<u>Aprēķināmie</u>		p, mm $HV, kg/mm^2$
		$Q, J/mm$		<u>Aprēķināmie</u>
				H_{diff}, mm
				$D_c, \%$ $C_v, \%$

2.4. Uzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģisko parametru matemātiskā savietojamība

Lai MAG uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas būtu salīdzināmas, ir jālieto identiski tehnoloģiskie parametri. Bet zināms, ka lietotās tehnoloģijas ir atšķirīgas un tādējādi arī daļa tehnoloģisko parametru nesakrīt. Tādēļ tehnoloģiskie parametri, kuri atšķiras, tiek pielīdzināti aprēķinu ceļā.

No tehnoloģiskā procesa parametriem tieši pielīdzināmi ir bāzes materiālam pievadītā siluma daudzumi (Q , J/mm). Abām tehnoloģijām to atšķirīgo enerģijas avotu dēļ ir atšķirīgs aprēķins, kas parādīts izteiksmēs (2.1) un (2.2). Savukārt tehnoloģiskie parametri, kas sakrīt, ir uzkausēšanas ātrums (v , m/min) un padeve (f , mm/apgr.). Bet lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas jauda (P , W) ir pielīdzināma pēc izteiksmes (2.6), kur lietotas nolasītā *MAG* uzkausēšanas procesa I_{av} un U_{av} vērtības, kā arī, ņemot vērā *MAG* loka efektivitāti (η) [53].

$$P = \eta \cdot U_{av} \cdot I_{av}. \quad (2.6)$$

Uzkausēšanas procesā pievadītā pulvera padevi (F_{pm} , g/min) iespējams pielīdzināt, zinot *MAG* stieples masu garuma vienībā, ko noskaidro, zinot stieples īpatsvaru (ρ , g/mm³), stieples šķērsriezuma laukumu ($S_{0,8st}$, mm²), padevi (w , m/min), kā arī stieples (E_w) un pulvera (E_{pm}) uzkausēšanas efektivitāti. Sekojoši iespējams aprēķina F_{pm} , lietojot (2.7) izteiksmi.

$$F_{pm} = \frac{\rho \cdot S_{0,8st} \cdot 1000w \cdot E_w}{E_{pm}}. \quad (2.7)$$

Līdz tekus noskaidrots un ar aprēķiniem pamatots, ka *MAG* uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju tehnoloģiskie parametri ir pielīdzināmi vai sakrīt. Tādēļ abu tehnoloģiju rezultāti ir matemātiski salīdzināmi.

3. *MAG* UZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS

MAG uzkausēšanas eksperimentālās daļas galvenais mērķis ir noskaidrot *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem. Šāds raksturlielumu ietekmes pētījums nodrošina iespēju veidot paredzamus uzkausējuma raksturlielumus. Minēts iepriekš, ka disertācijā ir pārskatīti *MAG* uzkausēšanas eksperimenta rezultāti, kas veikts maģistra darba [2] ietvaros. Tehnoloģijas apskatā (1.4. nodaļa) secināts, ka maģistra darba [2] eksperiments ir izpildīts pamatoti plašā parametru diapazonā, veidojot virsmas laukuma uzkausējumu, un iegūtie uzkausējuma paraugi ir kvalitatīvi. Bet eksperimenta [2] paraugi ir jāpārskata, jo tiem iepriekš nav noteikts D_c , kas ir būtisks uzkausējuma raksturlielums. Lai uzkausējuma samaisījumu pakāpe būtu nosakāma, vadoties pēc izteiksmes (2.5), ir nepieciešams zināt uzkausējuma un caurkausējuma šķērsriezuma laukumu vērtības.

Eksperimenta [2] uzkausēšanas paraugi tika atkārtoti mērīti, izmantojot pilnīgāku mērīšanas metodi, kas detalizētāk aprakstīta 3.2. nodaļā. Ar minēto metodi noteikti ne tikai šķērsriezuma laukumi, bet arī 2.3. nodaļā aprakstītie ģeometriski mērāmie uzkausējumu raksturlielumi.

Sekojošā apakšnodaļā aprakstīts *MAG* uzkausēšanas eksperiments, lietotais aprīkojums, kā arī norādītas citas nianšes, kas attiecas uz eksperimenta veikšanu.

3.1. *MAG* uzkausēšanas eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli

MAG uzkausēšanas eksperiments realizēts, lietojot 3.1. tabulā uzskaitīto aprīkojumu, kur minēts aprīkojuma ražotājs un attēlota aprīkojuma funkcija.

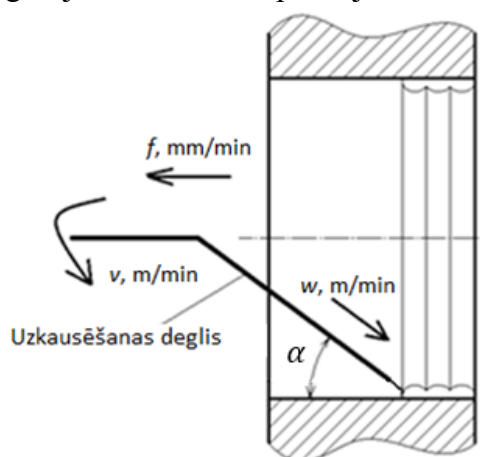
3.1. tabula

MAG uzkausēšanas aprīkojums un funkcija

Tehnoloģiskais aprīkojums	Ražotājs/Modelis	Funkcija
Metināšanas aprīkojums	„FRONIUS TransPlus Synergic 3200” (5. pielikums)	Uzkausēšanas jaudas avots, nodrošina uzkausēšanas U un w parametru iestatīšanu
Uzkausēšanas aprīkojums	„SUPERCOMBINATA 40/1” (6. pielikums)	Nodrošina uzkausēšanas sprauslas pārvietošanu, ar iestatītajām v un f vērtībām. Nodrošina uzkausēšanas sprauslas leņķi α

Vienmērīga virsmas uzkausēšana realizējama, uzkausējumu veicot pa nepārtrauktu spirāli. Uzkausēšanas shēma attēlota sekojošā 3.1. attēlā, kur redzamas uzkausēšanas degļa kustības un pārvietoējumi:etināšanas ātrums (v , m/min) stieples padeves (w , m/min), kā arī uzkausēšanas degļa padeves pārvietoējums (f , mm/apgr.), kas ir konstants (2,8 mm/apgr.). Uzkausēšana veikta uz bāzes materiāla S355J2, kura ķīmiskais sastāvs parādīts 1.1. tabulā. *MAG* eksperimenta

paraugi izveidoti vienīgi F uzkausēšanas pozīcijā, sekojoši arī raksturlieluma noteikšana MAG tehnoloģijai iespējama vienīgi šajā uzkausēšanas pozīcijā.



3.1. att. MAG uzkausēšanas shēma.

Uzkausēšanas eksperimentā lietota 0,8 mm stieple ISO 14341-A G3Si1 (3.2. tabula.), kas piemērota bāzes materiāla S355J2 metināšanai, bet izmēru ierobežo lietotais uzkausēšanas aprīkojums. Uzkausēšanā par aizsarggāzi izmantots 80 % Ar un 20 % CO₂ maisījums, kas pēc EN 439 klasificējams kā M21 gāze, bet, vadoties pēc DIN 1910 un [44], uzkausēšana veikta ar 135 jeb MAG procesu. Aizsarggāzes padeve MAG procesā tika nodrošināta 13 l/min daudzumā.

3.2. tabula

Metināmās stieples ISO 14341-A G3Si1 ķīmiskais sastāvs [46]

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

Eksperimenta parametri izvēlēti iespējami plašākos diapazonos: strāvas spriegums (16–22 V), stieples padeves ātrums (3,5–10,5 m/min) un metināšanas ātrums (0,5–0,8 m/min) (3.3. tabula), lai noskaidrotu piemērotākos uzkausēšanas parametrus.

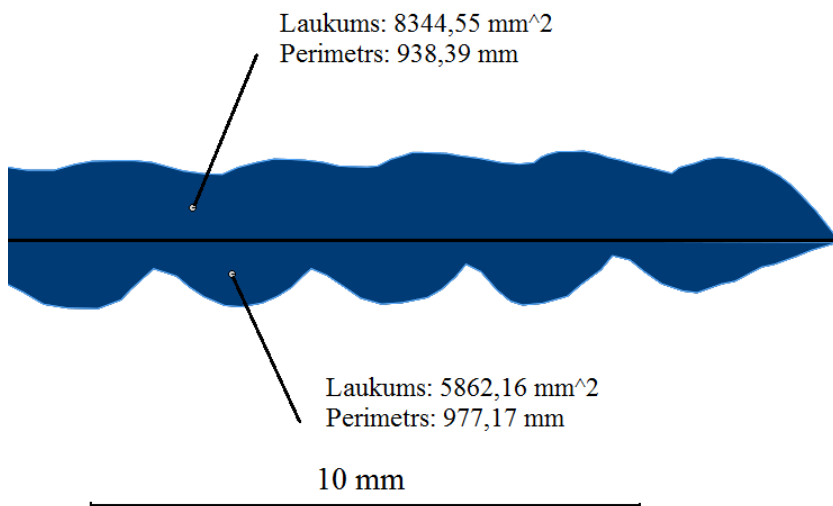
3.3. tabula

MAG uzkausēšanas eksperimenta parametri

U, V	$w, m/min$	$v, m/min$		
		0,5	0,65	0,8
		Paraugs Nr.		
16	3,5	1	10	19
	4	2	11	20
	5	3	12	21
19	5,5	4	13	22
	7	5	14	23
	8,5	6	15	24
22	7,5	7	16	25
	9	8	17	26
	10,5	9	18	27

3.2. *MAG* uzkausēšanas eksperimenta paraugu analīze

Identificējot uzkausējuma raksturlielumus, secināts, ka uzkausējumu raksturo vairāki būtiski ģeometriski raksturlielumi: uzkausējuma augstums, augstuma starpība un uzkausējuma samaisījuma pakāpe. Lai iegūtu datus par identificētajiem uzkausējuma ģeometriskajiem raksturlielumiem, kas aprakstīti 2.3. nodaļā, izveidoti makrošlifu paraugi, kas kodināti ar vara hlorīdu (10 % $\text{CuCl} \cdot \text{NH}_4 \text{Cl}$ šķīdumu ūdenī). Apstrādātie paraugi tika fotografēti ar lineālu un programmā *SolidWorks* izveidots uzkausējuma un caurkausējuma modelis (3.2. att.), kur, zinot attēla mērogu, noskaidroti interesējošie uzkausējuma raksturlielumi.



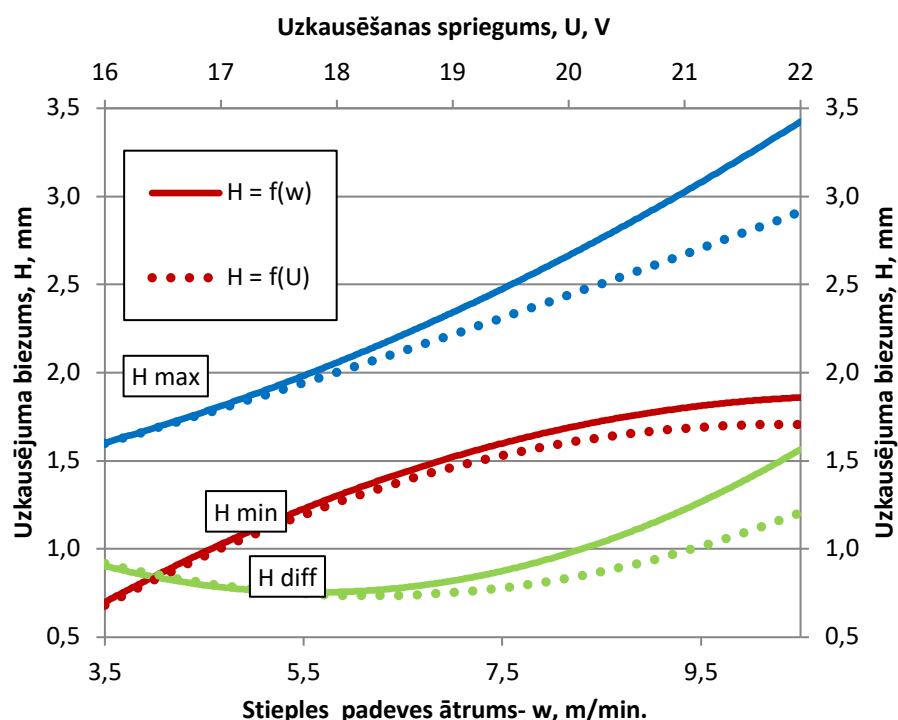
3.2. att. Uzkausējuma, caurkausējuma modelis programmā *SolidWorks*.

Iegūtie rezultāti apkopoti programmā *Excell*, kur arī veikti turpmākie raksturlielumu aprēķini (piem. D_c , C_v), un veiktas citas ar rezultātu ieguvī un apstrādi saistītās darbības.

3.3. *MAG* eksperimenta analītiskā daļa

MAG eksperimenta analītiskajā daļā iekļauts eksperimenta rezultātu apkopojums par parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem. Datus attēlojot grafiski, kā arī aprēķina veidā, kas pielietojami praktiski pie tehnoloģiskā procesa pārbaudes vai izstrādes.

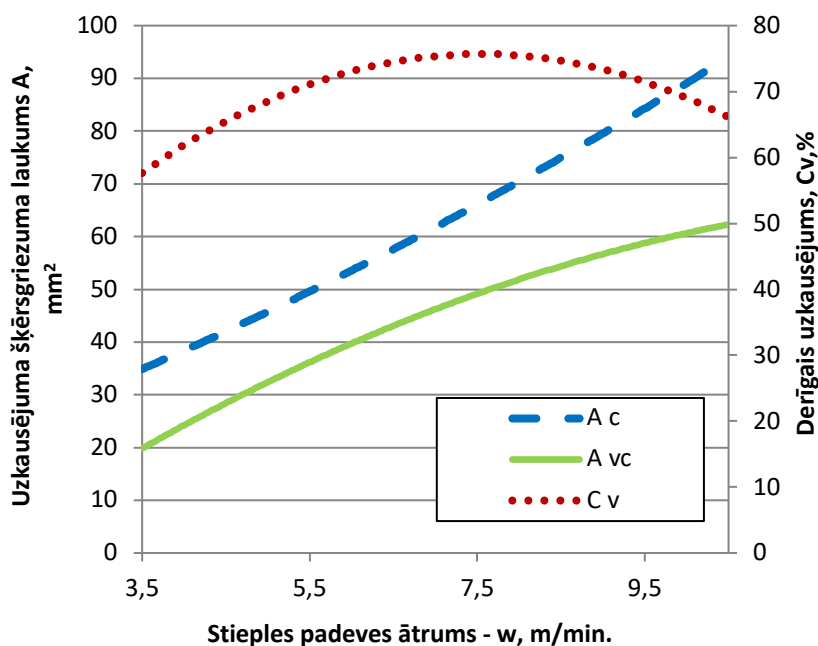
Uzkausējuma augstums. Tehnoloģisko parametru w un U ietekme uz uzkausējuma augstumu apkopota sekojošā 3.3. attēlā. Atsevišķi apskatītas uzkausējuma maksimālās, minimālās un starpības vērtības, attiecīgi $H_{\max}$, $H_{\min}$, un H_{diff} . Minimālais augstums ir galvenais uzkausējuma augstuma raksturlielums, jo tas norāda uz uzkausētā materiāla slāņa biezumu, kurā iegūstama pilnīga atbalsta virsma, pie urbuma tā būtu cilindriskā virsma. Savukārt H_{diff} raksturo noslēdzošajā apstrādē potenciāli nogriežamās materiāla kārtas biezumu.



3.3. att. Uzkausējuma maksimālās ($H_{\max}$), minimālās ($H_{\min}$) un augstumu starpības (H_{diff}) vērtību atkarība no uzkausēšanas sprieguma (U) un stieples padeves ātruma (w).

Kā redzams 3.3. attēlā, tad, pieaugot gan w , gan U , visas augstuma vērtības palielinās. Mazākās H_{diff} vērtības novērojamas pie $U = 19 \text{ V}$ un $w = 5,5\text{--}7,5 \text{ m/min}$ vērtībām. Ar minētajām uzkausējuma parametra vērtībām iegūstams vienmērīgs uzkausējuma profils bez izteiktiem kāpumiem, kur nogriežamā kārtā ir vismazākā. Grafika (3.3. att.) sakarības izteiktas matemātiskās sakarībās un apkopotas 10. pielikumā.

Uzkausējuma šķērsriezuma laukums. Sekojošā 3.4. attēla grafikā attēlotas uzkausējuma šķērsriezuma laukumu izmaiņas atkarībā no w . Grafikā redzams viss iegūtais uzkausējuma šķērsriezuma laukums (A_c), derīgais uzkausējuma augstums (A_{vc}) un uzkausējuma ekonomiskums (C_v). C_v darbā novērtē procentuāli, izsakot A_{vc} pret A_c , pēc izteiksmes (2.4), kur lielākās vērtības raksturo efektīvāk iztērētu uzkausējamo materiāla apjomu, līdz ar to veidojot tehnoloģiski un ekonomiski pamatotu uzkausējumu.



3.4. att. Uzkausētā šķēsgriezuma laukumu – kopējā (A_c), derīgā (A_{vc}) un derīgā uzkausējuma procentuālā apjoma (C_v) atkarība no w .

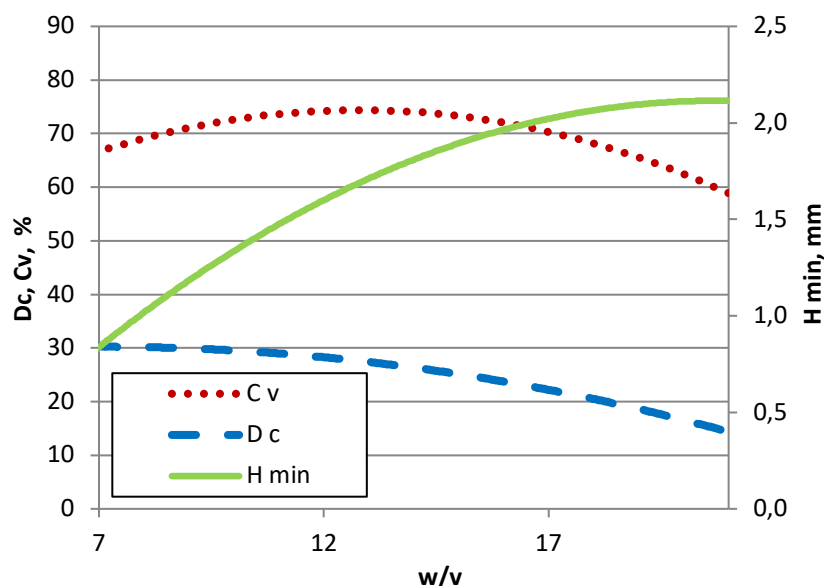
Kā redzams 3.4. att. attēlā, tad, pieaugot w , palielinās A_c un A_{vc} . Šāds uzkausējuma apjoma kāpums ir skaidrojams ar pieaugošo materiāla daudzumu uzkausējuma zonā. Pie lielākajām w vērtībām (3.4. att.) A_c pieaugums kļūst straujāks, bet A_{vc} pieaugums samazinās, kas izsauc C_v samazinājumu, tas izskaidrojams ar pārmērīgu pievadītā materiāla daudzumu uzkausējuma zonā. Pie maksimālajām w vērtībām veidojas nevēlams uzkausējums, kur katrs nākamais laukuma uzkausējums veido H_{max} – veidojas vienmērīgi augošs uzkausējuma profils.

Uzkausējuma efektivitātes augstākās vērtības ir novērojamas pie vidējām w vērtībām. Acīmredzami, līdzīgi kā pie H_{diff} , diapazonā $w = 6-8$ m/min ir optimāli uzkausēšanas režīmi, kas nodrošina vienmērīgu materiāla formēšanās iespēju. Sakarības, kas izriet no 3.4. attēla grafika, iekļautas 10. pielikumā izteiksmēs.

Uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c). *MAG* uzkausēšanas eksperimenta rezultāti liecina, ka D_c sasniedz 20–40 %, kas vērtējama kā augsta uzkausējuma samaisījuma pakāpe, jo pēc literatūras [20] sniegtajiem datiem *MAG* tehnoloģijai būtu jānodrošina 15–25 %. Samazināt D_c apjomu ir nepieciešams, jo tas samazina materiālu ķīmiskā sastāva samaisīšanos, fizikāli mehānisko īpašību izmaiņu un bāzes materiāla temperatūras ietekmes zonas.

Iepriekš tika novērots, ka būtiski uzkausējuma raksturlielumus ietekmē pievadītā materiāla daudzums, kas tieši atkarīgs no stieples padeves ātruma (w , m/min). Turklāt netieša ietekme uz materiāla daudzuma pievadi uzkausēšanas vannā ir uzkausēšanas procesa ātrumam (v , m/min). Tādēļ darbā ieviests jauns koeficients (w/v), kas visprecīzāk izskaidro pievadīto materiāla daudzumu. Sekojošā 3.5. attēlā aplūkota būtisku uzkausējuma raksturlielumu: C_v , H_{min} un D_c atkarību no ieviestā koeficienta w/v . Lielākas koeficienta w/v vērtības norāda uz lielāku materiāla daudzumu, kas pievadīts uzkausēšanas zonā.

Pēc 3.5. attēla redzams, ka uzkausējuma samaisījuma pakāpi būtiski ietekmē materiāla daudzums, ja w/v pieaug, tad D_c samazinās. Kā arī, palielinoties w/v , palielinās arī $H_{\min}$, bet novērots, ka ekonomiskākie uzkausējumi (C_v) tiek realizēti pie koeficienta $w/v = 10\text{--}15$. Attēlā 3.5. izvirzītās sakarības apkopotas un ievietotas 10. pielikumā.



3.5. att. Derīgā uzkausējuma procentuālā apjoma (C_v), minimālā uzkausējuma augstuma ($H_{\min}$) un uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) atkarība no materiāla daudzuma (w/v).

MAG eksperimentā lietoto tehnoloģisko parametru analīzes apkopojums

Sekojoši veikta koncentrēta rezultātu un tehnoloģisko parametru analīze. Mazākā nogriežamā materiāla kārta pēc apstrādē ($\min H_{\text{diff}}$) iegūstama pie $U = 19\text{ V}$ un $w = 5,5\text{--}7,5$ vērtībām. Noskaidrots, ka ir jāizvairās no maziem uzkausējuma ātrumiem ($v = 0,5\text{ m/min}$), jo tas ir risks uzkausējuma zonā pievadīt palielinātu materiāla daudzumu un veidot kāpjošu profilu, kas palielina nogriežamo kārtu un attiecīgi samazina C_v .

Uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c) ir būtiski atkarīga no materiāla daudzuma w/v , ja pieaug w/v , tad D_c samazinās, bet šis efekts veidojas vienmērīgi kāpjošā profila ietekmē, kur ar katru nākamo laukuma uzkausējumu caurkausējuma dziļums (p) samazinās. Tādējādi veidojas nevienmērīgs caurkausējumu laukums uzkausējumā.

Apkopojot eksperimenta rezultātus, ir secināts, ka labākie uzkausējuma rezultāti realizējami pie stieples padeves ātruma $w = 7\text{--}7,5\text{ m/min}$, kā arī pie koeficienta $w/v = 9\text{--}15$ vērtībām. Bet, lai noskaidrotu MAG eksperimenta labākos tehnoloģiskos parametrus, tika apskatīti divi būtiski uzkausējuma raksturlielumi C_v un caurkausējuma starpība (p_{diff}). Sekojoši 3.4. tabulā attēloti labākie paraugi un to tehnoloģiskie parametri, kas uzrādīja augstākās C_v un zemākās $|p_{\text{diff}}|$ vērtības. Caurkausējuma starpības vērtības tiek apskatītas pēc absolūtajām vērtībām, $|p_{\text{diff}}|$ un aprēķināmas ar izteiksmi (3.1).

$$|p_{\text{diff}}| = \sqrt{p_{\text{diff}}^2} = \sqrt{(p_{\text{last}} - p_{\text{first}})^2}. \quad (3.1)$$

Paraugi ar labāko uzkausējuma efektivitāti un vienmērīgāko caurkausējumu

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

MAG uzkausēšanas paraugi ar labāko uzkausējuma efektivitāti un vienmērīgāko caurkausējumu apkopoti 3.4. tabulā, sekojoši šiem paraugiem veikta *MAG* uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru pielīdzināšana (4.4. tabula) un attiecīgi arī tehnoloģiju rezultātu salīdzināšana.

Veiktā *MAG* uzkausēšanas eksperimenta rezultātu pārskatīšana nodrošina būtisku informācijas apjomu par tehnoloģisko parametru ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem un piemērotākajiem uzkausēšanas tehnoloģiskajiem parametriem. Iegūtie rezultāti apkopoti un 6.1. nodaļā, izstrādātas matemātiskās izteiksmes *MAG* uzkausēšanas raksturlielumu prognozei.

4. LĀZERUZKAUSĒŠANAS UN *MAG* TEHNOLOĢIJU EKSPERIMENTĀLAIS SALĪDZINĀJUMS

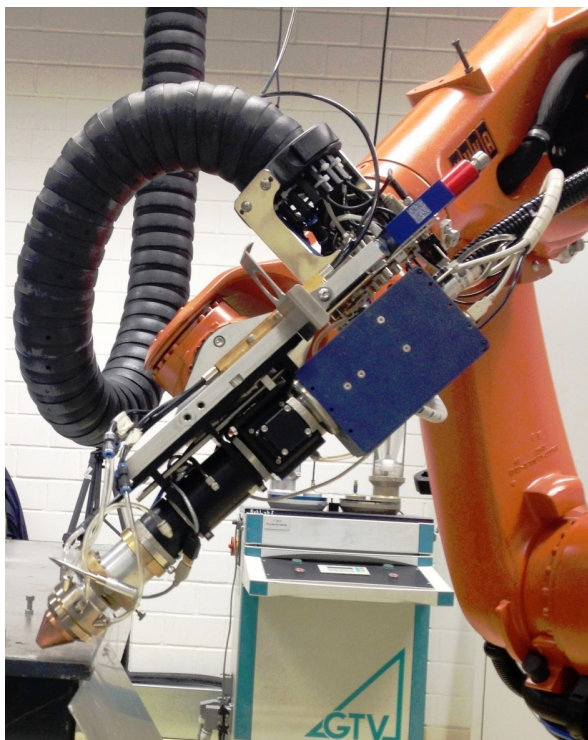
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģija tika izvēlēta kā viena no divām pamata tehnoloģijām eksperimentu veikšanai. Eksperiments ar lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju tiek veikts, lai pārlicinātos par tehnoloģijas iespējām, kā arī, lai salīdzinātu to ar *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju. Uzkausēšanas tehnoloģiju salīdzināšanā tika salīdzināti uzkausējumu raksturlielumi, kā arī uzkausēšanas tehnoloģiju priekšrocības un trūkumi.

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģiskie parametri tuvināti *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiskajiem parametriem, lai nodrošinātu tehnoloģiju salīdzināšanas iespējas.

4.1. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta aprīkojums, parametri un materiāli

Apakšnodaļā uzskaitīts eksperimentā lietotais aprīkojums, kā arī sniegtas ziņas par izmantotiem materiāliem. Kā arī attēlota abu salīdzināmo tehnoloģiju tehnoloģisko parametru (jaudas, pievadītā materiāla daudzuma) savstarpēja pielīdzināšana, ņemot vērā 1.5. nodaļā sniegto informāciju. Detalizētāks lāzeruzkausēšanas aprīkojuma apraksts ir iekļauts 1.6.nodaļā.

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta aprīkojums. Lāzeruzkausēšanas eksperiments nodrošināts, izmantojot 4.1. tabulā uzskaitīto tehnoloģisko aprīkojumu, kur lietotā aprīkojuma pamata elementi (sprausla, optika un manipulatora roka) darba pozīcijā redzama 4.1. attēlā.



4.1. att. Eksperimenta tehnoloģiskais aprīkojums.

Lāzeruzkausēšanas aprīkojums un funkcija

Aprīkojums	Ražotājs/Modelis	Funkcija
Manipulators	<i>KUKA Roboter GmbH</i> , KR 60 HA (8. pielikums)	Nodrošina pārvietošanu v, f un uzkausēšanas pozīcijas un α
Lāzera avots	<i>Laserline GmbH</i> diožu lāzers: LDF 20000-200 (7. pielikums)	Nodrošina enerģijas avotu
Pulvera dozators	<i>GTV GmbH</i> , MF –PF 2/2 (9. pielikums)	Pulvera pievade un dozēšana
Optiskais kabelis	<i>HIGHYAG Lasertechnologies</i> 2 mm (11. pielikums)	Nodrošina lāzera pārvadi no lāzera avota uz lāzera optiku
Lāzera optika	<i>Laserline GmbH</i> (12. pielikums)	Optika nodrošina 4 mm lāzera punkta izmēru – kolimācijas lēca 100 mm, fokusa lēca 200 mm
Uzkausēšanas sprausla	<i>Fraunhofer IWS</i> , COAX12 (2. pielikums)	Nodrošina uzkausēšanas pulvera, aizsarggāzes pievadi
Temperatūras kontrole	<i>Fraunhofer IWS</i> , E-MAqS (3. pielikums)	Nodrošina uzkausēšanas vannas temperatūras uzraudzību
Lāzera stara analizators	<i>Primes Laser Diagnose Focus Monitor FM</i> (4. pielikums)	Lāzera stara analīze, fokusa noteikšanas aprīkojums
Attēla analīzes programma	<i>ImageJ</i>	Pulvera plūsmas analīze

Lāzeruzkausēšanas eksperiments veikts, lietojot sekojošus materiālu:

1. Plakandzelzs: S350J2 (350 mm x 80 mm x 12 mm) (1. pielikums);
2. Pulveris: *STELLITE® 6*, 150/63 μm (
3. 4.2. un 4.3. tabulas);
4. Pulvera transportējošā gāze (Ar) 3 l/min;
5. Aizsarggāze (Ar) 15 l/min.

Plakandzels sagataves uzkausējamā virsma ir pēc rupjās gala virpošanas ar nodrošinātu Rz 25 μm virsmas raupjumu. Uzkausējamā virsma pirms eksperimenta attīrīta no smērvielām, eļļām un putekļiem, lietojot alkoholu saturošu tīrīšanas līdzekli.

Eksperimentālajā darbā lietotais *STELLITE®6* uzkausējamais pulvera materiāls izvēlēts, jo tas plaši pielietots *Fraunhofer IWS* institūtā, t.sk. industrijā dažādu izstrādājumu ekspluatācijas īpašību uzlabošanā. Uzkausējamais materiāls nodrošina teicamas ekspluatācijas īpašības: augstu nodilumizturību, korozijnoturību arī pie augstām temperatūrām (500°C), turklāt prognozējamā uzkausējuma cietība sagaidāma HV 450–550 kg/mm². Turklāt, *STELLITE®6* materiāla uzkausēšana konstrukcijas tēraudam (S350J2) ir maz pētīta, līdz ar to eksperiments sniedz jaunas zināšanas [4], [13], [16].

4.2. tabula

Uzkausējamā pulvera *STELLITE*[®] 6 nominālais ķīmiskais sastāvs [51]

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

4.3. tabula

Uzkausējamā pulvera *STELLITE*[®] 6 fizikāli mehāniskās īpašības [51]

Cietība		Īpatsvars, g/cm ³	Kušanas temperatūra, °C
Pēc Rokvela, HRC	Pēc Vikersa, <i>HV</i> , kg/mm ²		
37–45	400–490	8,46	1285–1395

Salīdzinošā eksperimenta parametri izvēlēti, vadoties pēc *MAG* eksperimenta paraugiem, kuri uzrādījuši labākos rezultātus un apkopoti 3.4. tabulā. Tehnoloģiju tehnoloģisko parametru pielīdzināšana apkopota 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas eksperimenta tehnoloģiskie parametri

Jauda							
MAG	Paraugs Nr.	5	14	23	7	16	25
	I_{av}	131	133,3	125,1	137,8	130,9	131,3
	U_{av}	16,1	15,5	16,5	18,8	19,3	19,4
	η	0,8					
	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	0,5	0,65	0,8	0,5	0,65	0,8
Lāzeruzk.	v , m/min	0,5	0,65	0,8	0,5	0,65	0,8
	v , m/s	0,0083	0,0108	0,0133	0,0083	0,0108	0,0133
Materiāla pievade							
MAG	w , m/min	7			7,5		
	$S_{0.8st}$, mm ²	0,5024					
	ρ , g/mm ³	0,00782					
	F_{wm} , g/min	27,5			29,47		
	E_w	0,95					
	F_{wcm} , g/min	26,13			27,99		
Lāzeruzk.	E_{pm}	0,85					
	F_{pm} , g/min	30,7			32,9		

Jaudas – siltuma ievades, pielīdzināšanā tiek ņemta vērā *MAG* tehnoloģijas loka enerģijas efektivitāte ($\eta = 80 \%$), kas pie lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas ir 100% . Aprēķiniem tiek izmantotas izteiksmes (2.1), (2.2) un (2.6) [11], [22], [53].

Sarežģītāk pielīdzināms ir uzkausēšanas zonā pievadītā materiāla daudzums, jo tehnoloģijām ir atšķirīga pievadītā materiāla forma un pievades daudzumu raksturojošās mērvienības. Stieples daudzumu raksturo mērvienība (m/min), bet pulvera padevi (g/min). Tādēļ materiālu pielīdzināšanai lietota (2.7) izteiksme, kur zināma laikā pievadītās stieples masa (g/min), stieples īpatsvars (ρ), izmērs (0,8 mm) un stieples uzkausēšanas efektivitāte (E_w). Ekvivalento pulvera masu noskaidro, ņemot vērā pulvera uzkausēšanas efektivitāti (E_{pm}). Ņemot vērā, ka stieples ražotāji nenorāda materiāla īpatsvaru, G3Si1 stieples īpatsvars tika pieņemts identisks konstrukciju tērauda īpatsvaram, kura metināšanai stieple ir paredzēta, turklāt pieņemts, ka $E_w = 95 \%$ [55]. Sekojoši, pēc [31] literatūrā sniegtās informācijas konstrukcijas tērauda īpatsvars ir $\rho = 7,82 \text{ g/cm}^3$. Precīzus lāzeruzkausēšanas efektivitātes rādījumus (E_{pm}) iespējams noskaidrot vienīgi pēc eksperimenta rezultātu analīzes, tādēļ E_{pm} vērtības ir pieņemtas, zinot uzkausēšanas aprīkojuma (*COAX12*) līdzšinējos efektivitātes rādījumus, kas sastāda $85 \%^1$.

Ar izteiksmi (2.7) iegūstamās vērtības ir indikatīvas un nav absolūti precīzas, ņemot vērā to, ka īpatsvara un efektivitātes vērtības tika pieņemtas empīriski. Bet aprēķināmās vērtības ir pilnībā pielietojamas kā atskaite eksperimenta tehnoloģisko parametru izvēlē, lai nodrošinātu divu tehnoloģiju salīdzināšanu.

Salīdzinot 4.4. tabulā pielīdzināto lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģisko parametru diapazonus un literatūras apskatā 1.6. tabulā (30. lpp.) apkopotos parametru diapazonus, kas iekļauj literatūras avotu [9], [13], [27], [36], [38], [40] sniegtās ziņas, secināms, ka parametru diapazoni pārklājas, un līdz ar to 4.4. tabulā uzskaitītie parametri ir vēlamajā parametru diapazonā un ir pielietojami eksperimentālajā darbā.

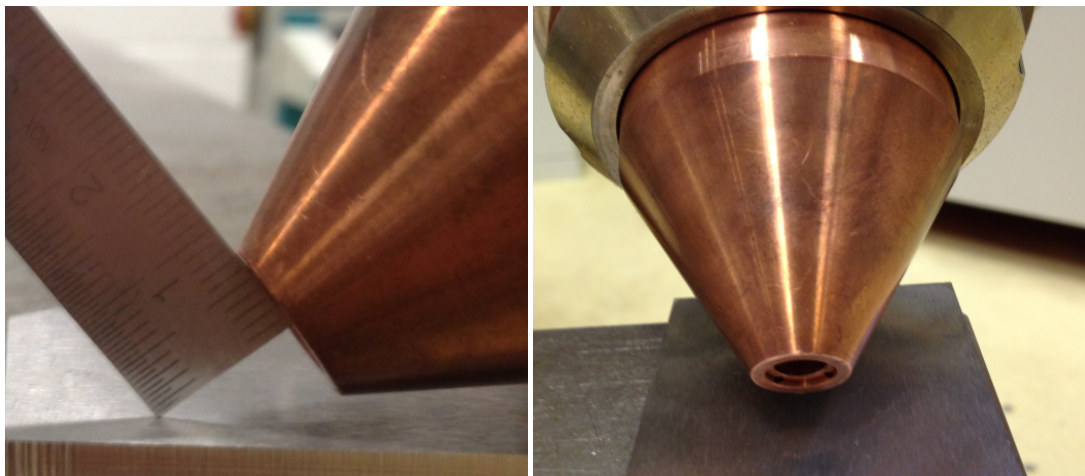
4.2. Salīdzināšanas eksperimenta apraksts

Lāzeruzkausēšana ar COAX 12 sprauslu salīdzināšanas eksperimentā veikta *F* pozīcijā, kā arī sprauslai nodrošināts leņķis $\alpha = 36^\circ$, lai abu salīdzināmo tehnoloģiju uzkausēšanas eksperimenti būtu maksimāli pielīdzināti viens otram. Iestatīts leņķis $\alpha = 36^\circ$ veidojas starp bāzes materiālu un sprauslu centrālo asi, bet sprausla pret uzkausēšanas virzienu atrodas perpendikulāri. Kā arī lāzeruzkausēšanas eksperimentā, identiski kā *MAG* uzkausēšanā, nodrošināts uzkausējuma solis $f = 2,8 \text{ mm}$ starp uzkausējumiem.

Pirms lāzeruzkausēšanas eksperimenta veikta uzkausēšanas aprīkojuma novietojuma kontrole (4.2. att.), lai iestatītu nepieciešamo 13 mm fokusa attālumu no uzkausēšanas sprauslas

¹ Bratt C., Hillig H. Possibilities for High Deposition Rate Cladding: High Power Lasers and Hybrid Technique. International Laser Symposium – Fiber, DISC, DIODE. Dresden 27/28 February 2014 (www.fraunhofer.iws.de)

līdz bāzes materiālam. Turklāt eksperimentā nodrošināts pulvera izvades kanālu paralēls novietojums attiecībā pret uzkausēšanas virzienu.



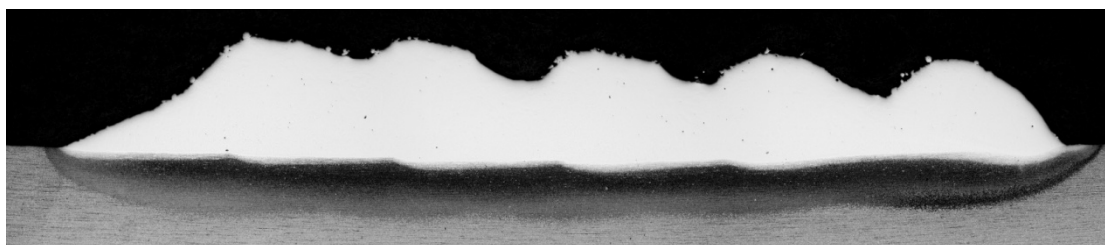
4.2. att. Uzkausēšanas sprauslas fokusa attāluma iestatīšana.

Salīdzināšanas uzkausējuma eksperimentā veikts viens atsevišķs uzkausējums un pieci sekojoši uzkausējumi. Šāda stratēģija izvēlēta ar mērķi iegūt informāciju gan par atsevišķu uzkausējumu, gan par virsmas uzkausējumu.

4.3. Salīdzināšanas eksperimenta norise

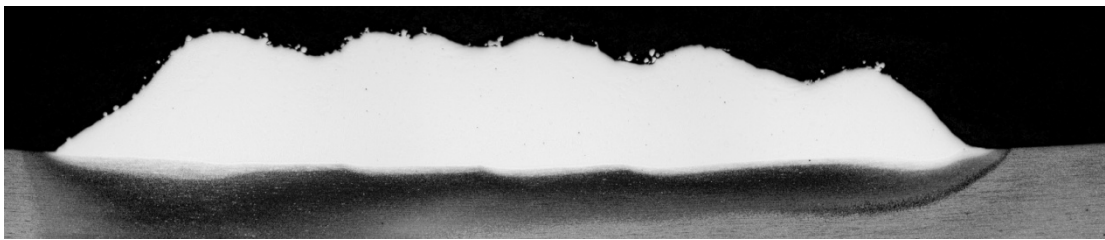
Salīdzināšanas lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģiskie parametri apkopoti 4.4. tabulā, un ievērotie sprauslas novietojumi un pārvietojumi aprakstīti iepriekšējā apakšnodaļā (4.2. nodaļa). Bet šajā apakšnodaļā aprakstīta lāzeruzkausēšanas eksperimenta gaitā atklāta nianse ar uzkausēšanas soli.

Realizējot lāzeruzkausēšanas eksperimentu visiem paraugiem novērots viļņains uzkausējums – nevienmērīgi papildīts (4.3. att.), minētais konstatēts pirms parauga šķērsgriezuma analīzes. Nevienmērīgs papildījums liek secināt, ka uzkausējuma soļa attālums starp uzkausējumiem ir par lielu. Veicot sākotnējo uzkausējuma paraugu novērtējumu, pieņemts lēmums uzkausējuma soli samazināt no sākotnējā $f = 2,8$ mm uz $f = 2$ mm.



4.3. att. Nr.4 parauga uzkausējums pie $\alpha = 36^\circ$ un 2,8 mm uzkausējumu soļa.

Tādēļ atkārtoti veikts eksperiments ar identiskiem tehnoloģiskajiem parametriem, bet ar koriģētu sprauslas padevi no $f = 2$ mm. Veiktās soļa izmaiņas rezultāts redzams 4.12 att.



4.4. att. Nr.4.1 parauga uzkausējums pie $\alpha = 36^\circ$ un 2 mm uzkausējumu soļa.

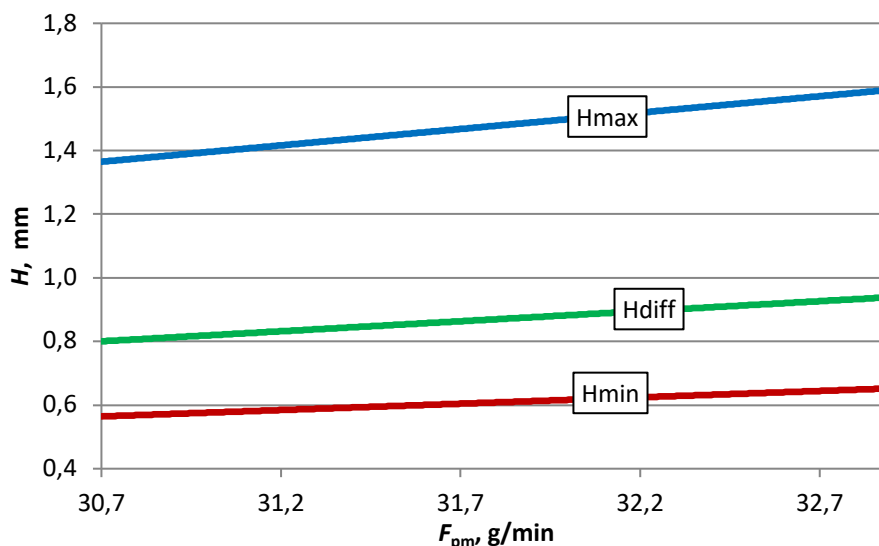
Paraugiem ar samazināto soli $f = 2 \text{ mm}$ ir uzlabojies materiāla piepildījums – samazinājusies uzkausējuma augstuma starpība salīdzinājumā ar $f = 2,8 \text{ mm}$ soli.

4.4. Salīdzināšanas eksperimenta analītiskā daļa

Paraugu sagatavošana veikta identiski kā pie *MAG* eksperimenta (3.2. nodaļa). Izveidoti uzkausējuma šķērsriezuma paraugi – makrošlīfi, kas kodināti ar vara hlorīdu (10 % $\text{CuCl} \cdot \text{NH}_4 \text{Cl}$ šķīdumu ūdenī). Kodinātie makrošlīfi fotografēti ar mērogu, izmantojot *KEYENCE VHX* digitālo mikroskopu. Sekojoši programmā *SolidWorks* katram parauga attēlam tika noteikti uzkausējuma raksturlielumi.

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta analītiskajā daļā iekļauta rezultātu analīze, kas atspoguļo tehnoloģisko parametru ietekmi uz raksturlielumiem. Kā arī apskatīts *MAG* uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju rezultātu salīdzinājums.

Augstuma vērtības pie soļa $f = 2,8 \text{ mm}$. Augstumu $H_{\min}$, H_{diff} un $H_{\max}$ vērtības vienmērīgi pieaug, palielinoties lāzera jaudai (P) un pulvera padevei (F_{pm}) (4.5. att.). Novērots, ka visiem paraugiem H_{diff} vērtības pārsniedz $H_{\min}$.

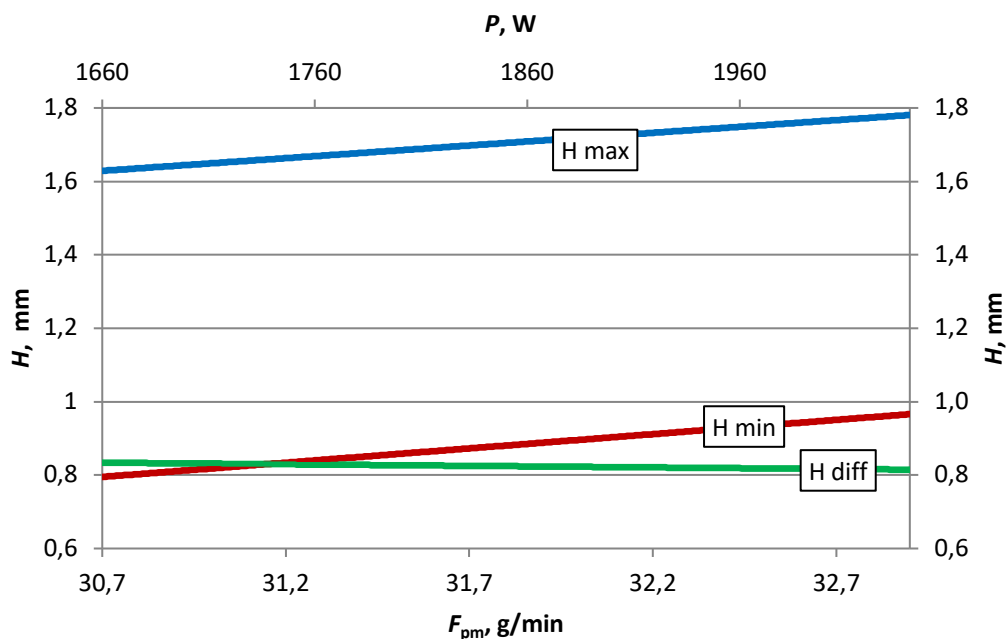


4.5. att. Uzkausējuma augstuma vērtības ($H_{\min}$, $H_{\max}$ un H_{diff}) pie $f = 2,8 \text{ mm}$.

Secināts, ka uzkausēšanā ar lāzeru pie sprauslas pozīcijas F un sprauslas leņķa $\alpha = 36^\circ$, lietojot 4 mm lāzera punktu, solis $f = 2,8 \text{ mm}$ ir par lielu, jo, kā redzams 4.5. attēlā, tad H_{diff} vērtības eksperimenta parametru diapazonā nesarūk, līdz ar to neveidojas vienmērīga

uzkausējuma kārtā. Turklāt H_{diff} vērtības pārsniedz H_{min} , kas būtiski palielina potenciāli nogriežamo materiāla kārtu, lai izveidotu cilindrisku urbumu.

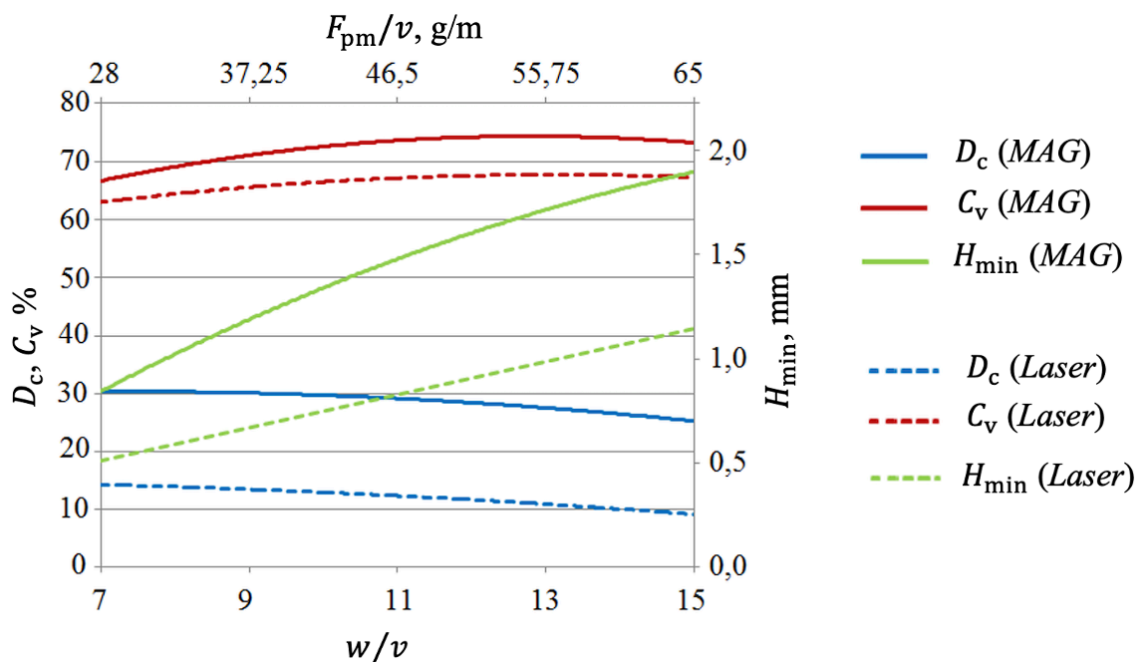
Augstuma vērtības pie soļa $f = 2$ mm. Kā redzamas 4.6. attēla grafikā, tad H_{max} un H_{min} vienmērīgi palielinās, pieaugot F_{pm} un P vērtībām, bet ir vērojams neliels H_{diff} samazinājums, jo H_{min} pieaugums ir straujāks kā H_{max} . Turklāt pie $P = 1760$ W un $F_{pm} = 31$ g/min H_{min} vērtības pārsniedz H_{diff} , kas uzlabo materiāla kārtas papildījumu un samazina potenciāli nogriežamo materiāla kārtu. Attēlā 4.6. redzamā grafikā informācija ir apkopota matemātiskās izteiksmēs, kas atrodama 13. pielikumā.



4.6. att. Uzkausējuma augstuma vērtības (H_{min} , H_{max} un H_{diff}) pie $f = 2$ mm.

Sekojoši salīdzināti *MAG* uzkausēšanas (3.3. att.) un lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultāti (4.6. attēls). Pie identiskiem materiāla pievades parametriem ($w = 7-7,5$ m/min $F_{pm} = 30,7-32,9$ g/min) H_{diff} vērtības abām tehnoloģijām ir vienās robežās – zem 1 mm. Bet H_{max} un H_{min} vērtības *MAG* uzkausēšanas eksperimenta paraugiem ir augstākas, attiecīgi vērtības ir teju 2,5 mm un 1,5 mm augstas, turpretī lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai H_{max} ir no 1,6 mm līdz 1,8 mm pie $f = 2$ mm, bet H_{min} tuvojas 1 mm atzīmei pie lielākajām pulvera padeves vērtībām. Šie rezultāti ir norādīti pēc datu aproksimācijas, lai izprastu kopējās tendences. Bet var secināt, ka lāzeruzkausēšanā uz bāzes virsmas tiek uzkausēts mazāks materiāla daudzums (A_c) pie abām tehnoloģijām pielīdzinātā pievadītā materiāla apjoma.

Lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas tehnoloģiju salīdzināšanai, identiski kā w/v pie *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas, arī lāzeruzkausēšanā ieviests materiālu daudzumu aprakstošs lielums F_{pm}/v , g/m. Sekojoši iespējama *MAG* uzkausēšanas eksperimenta rezultātu, kas apkopoti 3.5. attēlā, salīdzināšana ar lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultātiem. Tehnoloģiju raksturlielumu salīdzināšana veikta sekojošā 4.7. attēla grafikā, kur ievērota tehnoloģisko parametru pielīdzināšana un, attēlojot F_{pm}/v un w/v vērtības uz x ass.



4.7. att. Materiāla daudzuma F_{pm}/v un w/v ietekme uz lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas eksperimenta rezultātiem.

Analizējot 4.7. attēlā redzamo grafiku, secināts, ka H_{min} vērtības lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai ir zemākas par MAG tehnoloģiju, lai arī pievadītais materiāla apjoms ir līdzvērtīgs.

Lāzeruzkausēšanā un MAG uzkausēšanā ir līdzīga rakstura uzkausējuma ekonomiskuma rādītājs C_v , bet lāzeruzkausēšanā tas ir nedaudz stabilāks, nodrošinot C_v vērtības ap 70 %. C_v vērtības ir būtiski atkarīgas no minimālā uzkausējuma augstuma, H_{min} lielākoties veidojas starp pirmo un otro uzkausējumu (no labās puses 4.3. un 4.4. attēliem), ko savukārt efektīvi lāzeruzkausēšanai var ietekmēt, mainot parametrus f , F_{pm} vai F_{pm}/v , un MAG uzkausēšanai mainot attiecīgi f , w vai w/v . Līdz ar to abām uzkausēšanas tehnoloģijām, veicot adekvātas parametru adaptācijas, ir būtiski palielināmas C_v vērtības.

Uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c) ir būtiska pie specifisku pārklājumu veikšanas, kur uzkausējuma slānis uzlabo bāzes materiāla īpašības. Tādējādi, jo mazāka šī samaisījuma pakāpe, jo mazāk uznestā materiāla slāņa fizikāli mehāniskās īpašības atšķiras no gaidāmā. Tādēļ D_c vērtības ir svarīgas industriālam pielietojumam pie specifisku uzkausējumu veikšanas. Aplūkojot 4.7. attēla rezultātus, redzams, ka uzkausējuma samaisījuma pakāpe ir būtiski zemāka lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai, D_c pat ir zem 10 %. Salīdzinājumam D_c vērtības pie MAG uzkausēšanas tehnoloģijas ir virs 25 % un sasniedza pat 30 %.

Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai 4.7. attēla grafikā iekļautais ir aprakstāms ar matemātiskām sakarībām, kas apkopotas 13. pielikumā.

Analizējot nodaļas veikto tehnoloģiju salīdzināšanas eksperimentu, secināts, ka MAG uzkausēšanas tehnoloģija nav piemērota mazu, lokālu uzkausējumu veidošanai, jo tā nodrošina lielas D_c un H_{min} vērtības. Turklāt, salīdzinājumam, lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas lietotā jaudas pievade bāzes materiālam ir stabilāka kā MAG uzkausējuma īslēgumā, kā arī

lāzeruzkausēšanā ietekme uz bāzes materiālu ir dozējama precīzāk. Bet rezultāti parāda to, ka *MAG* uzkausēšanas tehnoloģija efektīvāk izmantojama pie lielu uzkausējama augstumu veidošanas, kur nav nepieciešams izveidot materiāla slāni ar īpašām tehnoloģiskām īpašībām, neļaujot tam samaisīties ar bāzes materiālu.

Veicot rezultātu analīzi, novērots, ka lāzeruzkausēšanā uzkausētā materiāla apjoms ir mazāks kā *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijai, lai arī pievadītā materiāla apjomi ir pielīdzināmi. Šo samazināto uzkausējuma apjomu var skaidrot ar samazinātu uzkausējuma efektivitāti. Savukārt uzkausējuma efektivitāte varētu būt izskaidrojams ar sprauslas sagāzuma leņķi $\alpha = 36^\circ$, kas izmantots lāzeruzkausēšanā. Šie pieņēmumi ir jāpārbauda lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas eksperimentā, pārbaudot leņķa α ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem.

5. LĀZERUZKAUSĒŠANAS EKSPERIMENTS UN VALIDĒŠANA

Pamata izaicinājums uzkausēšanas tehnoloģijai šajā disertācijā ir uzkausējumu veidot urbūmam, uzlabojot urbūma ekspluatācijas īpašības, kas ir liela aprīkojuma sastāvdaļa, kam nav brīvas iespējas variēt ar novietojumu. Tādēļ uzkausējums jāspēj nodrošināt $F-VU-OH-VD$ pozīcijās, kas iekļauj visas kritiskās uzkausēšanas pozīcijas, ja urbūms atrodas horizontāli. Kā noskaidrots iepriekš, uzlabot materiāla virskārtas tehnoloģiskās īpašības vislabāk var, lietojot lāzeruzkausēšanas tehnoloģiju. Bet pieejamais lāzeruzkausēšanas urbūma aprīkojums nav piemērots OH pozīcijas uzkausēšanai (1.6. nodaļa). Tādēļ lietota universāla koaksiāla sprausla $COAX12$, kas nav radīta urbūmu uzkausējumu veikšanai, bet eksperimentā tika veikti uzkausējumi atsevišķiem paraugiem attiecīgi F , VU , OH un VD pozīcijās, lai noskaidrotu uzkausēšanas pozīcijas ietekmi uz uzkausējumu raksturlielumiem, kā arī, lai ar eksperimentā iegūto informāciju tiktu noskaidrotas lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskās iespējas.

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā veikta sprauslas sagāzuma leņķa (α) ietekmes pārbaude uz uzkausējumu raksturlielumiem, jo lāzeruzkausēšanas salīdzinošā eksperimentā noskaidrots, ka iespējams lietotais $\alpha = 36^\circ$ ietekmē bāzes materiāla uzkausētā materiāla apjomu.

5.1. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta aprīkojums un parametri

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā izmantots identisks tehnoloģiskais aprīkojums un materiāli, kā pie salīdzināšanas eksperimenta veikšanas, kur lietotais aprīkojums apkopots 4.1. tabulā, un detalizētāk aprakstīts 1.6. nodaļā, un lietotie materiāli iekļauti 4.1.nodaļā.

Tehnoloģiskie parametri. Papildus lāzeruzkausēšanas salīdzinošā eksperimenta tehnoloģiskajiem parametriem, kas uzskaitīti 4.4. tabulā papildus izvēlēti parametri Nr.7 un 8. Jaunie tehnoloģiskie parametri nodrošina iepriekš ievērotās vidējās siltuma ievades (Q) vērtības un F_{pm} vērtības. Turklāt parametri Nr.7 un 8. ir uzrādījuši adekvātus rezultātus iepriekš veiktos eksperimentos, kas nav saistīti ar disertācijas eksperimentālās daļas izstrādi. Lāzeruzkausēšanas eksperimentālajā daļā lietotie tehnoloģiskie parametri apkopoti 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	1,2	1,4
v , m/min	0,5	0,65	0,8	0,5	0,65	0,8	0,5	0,5
F_{pm} , g/min	30,7	30,7	30,7	32,9	32,9	32,9	14	25

Sprauslas soļa maiņa pie $\alpha = 90^\circ$. Daļai eksperimentu paraugu veidoti virsmas laukuma uzkausējumi ar pieciem sekojošiem uzkausējumiem, līdzīgi kā pie salīdzināšanas eksperimenta. Vienīgi šajā eksperimentā lietots $\alpha = 90^\circ$ un lietots solis $f = 2,8$ mm un $f = 2$ mm. Minētais

eksperiments veikts ar mērķi salīdzināt uzkausējuma raksturlielumus pie $\alpha = 90^\circ$ un $\alpha = 36^\circ$, kur pārējie tehnoloģiskie parametri un sprauslas soļa vērtības ir identiskas. Raksturlielumu vērtības pie $\alpha = 36^\circ$ ņemtas no salīdzināšanas eksperimenta rezultātiem.

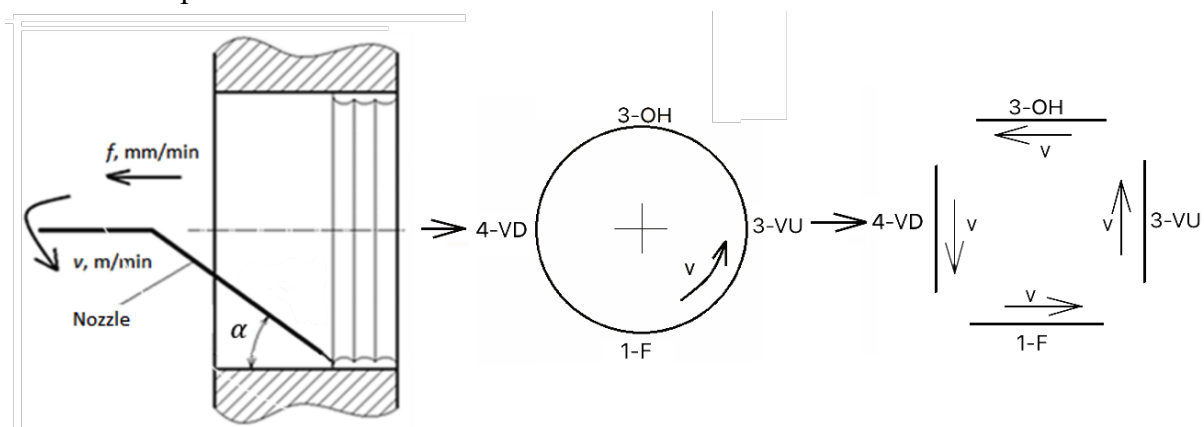
Sprauslas leņķa variēšana. Salīdzināšanas eksperimentā lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai identificēts, ka, iespējams, tieši leņķis α būtiski ietekmē uzkausējuma laukuma A_c un citas uzkausējuma raksturlielumu vērtības. Tādēļ šajā eksperimentā izveidoti paraugi ar dažādām leņķa α vērtībām: 90° , 81° , 63° , 45° un 36° , veidojot vienu atsevišķu uzkausējumu katrā no sprauslas uzskaitītajiem leņķiem F uzkausēšanas pozīcijā. Leņķa α vērtības izvēlētas, sekojoši: minimālās leņķa vērtības 36° , bet maksimālās 90° , nākamais izvēlēts leņķis 45° ($36^\circ + 9^\circ = 45^\circ$), kas potenciāli nepieciešams sadurvirsmu, stūru uzkausēšanai, tad attiecīgi lietots leņķis 81° ($90^\circ - 9^\circ = 81^\circ$) pēc skaitliskas analogijas, bet, ievērojot simetriju, izvēlēta 36° un 90° vidējā leņķa vērtība – 63° . Potenciāli saredzot, ka ar sprauslas variēšanu tiek iegūta plašākā informācija par uzkausējumu raksturlielumu izmaiņām, tad tieši šie dati tika izmantoti par pamatu raksturlielumu prognozēšanas matemātisko izteiksmju veidošanai.

Uzkausēšanas pozīcijas (F – VU – OH – VD) variēšana. Eksperimenta shēma uzkausēšanai F , VU , OH un VD pozīcijās parādīta 5.1. attēlā. Kā tas minēts arī iepriekš (detalizētāk aprakstīts 1.6. nodaļā), tad, variējot uzkausēšanas pozīcijas, sprauslas leņķis ir saglabāts nemainīgs $\alpha = 36^\circ$. Eksperimentā uzkausējuma degļa pozīcija (F vai VU , vai OH , vai VD) viena uzkausējamā parauga ietvaros tiek saglabāta statiska, jo netika nodrošināta cikliska pozīcijas maiņa. Turklāt uzkausējums veikts, uz plakanas sagataves veidojot vienu atsevišķu un piecus sekojošus uzkausējumus, kas pārklāj laukumu.

5.2. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta apraksts

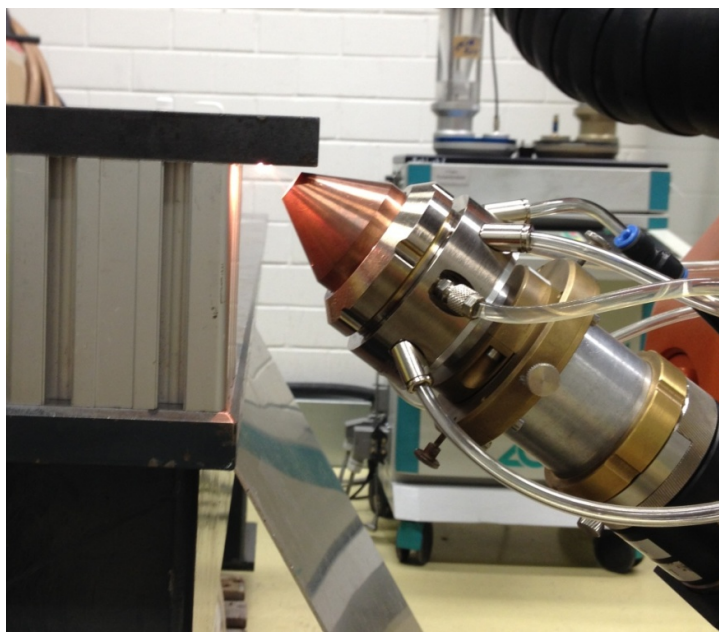
Lāzeruzkausēšanas eksperiments sastāv no kopskaitā trīs apakšeksperimentiem, kam katram ir savi uzdevumi, bet kopējais mērķis ir iegūt iespējami plašāku informācijas apjomu par lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskajām iespējām un ierobežojumiem.

Shematiska uzkausēšanas pozīciju veidošanās pie horizontāla urbuma novietojuma parādīta 5.1. attēla eksperimenta shēmā.



5.1. att. Uzkausējuma pozīciju shēma.

Ekspērimētā realizētais uzkausēšanas process *OH* pozīcijā parādīts 5.2. attēlā, kur uzkausēšanas procesu bija iespējams veiksmīgi realizēt, pateicoties nodrošinātajam sprauslas sagāzuma leņķim $\alpha = 36^\circ$.



5.2. att. Uzkausēšanas process *OH* pozīcijā.

Sprauslas iestatīšanu eksperimenta pozīcijā, kas paredzēta *VU* un *VD* pozīcijā, redzama 5.3. attēlā. Arī šīs pozīcijas uzkausēšanai iestatīts sprauslas sagāzuma leņķis $\alpha = 36^\circ$. Eksperimenta gaitā pie 5.3. attēlā redzamās sprauslas pozīcijas, veicot *VU* uzkausēšanu, sprausla uzkausējumu veic, kustoties augšup, bet *VD* uzkausēšanā, kustoties lejup.



5.3. att. Virsskats *VU* un *VD* uzkausēšanas sprauslas pozīcijai (sprauslas iestatīšana).

Šādā veidā tika nodrošināta iespēja noskaidrot uzkausējuma sprauslas pozīcijas ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem. Kā arī tika noskaidrotas lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas iespējas uzkausējumu veidot grūti sasniedzamās vietās, ar potenciālu nākotnē uzkausējumu veidot arī urbumā pie dažādām uzkausēšanas pozīcijām.

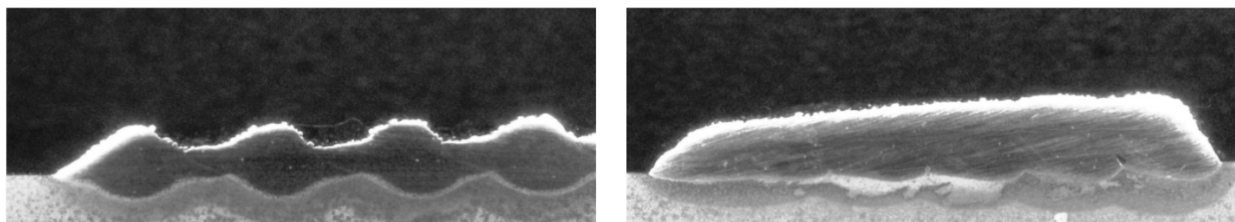
5.3. Lāzeruzkausēšanas eksperimenta analītiskā daļa

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta analītiskā daļa ietver eksperimenta rezultātu apkopojumu, apskatot tehnoloģisko parametru, uzkausēšanas soļa, pozīcijas un sprauslas leņķa ietekmi uz uzkausējuma raksturlielumiem.

5.3.1. Sprauslas soļa maiņas analīze

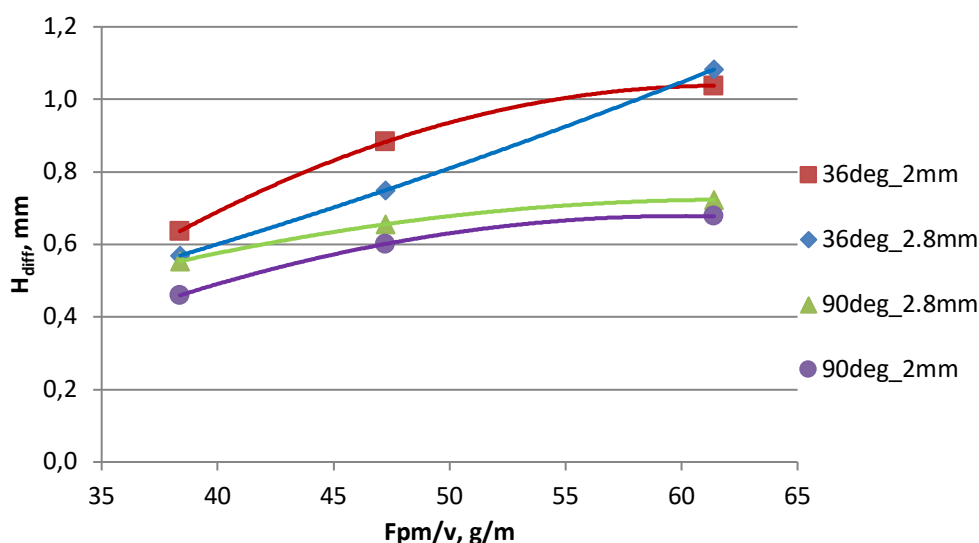
Vienmērīgs uzkausējums un precīzas $H_{\min}$ vērtības nodrošina minimālu mehānisko pēcapstrādi. Savukārt lielākās $H_{\min}$ un mazākās H_{diff} vērtības raksturo lietderīgu uzkausējamā materiāla izlietojumu. Tādēļ lāzeruzkausēšanas eksperimentā noskaidrota sprauslas soļa izmaiņas ($f = 2,8$ mm un $f = 2$ mm) ietekme pie sprauslas leņķa $\alpha = 90^\circ$ un iegūtie rezultāti salīdzināti ar $\alpha = 36^\circ$ rezultātiem.

Kā redzams 5.4. attēlā, tad, samazinot soli no $f = 2,8$ mm uz $f = 2$ mm, iegūtais uzkausējuma profils mainās no vienmērīgi viļņaina uz vienmērīgi kāpjošu, uzlabojot materiāla piepildījumu. Šāda profila izmaiņa ir novērojama visiem paraugiem.



5.4. att. Paraugu Nr.3.2 un 3.3 uzkausējums pie $\alpha = 90^\circ$ ar $f = 2,8$ mm un $f = 2$ mm soli.

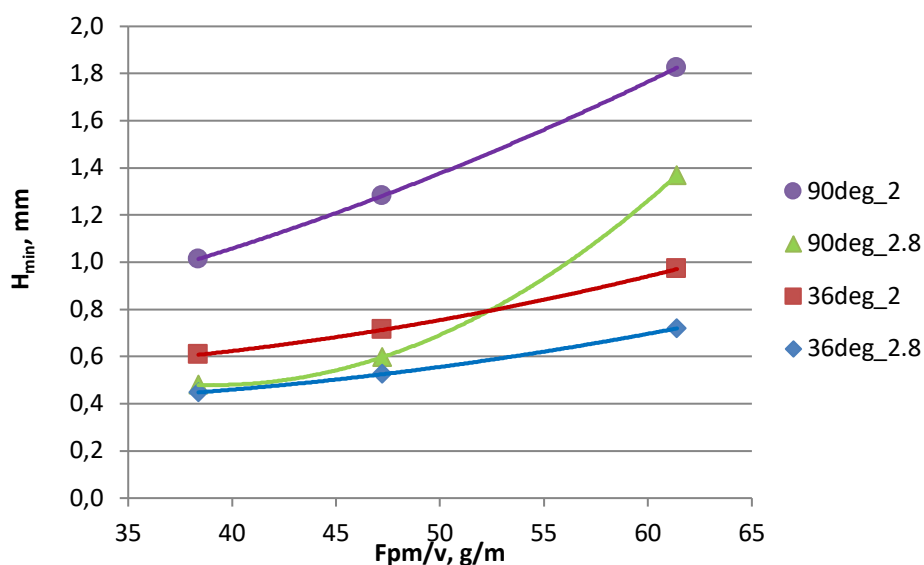
Veicot lāzeruzkausēšanas eksperimentu ar atšķirīgām sprauslas soļa vērtībām, noskaidrots, ka H_{diff} un $H_{\min}$ vērtību izmaiņa atkarīga ne tikai no lietotajiem tehnoloģiskajiem parametriem, uzkausēšanas soļa, bet arī no sprauslas sagāzuma leņķa. Rezultāti apkopoti sekojošo 5.5. un 5.6. attēlu grafikos.



5.5. att. H_{diff} atkarībā no F_{pm}/v un f , pie $\alpha = 90^\circ$ un 36° un $P = 1660$ W.

Laukumu uzkausēšanā pie sprauslas leņķa $\alpha = 36^\circ$ ir izteikts $H_{\max}$ vērtību pieaugums (5.5. att.), kas veidojas katra uzkausējuma beigās, arī pie samazināta sprauslas soļa, minētais redzams 4.3. un 4.4. attēlu paraugos, kas ar katru nākamo uzkausējumu palielina H_{diff} vērtības. Savukārt novērots, ka, ar sprauslai nodrošinot $\alpha = 90^\circ$, tiek iegūts vienmērīgāks uzkausējuma profils, par ko liecina H_{diff} samazinājums (5.5. att.). Turklāt pie $\alpha = 90^\circ$ un, palielinoties F_{pm}/ν vērtībām H_{diff} , vērtību pieaugums ir lēnāks kā pie $\alpha = 36^\circ$.

Analizējot 5.5. attēlā redzamā grafika rezultātus, secināts, ka H_{diff} vērtības iespējams samazināt, samazinot F_{pm} vai palielinot ν , kas samazina materiāla daudzumu konkrētā apgabalā, mazinot $H_{\max}$ un sekojoši H_{diff} vērtības. Bet, tai pat laikā palielināt $H_{\min}$ iespējams, samazinot f vai palielinot F_{pm}/ν , kas redzams sekojošā 5.6. attēlā. Redzams, ka H_{diff} un $H_{\min}$ ir savstarpēji saistīti.



5.6. att. $H_{\min}$ atkarībā no F_{pm}/ν un f , pie $\alpha = 90^\circ$ un 36° un $P = 1660$ W.

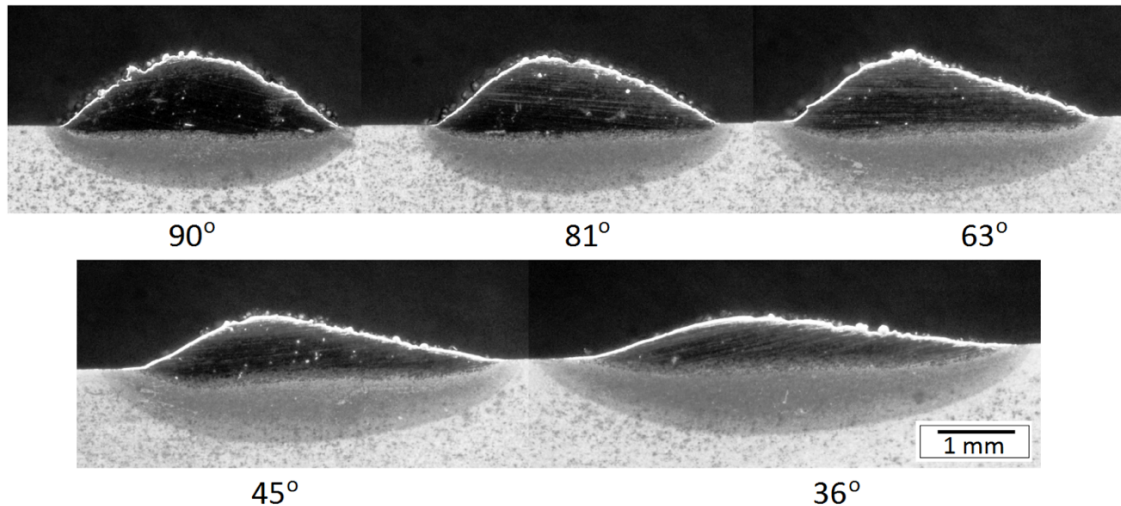
No 5.5. un 5.6. attēlos redzamajiem rezultātiem var secināt, H_{diff} un $H_{\min}$ vērtības ir savstarpēji saistītas un šīs vērtības tieši ietekmē parametri F_{pm}/ν , α un f . Eksperimentā, variējot f , nav izdevies novērot tehnoloģiskos parametrus, pie kuriem $H_{\min}$ paaugstināms, bet H_{diff} samazināms. Kā minēts iepriekš, tad uzkausējumam nepieciešams nodrošināt minimālu H_{diff} , bet pirmām kārtām, uzkausējumam ir jānodrošina nepieciešamais uzkausējuma augstums $H_{\min}$. Tādēļ tehnoloģisko parametru izvēle ir kompromisu ceļš, sākotnēji pārlicinoties, vai tehnoloģiskie parametri nodrošina vēlamu $H_{\min}$, sekojoši izvēloties parametrus, kas veido uzkausējumus ar mazāku H_{diff} – nepieciešama mazākā mehāniskā apstrāde.

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 lietojot $\alpha = 90^\circ$ 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.

5.3.2. Spraustas leņķa variēšanas analīze

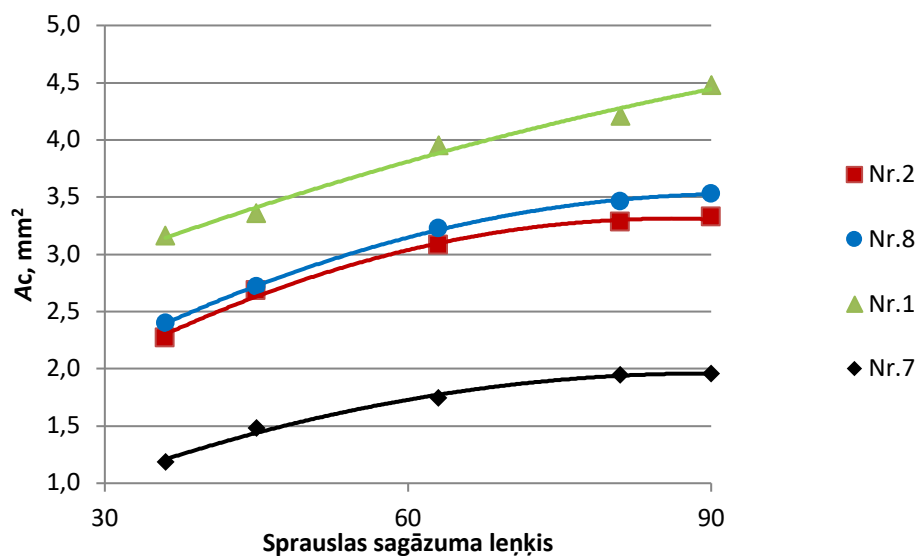
Paraugi ar dažādām spraustas sagāzuma leņķa α vērtībām: 90° , 81° , 63° , 45° un 36° , veidoti ar individuālu uzkausējumu, lai būtu nosakāma uzkausējuma ģeometrija. Sekojošā 5.7. attēlā redzami eksperimenta parauga Nr.7 rezultāti pie spraustas leņķa variēšanas. Redzams, ka leņķa α ietekme uz uzkausējuma ģeometriju ir būtiska.

Nemot vērā būtisko leņķa α ietekmi uz uzkausējuma ģeometriju, kas novērojama 5.7. attēlā redzamajos rezultātos, sekojoši (5.8. att.) apskatīta uzkausējuma šķērsriezuma laukuma (A_c) atkarība no α izmaiņām.



5.7. att. Parauga Nr.7. uzkausējuma šķērsriezuma profili pie variētām α vērtībām.

Pēc 5.8. attēlā redzamajiem rezultātiem novērojams, ka, α vērtībām samazinoties, samazinās A_c vērtības, lai arī pievadītā materiāla daudzums nav mainījies. No tā var secināt, ka α ietekmē uzkausējuma efektivitāti (E_{pm}), ko savukārt var ietekmēt lāzera intensitāte, lāzera fokusa attāluma un pulvera plūsmas izmaiņas. Minēto apstākļu ietekme pārbaudīta turpmāk darbā.



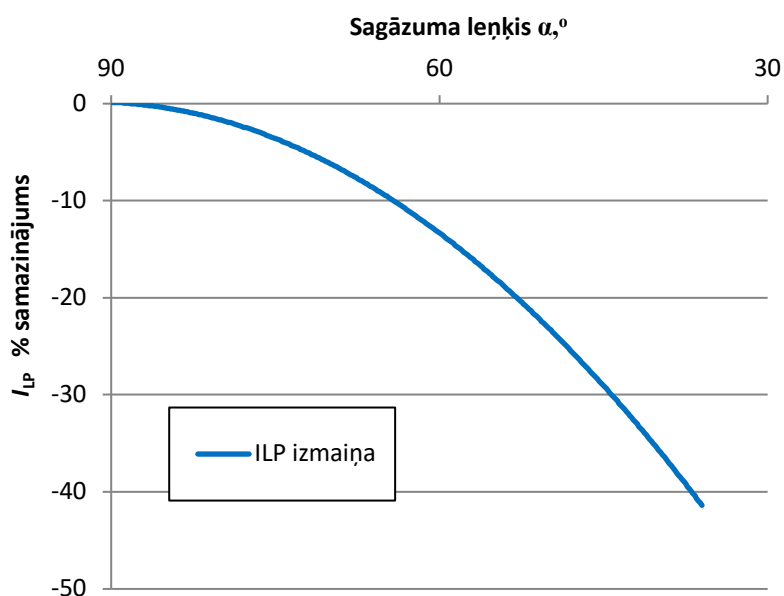
5.8. att. Uzkausējuma šķērsriezuma laukumu izmaiņas, mainoties α .

Lāzera intensitāte

E_{pm} samazinājumu var skaidrot ar lāzera intensitātes (I_{LP}) kritumu, jo pēc I_{LP} aprēķina izteiksmes (5.1), var pārlicināties, ka I_{LP} ir atkarīga no lietotās lāzera jaudas (P) un lāzera punkta laukuma (S). Savukārt S vērtības pakāpeniski palielinās, ja tiek veikta α samazināšana no 90° , 81° , 63° , 45° līdz 36° . Lāzera punkts no apaļa tiek pārveidots par ovālu.

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

Lāzera intensitātes vērtības pie dažādām α vērtībām noteiktas, lietojot izteiksmi (5.1), savukārt 5.9. attēlā attēlotas procentuālās I_{LP} vērtību izmaiņas, kur I_{LP} pie $\alpha = 90^\circ$ ir references punkts.



5.9. att. Lāzera intensitātes I_{LP} izmaiņas, mainoties α .

No 5.9. attēlā redzamā procentuālā samazinājuma rezultātiem var novērot, ka α vērtībām samazinoties no 90° līdz 36° , I_{LP} vērtības samazinās līdz pat 40 %.

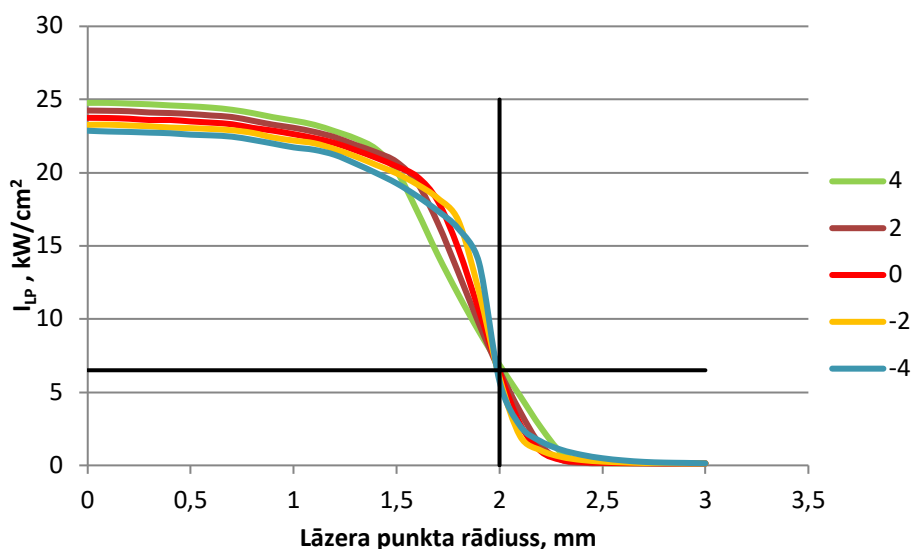
Lāzera fokusa analīze

Mainot α vērtības, tiek izmainīta ne tikai lāzera punkta forma, bet arī darba distance no sprauslas optikas līdz atsevišķām lāzera punkta zonām, t.i., vienīgi lāzera punkta vidussegments atrodas fokusā, bet perpendikulāri uzkausēšanas virzienam, mainās distance no bāzes virsmas līdz optikai. Ilustratīvi attēlotais darba virsmu novietojums pie mainīgām α vērtībām parādīts 5.10. attēlā. Attēlā redzams lāzera stara profils (sarkanās krāsas līnija), kas iegūts, lietojot *Primes LaserDiagnose* aprīkojumu. Savukārt ar melnu līniju ilustratīvi iezīmēts lāzera punkts sānskatā, kur horizontālā darba virsma ir nodrošināma vienīgi pie $\alpha = 90^\circ$, bet pie visām pārējām α vērtībām pozīcija mainās un mainās arī virsmas attālums līdz optikai, un līdz ar to mainās arī lāzera punkta intensitātes raksturs, kas sekojoši apskatīta detalizētāk.



5.10. att. Lāzera punkts sānskatā pie dažādām leņķa α vērtībām¹.

Analizējot iegūtos lāzera stara skenēšanas rezultātus, kas veikta ar *Primes LaserDiagnose* aprīkojumu, ir izveidots – uzkonstruēts lāzera punkta intensitātes profils dažādās darba distancēs pie $\alpha = 90^\circ$, mainot vienīgi darba distanci (5.11. att.). Attēlā 5.11. parādīta viena puse no simetriskā lāzera punkta intensitātes profila, lai izteiktāk ieraugāma atšķirība starp intensitātes profiliem dažādās darba distancēs.



5.11. att. Lāzera punkta profila intensitātes (I_{LP}) izmaiņa fokusā (0) un ārpus fokusa.

Izvērtējot 5.11. attēla grafikā iegūtos rezultātus, zinot, ka eksperimentā lietotais lāzera punkts ir 4 mm diametrā, noskaidrotas lāzera intensitātes vērtības pie lāzera punkta rādiusa 2 mm. Iegūtās vērtības parāda, ka pie 4 mm punkta minimālā intensitāte ir $6,5 \text{ kW/cm}^2$ jeb 65 W/mm^2 (5.11. att.). Šīs vērtības ir tuvas literatūrā [38] minētajai vērtībai 70 W/mm^2 , kas optimāli nepieciešama lāzeruzkausēšanas realizēšanai. Tādēļ secināms, ka visā 4 mm lāzera punkta diapazonā iespējams realizēt kvalitatīvu uzkausēšanu neatkarīgi no leņķa α izmaiņām. Bet, lai noskaidrotu procentuālo lāzera punkta segmentu intensitātes izmaiņu pie $\alpha = 36^\circ$, rezultāti analizēti detalizētāk. Kā redzams 5.11. attēlā, tad I_{LP} līkne pie dažādiem darba attālumiem (no -4 mm līdz $+4 \text{ mm}$, kur 0 mm ir lāzera fokusa attālums) ir atšķirīga.

¹ ilustratīvs attēlojums, izmantojot Primes LaserDiagnose programmas vizualizāciju

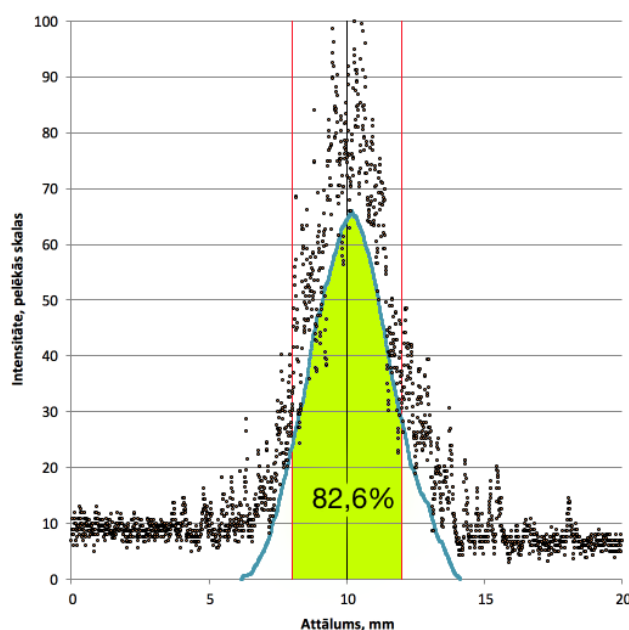
Noskaidrots, ka eksperimentā pie $\alpha = 36^\circ$ maksimālā distance ārpus fokusa sasniedza 2,75 mm. Sekojoši izstrādāts tuvināts lāzera punkta intensitātes sadalījuma modelis pie $\alpha = 36^\circ$ (14. pielikums), ievērojot lāzera punkta attāluma izmaiņas ietekmi uz intensitātes raksturu. Kā arī referencei izstrādāta teorētiska lāzera punkta intensitātes līkne pie $\alpha = 36^\circ$, bez intensitātes izmaiņām. Salīdzinot abas līknes, noskaidrots, ka lāzera punkta intensitāte ir atkarīga no attāluma izmaiņas, bet intensitātes samazinājums vidēji ir 0,6 %. Tādēļ var uzskatīt, ka eksperimentā lāzera punkta intensitātes izmaiņa, ko ietekmē atšķirīgais attālums no optikas līdz lāzera punkta segmentiem, nav būtiska.

Ņemot vērā iegūtos rezultātus, var secināt, ka darba distances kontrole ir nepieciešama, un tā jānodrošina pēc iespējas tuvāku lāzera fokusa attālumam, bet tam nav jāveic augstas precizitātes iestatīšana, jo 3 mm attāluma izmaiņa nerada būtisku ietekmi uz lāzera intensitātes profilu.

Pulvera plūsmas analīze

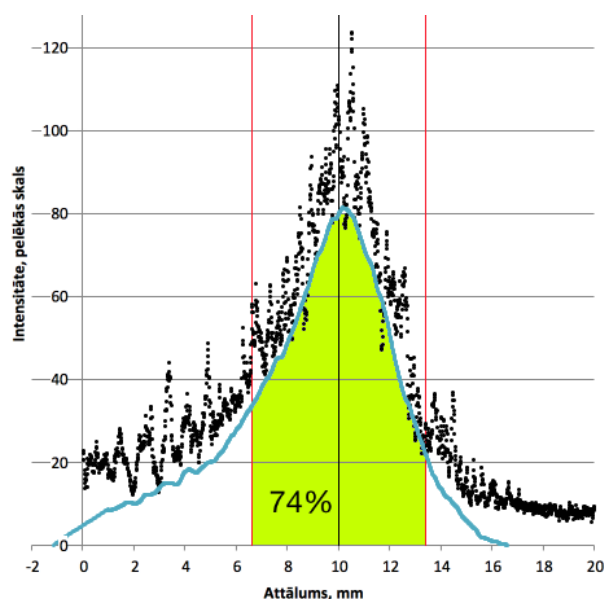
Uzkausējuma efektivitāte (E_{pm}) ir atkarīga no pulvera daudzuma, kas pievadīta uzkausējuma zonā, kas savukārt ir atkarīgs no pulvera plūsmas. Šajā apakšnodaļā apskatīta sprauslas leņķa ietekme uz pulvera plūsmas efektivitāti (I_{PF}), t.i., procentuālais pievadītā pulvera daudzums, kas pievadīts uzkausējuma zonā attiecībā pret visu pievadīto pulvera daudzumu.

Pulvera plūsma analizēta ar *ImageJ* attēlu analīzes programmu. Ir noteikta plūsmas intensitāte, kas iekļauta sekojošā 5.12. attēla grafikā, kur attēlota pulvera plūsmas intensitāte pie $\alpha = 90^\circ$. Sekojoši veikta iegūto rezultātu (melno punktu) izlīdzināšana, iegūstot pulvera intensitātes līkni zilā krāsā, kas līdzinās normālam sadalījumam. Sekojoši noteikts intensitātes līknes un x ass veidotais figūras laukums, kā arī intensitātes līknes, x ass un vertikālo sarkano līniju, kas norāda lāzera punkta robežas, laukums. Turpinājumā nosaka šo abu laukumu attiecību un, to izsakot procentos, tiek iegūta pulvera intensitātes procentuālā vērtība. Noskaidrots, ka pie $\alpha = 90^\circ$ lāzera punkta robežās pievadīts 82,6 % visa transportētā pulvera.



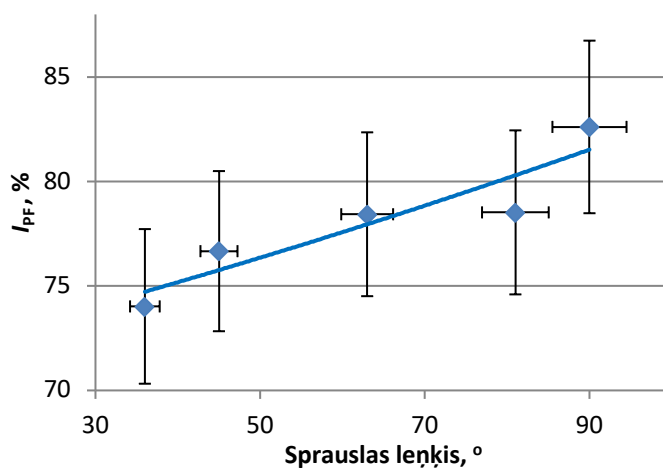
5.12. att. Pulvera plūsmas intensitāte (I_{PF}) pie sprauslas pozīcijas $\alpha = 90^\circ$.

Redzams, ka pie perpendikulāra novietojuma daļa uzkausējuma zonā neiekļūst. Bet, kā redzams turpmākā pulvera plūsmas analīzes 5.13. attēla grafikā, samazinot α , palielinās materiāla daudzums, kas neiekļūst uzkausējuma zonā pie sprauslas sagāzuma leņķa $\alpha = 36^\circ$ I_{PF} ir 74 %.



5.13. att. Pulvera plūsmas intensitāte (I_{PF}) pie sprauslas pozīcijas $\alpha = 36^\circ$.

Redzot, ka I_{PF} ir atkarīgs no sprauslas sagāzuma leņķa, sekojoši 5.14. attēla grafikā attēlota I_{PF} atkarība no α , kur savstarpējā parametru atkarības korelācija ir tuva lineārai funkcijai.

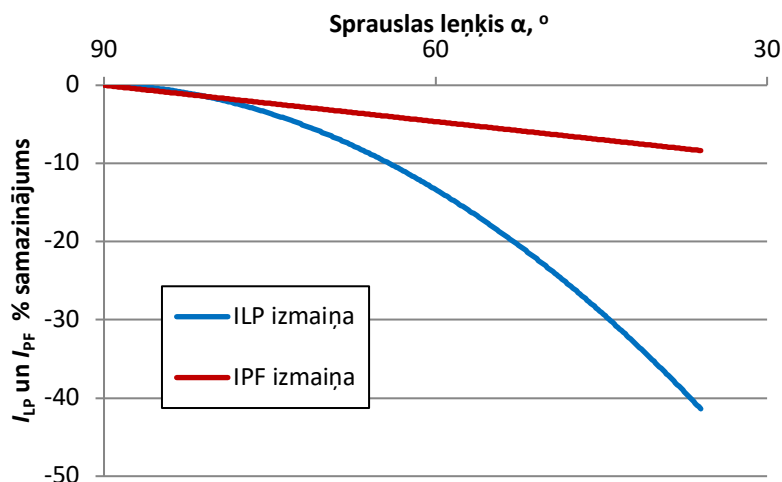


5.14. att. Pulvera plūsmas intensitātes (I_{PF}) izmaiņas atkarībā no sprauslas sagāzuma leņķa, individuālie rezultāti uzrādīti ar 5 % kļūdu.

Veikta lineāra 5.14. attēlā redzamo rezultātu aproksimācija, un iegūta izteiksme (5.2), kas raksturo lietotās sprauslas COAX12 pulvera plūsmas intensitāti pie lietotās pulvera padeves ($F_{pm} = 25$ g/min) transportgāzes (3 l/min) un aizsarggāzes (15 l/min) daudzuma.

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

Procentuālās uzkausēšanas procesa I_{LP} un I_{PF} izmaiņu atkarība no leņķa α iekļauta 5.15. attēlā. I_{LP} un I_{PF} procentuālās vērtību izmaiņas noteiktas, par references punktu ņemot iegūtās vērtības pie $\alpha = 90^\circ$.



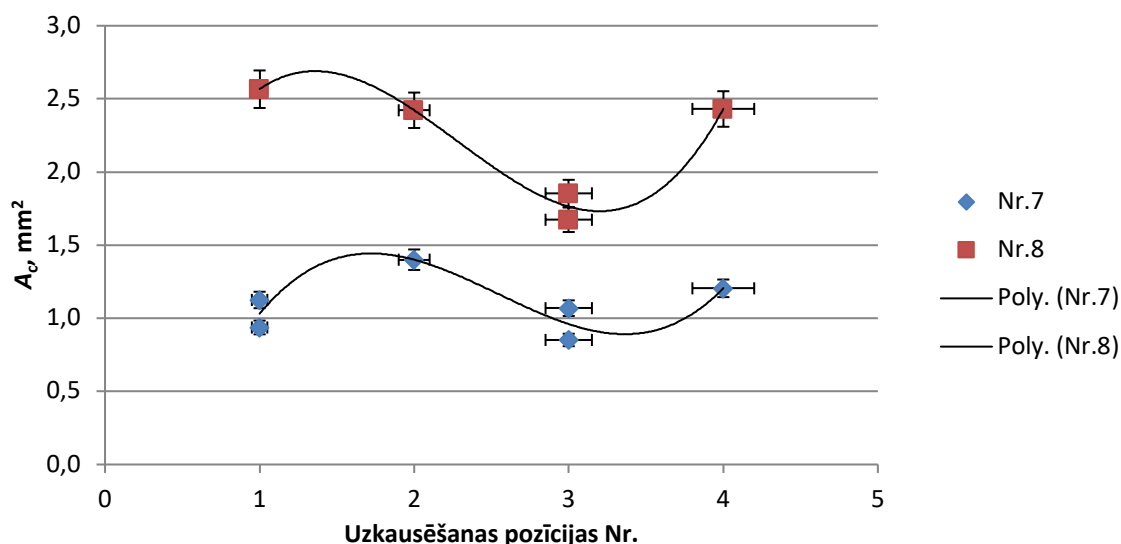
5.15. att. I_{LP} un I_{PF} intensitāšu izmaiņas, mainoties α .

Vadoties no šajā apakšnodaļā apskatītā, var secināt, ka uzkausējuma laukuma A_c izmaiņas ir atkarīgas no vairākiem faktoriem. A_c nebūtiski ietekmē lāzera punkta jaudas intensitātes sadalījums, kas veidojas, atšķirīgā optikas un sagataves attāluma dēļ samazinot α . Bet galvenokārt A_c ietekmē lāzera punkta jaudas intensitāte (I_{LP}) un pulvera plūsmas intensitātes (I_{PF}). Samazinoties I_{LP} par 42 %, bet I_{PF} par 8,5 %, raksturlielums A_c ir samazinājies par 37 % pie $\alpha = 36^\circ$ salīdzinājumā ar rezultātiem pie $\alpha = 90^\circ$. Šeit novērota kopējā tendence un izdalītā atsevišķo procesa parametru procentuālās izmaiņas neatspoguļo precīzi raksturlieluma kvantitatīvo atkarību no tiem. Visi šajā nodaļā apskatītie tehnoloģiskie un procesa parametri rezultātu veido neatdalīti viens no otra. 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. Tehnoloģisko parametru aprakstošā izteiksme izstrādāta 6.2. nodaļā.

5.3.3. Sprauslas pozīciju maiņas analīze

Lāzeruzkausēšanas eksperimentā paraugi uzkausēti visās pamata uzkausēšanas sprauslas pozīcijās: F , VU , OH un VD , lai pārlicinātos par lāzeruzkausēšanas tehnoloģijas iespējām uzkausēt urbumos un sarežģītas piekļuves virsmām. Minēts iepriekš, ka šādas uzkausēšanas pozīcijas cikliski mainās pie spirālveida uzkausējuma urbumam (5.1. att.), tam atrodoties horizontālā pozīcijā. Uzkausēšana dažādās sprauslas pozīcijās realizēta, izmantojot 5.1. tabulā Nr.7 un Nr.8 minētos tehnoloģiskos parametrus.

Darbā apskatīta uzkausēšanas raksturlielumu (H , A_c , D_c) atkarība no uzkausēšanas sprauslas pozīcijas un ieviesti koeficienti raksturlielumu noteikšanai, ja zināmas raksturlieluma vērtības F sprauslas pozīcijā. Sekojošā 5.16. attēla grafikā attēlota A_c vērtību atkarība no pozīcijas, kas numurēta kā 5.1. attēlā.



5.16. att. A_c rezultātu atkarība no uzkausēšanas pozīcijas paraugiem Nr.7 un Nr.8, rezultāti norādīti ar 5% kļūdu.

Pēc 5.16. attēla redzams, ka abu paraugu A_c vērtības identiskās pozīcijās ir atšķirīgas, kas izriet no atšķirīgajiem tehnoloģiskajiem parametriem. Bet raksturlieluma A_c izmaiņas raksturs pie sprauslas pozīcijas maiņas abiem parametriem (Nr. 7 un Nr. 8) ir līdzīgs. Tas nodrošināja iespēju raksturlielumam A_c un analogiski H un D_c noteikt, par cik raksturlieluma vērtības VU , OH un VD atšķirīgas no F uzkausēšanas pozīcijas.

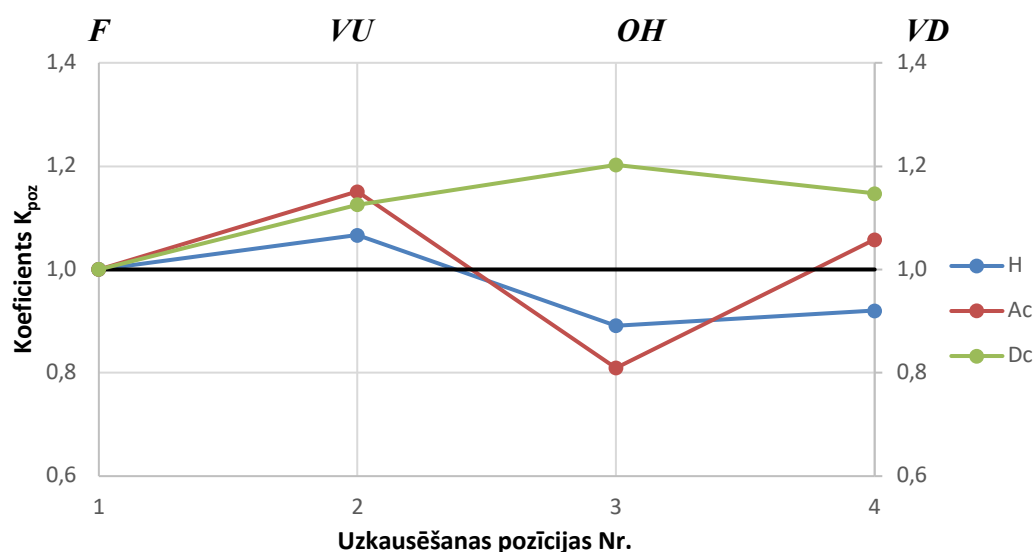
Paraugiem ir apkopotas vidējās koeficientu vērtības katrā uzkausēšanas pozīcijā un tās apkopotas 5.2. tabulā. Par atskaites punktu ņemta F uzkausēšanas pozīcija, tādēļ šajā pozīcijā koeficients ir “1” un attiecīgi visu pārējo pozīciju vērtības ir iegūstamas, F pozīcijas rezultātu reizinot ar noskaidrojamās pozīcijas koeficientu K_{poz} .

5.2. tabula

Uzkausēšanas rezultātu koeficienti pie dažādām sprauslas uzkausēšanas pozīcijām

Parametrs	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

Grafiski iegūtās koeficientu vērtības apkopotas 5.17. attēlā. Šāds attēlojums nodrošina iespēju pārskatāmi novērtēt raksturlielumu atkarību no uzkausēšanas sprauslas pozīcijas. Apkopojot rezultātus pie F , VU , OH un VD sprauslas pozīcijām, noskaidrots, ka būtisks rezultātu ietekmējošs faktors ir pulvera plūsma, ko ietekmē gravitācija. Kā rezultātā OH pozīcijā, samazinoties pulvera daudzumam uzkausējuma zonā, samazinās H un A_c vērtības, bet, samazinoties pievadītajam materiāla daudzumam, samazinās bāzes virsmas “aizēnojums”, līdz ar to palielinās D_c . Savukārt novērojama gravitācijas ietekme arī uz materiālu formēšanos, kas novērojama, salīdzinot koeficientus pie VU un VD , kur pie VD H un A_c vērtības ir zemākas, bet pieaudzis D_c .



5.17. att. Rezultātu koeficienti pie F , VU , OH un VD uzkausēšanas pozīcijām.

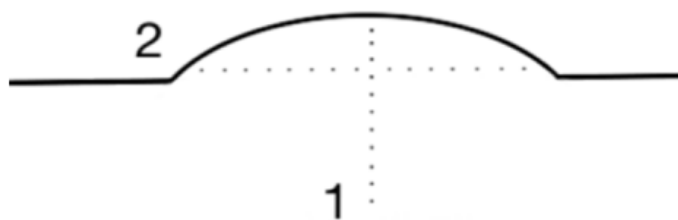
Koeficienti, kas uzskaitīti 5.2. tabulā un apkopoti 5.17. attēlā, ir aktuāli pie lāzeruzkausēšanas eksperimentā lietotās transporta gāzes un aizsarggāzes padeves daudzuma (3 l/min un 15 l/min), kā arī pie uzkausēšanas sprauslas leņķa $\alpha = 36^\circ$. Jo, mainoties gāzes daudzumam un leņķim α , mainīsies pulvera plūsma, kas, kā noskaidrots, ietekmē uzkausēšanas raksturlielumus. Iegūtie dati ir izmantojami kā atskaites punkts turpmākiem eksperimentiem, kas ļaus savlaicīgi paredzēt rezultātu atšķirības un veikt preventīvas izmaiņas tehnoloģiskajos parametros.

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.

5.3.4. Lāzeruzkausējuma cietības mērījumi

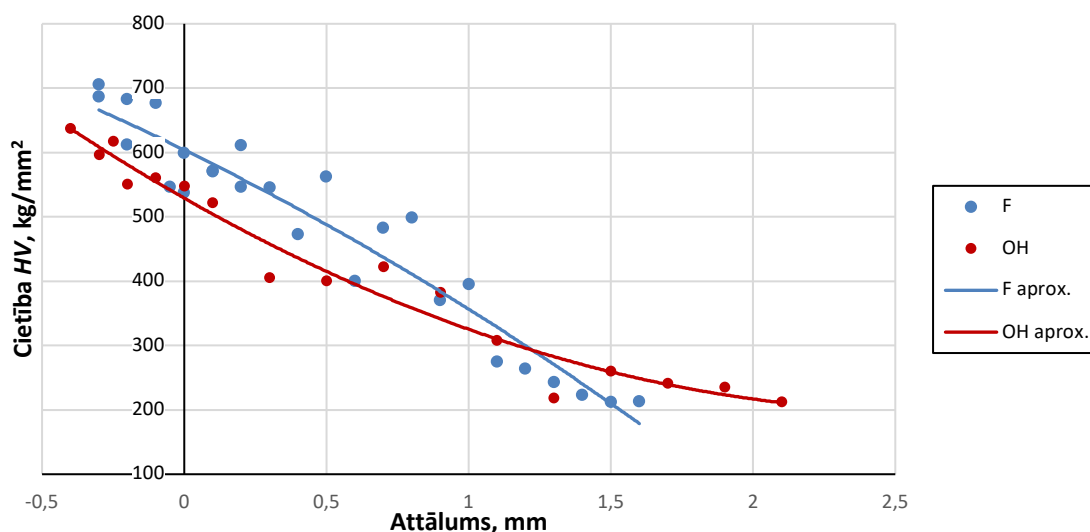
Uzkausējuma cietības mērījumi veikti, lai pārlicinātos par uzkausējuma kvalitāti un uzkausējumam iegūtajām mehāniskajām īpašībām. Darbā veikti mikrocietības mērījumi pēc Vikersa skalas (HV) (LVS EN ISO 6507-1:2006), lietojot 0,2 kg svaru un 10 s mērīšanas laiku. Cietības mērījumi pēc HV uzkausējumiem ir piemērotākā mehānisko īpašību pārbaude, jo ar tās palīdzību iespējams noteikt mehāniskās īpašības un to izmaiņu vēlamajās makrošlifa zonās un virzienā. Cietības mērījumi veikti individuāli veidotam uzkausējumam.

Praksē lielākoties cietības mērījumi veikti paraugu šķērsgriezumam no uzkausējuma augstākā punkta virzienā uz bāzes materiālu, perpendikulāri tam – vertikālā virzienā. Šādi mērījumi veikti, lai pārlicinātos par uzkausētā slāņa, caurkausējuma zonas, bāzes materiāla karstuma ietekmes zonas un bāzes materiāla cietības vērtību atšķirībām. Darbā cietības mērījumi veikti divos dažādos virzienos un atšķirīgās mērīšanas lokācijas vietās, kas attēlotas 5.18. attēla mērīšanas shēmā. Papildus jau minētajiem vertikālajiem cietības mērījumiem veikti horizontāli cietības mērījumi, kas paralēli bāzes materiāla virskārtai un attiecīgi veikti pa uzkausējumu, bet tuvu bāzes materiālam, aptuveni (0,1 mm attālumā).



5.18. att. Cietības mērījumu shēma: 1 – vertikālais; 2 – horizontālais.

Analizējot vertikālos cietības mērījumus, noskaidrots, ka uzkausējuma cietību ietekmē uzkausēšanas pozīcija (F , OH), minētā faktora ietekme uz rezultātu attēlota 5.19. attēlā.



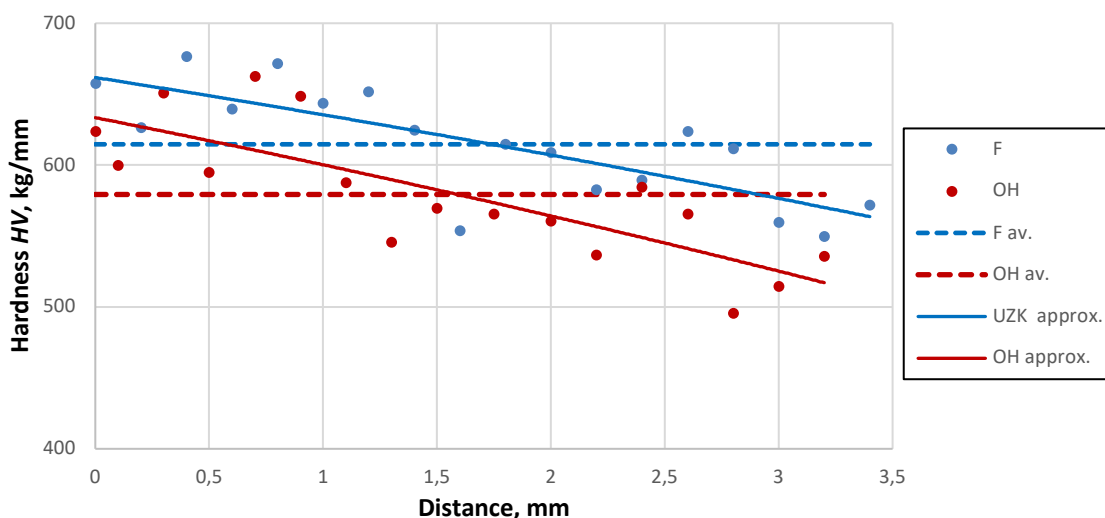
5.19. att. Vertikālie cietības mērījumi pie $\alpha = 36^\circ$.

Rezultātu atspoguļojumā pozitīvās attāluma vērtības ir distance bāzes materiālā, bet negatīvie attālumi ir uzkausējums. Grafiski attēlotais 0 mm attālums neatbilst precīzam bāzes materiāla virskārtas līmenim, 5.19. attēlā tas norādīts informatīvā nolūkā.

Cietības vērtību samazinājums, pozīciju nomainot no F uz OH (5.19. att.), ietekmē uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) izmaiņa, kas aprakstīta iepriekšējā nodaļā (5.3.3. nodaļa). Kā iepriekšējā nodaļā noskaidrots, tad pie OH pozīcijas palielinās D_c vērtības, kas norāda, ka bāzes materiāla piejaukums uzkausējumā ir paaugstinājies – palielinājusies uzkausētā materiāla atšķaidīšanas pakāpe. Savukārt, uzkausējumam atšķaidoties, tas zaudē savu oriģinālo ķīmisko sastāvu un sekojoši arī fizikāli mehāniskās īpašības.

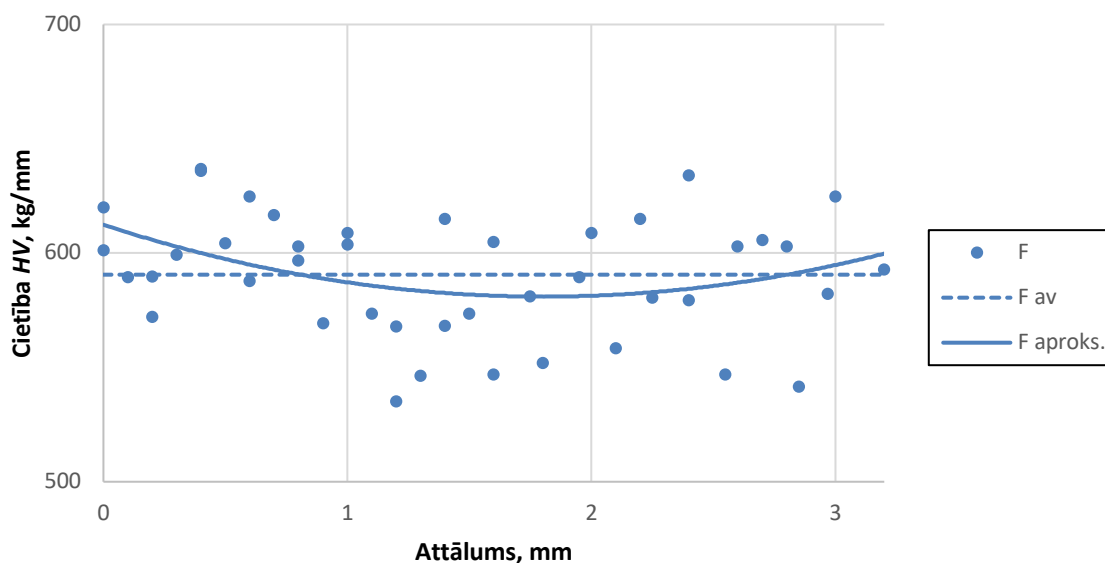
Darbā veikti horizontālie uzkausējuma cietības mērījumi, kas realizēti pēc 5.18. attēlā redzamās shēmas 2, un veikti pa uzkausējumu aptuveni 0,1 mm attālumā no bāzes materiāla virskārtas. Šādi uzkausējuma cietības mērījumi nodrošina informāciju par cietības vērtību vienmērību, izmaiņām atsevišķam uzkausējuma profilam.

Horizontālie cietības mērījumi pie $\alpha = 36^\circ$ apkopoti 5.20. attēla grafikā. Noskaidrots, ka pie horizontālajiem cietības mērījumiem uzkausējuma pozīcijai (F vai OH) ir identiska ietekme uz rezultātu sadalījumu, kā pie vertikālajiem cietības mērījumiem (5.19. att.).



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

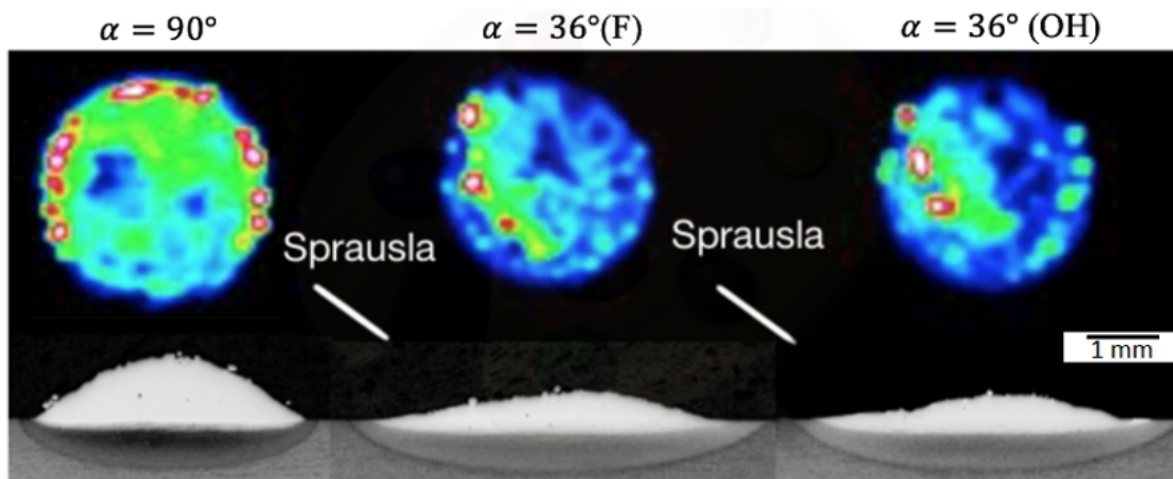
Iegūto horizontālo cietības mērījumu raksturs (5.20. att.) liecina, ka ir novērojama $\alpha = 36^\circ$ ietekme uz rezultātu – cietības vērtības mainās atšķirīgās uzkausējuma profila zonās. Lai pārlicinātos par α ietekmi uz horizontālajām cietības vērtībām, darbā veikti cietību mērījumi paraugiem, kas veidoti ar $\alpha = 90^\circ$, pēc 5.18. attēlā redzamās shēmas 2. Iegūtie uzkausējuma horizontālie cietību vērtību rezultāti apkopoti 5.21. attēlā.



5.21. att. Uzkausējuma horizontālie cietības mērījumi pie $\alpha = 90^\circ$.

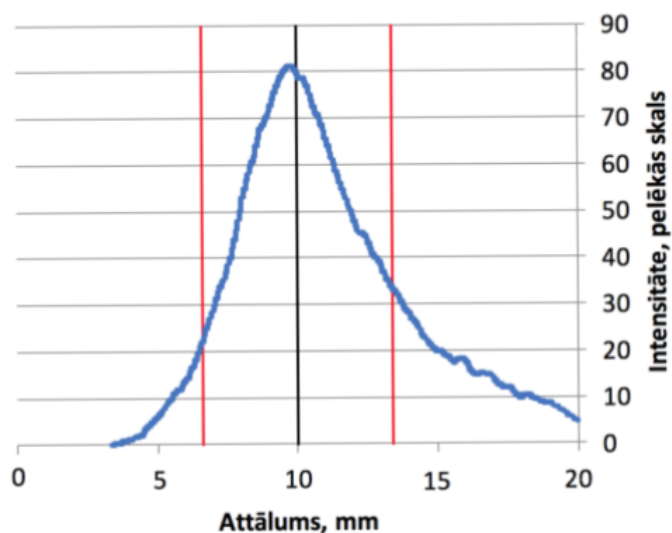
Apskatot cietības vērtības uzkausējumiem, kas iegūti ar sprauslas leņķi $\alpha = 90^\circ$ (5.21. att.), secināts, ka visā profila garumā aproksimētās cietības vērtības ir tuvu vidējām vērtībām (HV 591 kg/mm²), kas sadalītas simetriski ar nelielu vērtību pieaugumu profila malās. Kā arī noskaidrots, ka uzkausējuma profila horizontālo cietības vērtību vienmērīgums ir atkarīgs no lietotā α vērtības un vienmērīgākās vērtības iegūstamas pie $\alpha = 90^\circ$ uzkausējumiem.

Iegūtie rezultātu apkopojumi 5.20. un 5.21. attēlos liecina, ka horizontālās profila HV vērtības $\alpha = 90^\circ$ paraugu vidusdaļā ir vienādas ar $\alpha = 36^\circ$ paraugu profila vidusdaļas un no sprauslas tālāks zonas HV vērtībām. Savukārt, analizējot $\alpha = 90^\circ$ paraugu (5.21. att.) horizontālo cietību vērtību pieaugumu uzkausējuma profila malās, noskaidrots, ka to iespaido apaļais lāzera punkts. Lāzera punktam uzkausējuma profila malās ir īsākais lāzera stara ietekmes laiks – īsāks uzkausēšanas process. Līdz ar to šādi profila malās tiek nodrošināta straujākā uzkausējuma atdzišana, veidojot augstākās cietības vērtības. Ar procesa laika ilgumu izskaidrojama arī uzkausējuma profila vidusdaļas HV vērtību samazināšanās, jo šajā zonā uzkausēšanas procesa gaitā lāzera iedarbības laiks ir visilgākais un uzkausējuma atdzišana notiek lēnāk. Salīdzinājumam pie $\alpha = 90^\circ$ lāzera punkta 0,5 mm vidus segmentā procesa laiks pie $v = 0,5$ m/min aizņem 0,48 s, bet profila malā 0,5 mm segmenta procesa laiks aizņem 0,32 s, kas ir par 34 % īsāks procesa laiks (vizualizācija un aprēķins iekļauts 15. 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 (0 mm attālums 5.20.att.). Bet īsākais uzkausēšanas procesa laiks nav paaugstinājis HV vērtības tālākajā uzkausējuma profila daļā, kā atzīmēts iepriekš, tad vērtības profila tālākajā daļā ir tuvas $\alpha = 90^\circ$ vidus daļas HV vērtībām. Tādēļ sekojoši, 5.22. attēlā apskatītas uzkausējuma vannas temperatūras sadalījuma atšķirības starp $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 36$ un starp $\alpha = 36^\circ$ pie OH pozīcijas.



5.22. att. Uzkausējuma vannas temperatūras sadalījums (*E-MAqS* vizualizācija) un uzkausējuma profils pie $\alpha = 36^\circ$ un $\alpha = 90^\circ$.

Analizējot 5.22. attēlā redzamo uzkausēšanas vannas temperatūras sadalījuma atšķirības, konstatēts, ka *F* un *OH* pozīcijās veikto uzkausējumu vannu temperatūru sadalījumi ir praktiski identiski, un to pašu var atzīmēt par uzkausējuma profiliem. Savukārt novērots, ka pie $\alpha = 90^\circ$ augstākās temperatūras zonas uzkausējuma vannā veidojas pa lāzera punkta perimetru, aptuveni 270° lokā, simetriski uzkausēšanas virzienam. Tas tāpēc, ka pie $\alpha = 90^\circ$ sprauslas leņķa pulvera plūsma līdzinās normālam sadalījumam – zemākās pulvera plūsmas intensitāte ir lāzera punkta perimetrā. Turklāt, zinot 5.3.2. nodaļā noskaidroto: leņķa α variēšana būtiski ietekmē pulvera plūsmas intensitātes sadalījumu. Sekojoši 5.23. attēlā apskatīta pulvera plūsmas intensitāte pie $\alpha = 36^\circ$, ievērojot 5.20. un 5.22. attēlos sprauslas un uzkausējuma profila savstarpējo novietojumu.



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

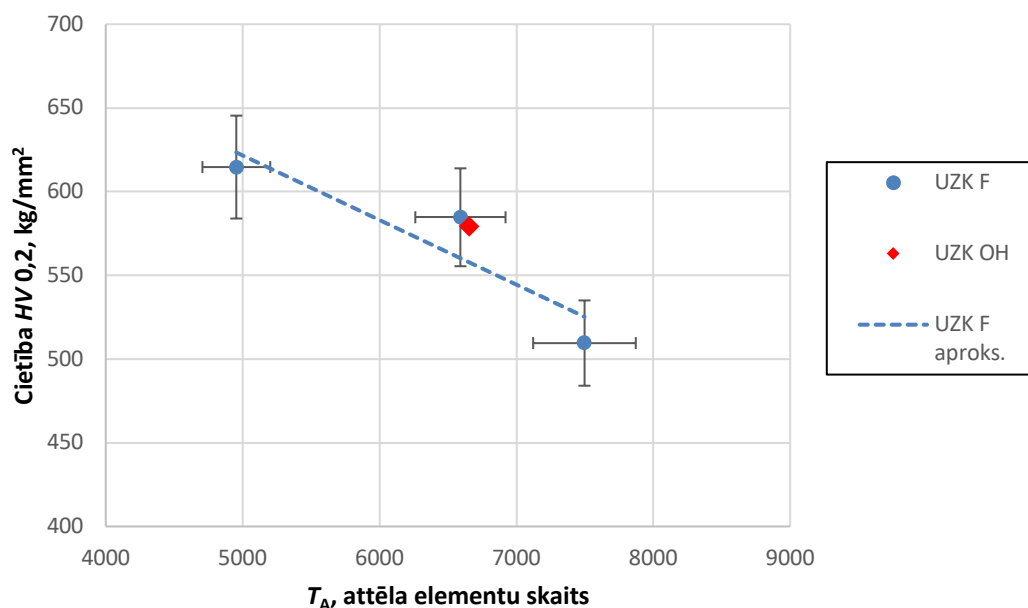
Attēlā 5.23. redzams, ka pie $\alpha = 36^\circ$ pulvera plūsma vairs nelīdzinās normālam sadalījumam, kur tālākajā lāzera punkta zonā (13 mm attālumā) pulvera intensitāte ir augstāka par aptuveni 70 % salīdzinājumā ar tuvāko lāzera punkta zonu (7 mm attālumā). Novērotais

liekt domāt, ka pulvera plūsmas intensitātes koncentrācijai jeb “aizēnojumam” pie HV vērtībām ir zināma ietekme, visnotaļ ietekme ir vērojama 5.20. attēlā redzamajā HV vērtību samazinājumā tālākajā uzkausējuma zonā. “Aizēnojums” potenciāli absorbē vairāk lāzera enerģiju. Bet tam šajā promocijas darbā nav rasts tiešs izskaidrojums.

Kvantitatīvs uzkausēšanas apstākļu novērtējums

Izvērtējot iegūtos rezultātus, secināts, ka uzkausējuma mehāniskās īpašības (HV) ir atkarīgas no ārkārtīgi daudz aprakstītu, atzīmētu un vēl neidentificētu apstākļu kopuma. Tādēļ darbā šis apstākļu kopums reducēts uz uzkausējuma vannas temperatūras sadalījuma kvantitatīvām vērtībām T_A , kas ir uzkausēšanas procesā reģistrēti attēlu elementu (“pikseļu”) skaits, kas pārsniedz iestatīto mērķa temperatūru (1500°C). T_A vērtības noteiktas, lietojot *E-MAqS* sistēmu, ar kuras palīdzību viena uzkausējuma veidošanas procesā reģistrēti 1000 ieraksti pie 5 s uzkausēšanas. T_A vērtības turpmāk darbā apskatītas kā vidējās vērtības vienam uzkausējumam.

Sekojošā 5.24. attēla grafikā apkopoti dati par vienu atsevišķu uzkausējumu, noskaidrojot uzkausējuma vidējo procesa T_A vērtību ietekmi uz vidējām uzkausējuma profila horizontālajām HV vērtībām.

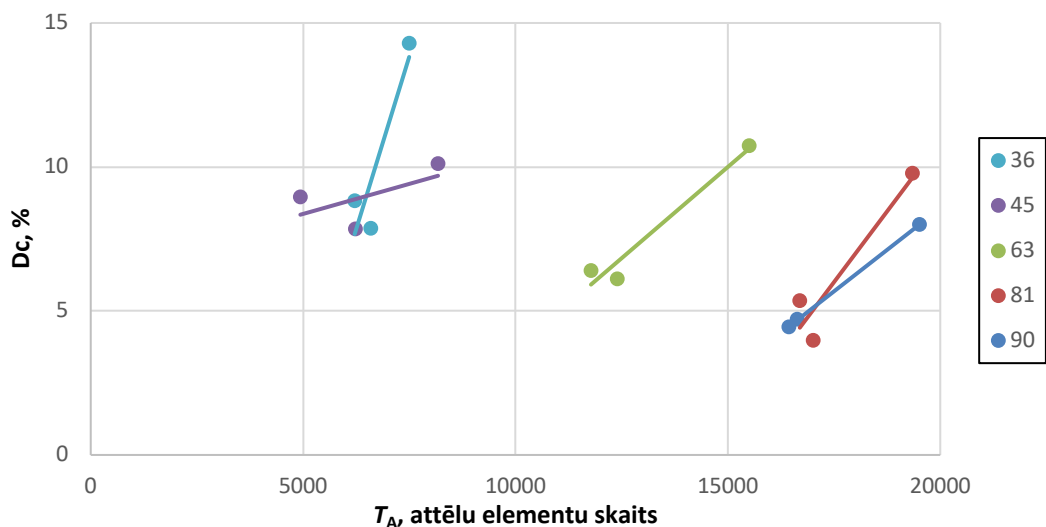


5.24. att. HV vērtību atkarība no procesa vidējām T_A vērtībām pie $\alpha = 36^\circ$.

No iegūtajiem 5.24. attēla datiem redzams, ka paraugiem, pieaugot T_A vērtībām, HV vērtības samazinās. Kā arī pēc 5.24. attēlā redzamā grafika 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 izmantojama uzkausēšanas apstākļu novērtēšanai.

Redzot, ka T_A vērtību izmaiņa ietekmē uzkausētā materiāla mehāniskās īpašības, sekojoši darbā pārbaudīta T_A ietekme uz D_c (5.25. att.), jo zināms, ka T_A apraksta uzkausēšanas vannas

temperatūru skaitliskās vērtības, kas potenciāli ietekmē caurkausējumu, pastarpināti ietekmējot D_c vērtības.

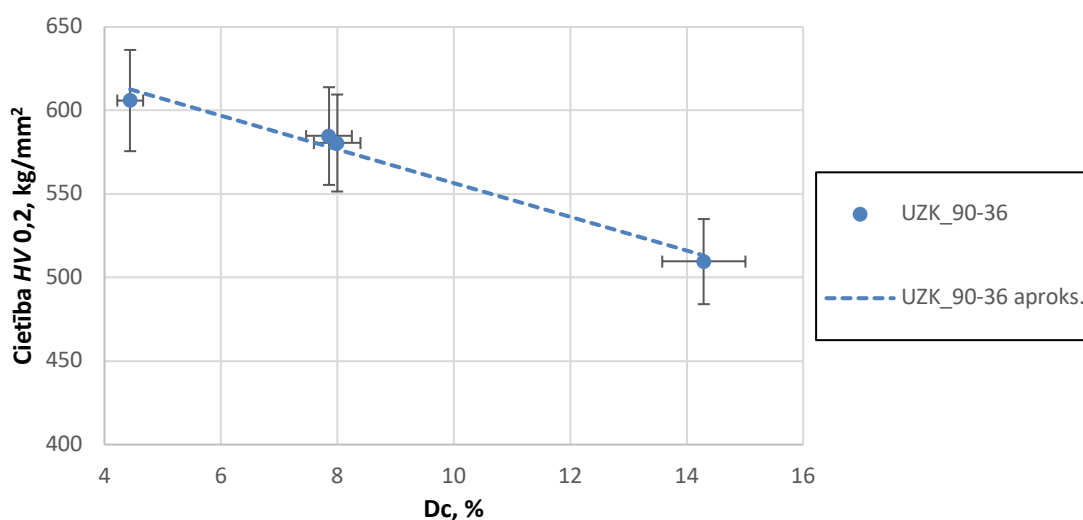


5.25. att. D_c vērtību atkarība no T_A un α .

Pēc 5.25. attēla rezultātiem redzams, ka D_c atkarība no T_A ir jāapskata, ņemot vērā un atdalot uzkausēšanas sprauslas leņķa α vērtības. Pretējā gadījumā var veidoties maldīgs priekšstats, ka, pieaugot T_A , samazinās D_c .

Analizējot 5.25. attēla grafiku, redzams, ka α būtiski ietekmē uzkausēšanas vannas kvantitatīvos apstākļus – samazinoties α , samazinās arī T_A , kas vēlreiz norāda uz to, ka T_A vērtības ir izmantojamas uzkausēšanas apstākļu skaitliskai novērtēšanai. Iegūtos rezultātus sagrupējot pa sprauslas leņķa α vērtībām, redzams, ka, pieaugot T_A , palielinās arī D_c , kā gaidīts. Tas apstiprina, ka T_A norāda indikācijas par caurkausējuma lielumu, kas savukārt ietekmē D_c .

Sekojošā 5.26. attēla grafikā apskatīta HV vērtību atkarība no D_c , jo no iepriekš redzētā šī raksturlielumu atkarība ir acīmredzama. Turklāt industrijai ir pielietojamāka šo raksturlielumu sakarība, kā 5.24.attēla grafikā norādītā, jo šeit nav iesaistīti $E-MAqS$ sistēmas mērījumi.



5.26. att. HV vērtību atkarība no D_c .

Pēc 5.26. attēla redzams, ka, palielinoties D_c vērtībām, samazinās HV vērtības, kā sagaidāms, jo pie lielākām D_c vērtībām uzkausējamais materiāls lielākā apjomā samaisās ar bāzes materiālu, izmainot arī uzkausējuma mehāniskās īpašības. Turklāt D_c ietekme uz HV vērtībām novērota arī pie vertikālajiem (5.19. att.) un horizontālajiem (5.20. 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 salīdzinājumā ar F uzkausēšanas pozīciju.

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. Bet būtiskais cietības pieaugums rada papildus grūtības pie tālākas mehāniskas apstrādes. 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 uzkausējumu cietību, pēc [60] pie 500°C augstas temperatūras ir nodrošināma HV 300 kg/mm² cietība. Savukārt uzkausējumu var veidot ar citu uzkausējamo pulveri, piemēram, Deloro[™] 30 [51], nodrošinot HV 300 kg/mm² robežās un labāku apstrādājamību.

Nodaļā par uzkausējuma cietības mērījumiem secināts, ka augstākas T_A vērtības ietekmē zemāku HV vērtību veidošanos. Noskaidrots, ka T_A vērtības skaitliski spēj dot indikācijas par uzkausēšanas apstākļiem, kas ietekmē uzkausējuma raksturlielumu vērtības, bet salīdzinātajiem rezultātiem ir jābūt veidotiem ar vienādu uzkausēšanas sprauslas leņķi α .

Šajā nodaļā iegūtā informācija par T_A ietekmi uz uzkausējumu raksturlielumiem ir būtiska lāzeruzkausēšanā, bet fundamentāliem atzinumiem datu apjoms ir par mazu, jo viena T_A vērtība atspoguļo atsevišķa uzkausējuma procesa vidējo T_A , savukārt vienam atsevišķam uzkausējumam izveidots viens šķērsgriezuma profils, kur noteikta visa šķērsgriezuma vidējā horizontālā HV vērtība. Tādēļ T_A , D_c un HV savstarpējā ietekme jāpēta atsevišķos, speciāli veidotos, pētījumos, kur atsevišķam uzkausējumam veidoti vairāki šķērsgriezumi ar piesaisti iegūtajām T_A vērtībām.

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, kas ļoti plaši lietots kā bāzes materiāls. Tādēļ ir būtiski uzkausējumu realizēt ar paredzamu ģeometriju, lai pēcapstrāde būtu nepieciešama pēc iespējas mazāk. Tas apliecina iemeslu, kādēļ ir būtiski izstrādāt matemātiskās izteiksmes, lai nodrošinātu prognozējamus uzkausējumu raksturlielumus, kas realizēts 6. nodaļā.

5.4. Eksperimentu rezultātu ticamības validēšana

Eksperimentā uzkausētajiem paraugiem izveidoti šķērsriezuma makrošlīfi, kas fotografēti ar mērogu un uzkausējuma raksturlielumi noteikti programmā SolidWorks. Lietotā izmēru noteikšanas metodika nodrošina ērtu uzkausējuma augstuma, kā arī uzkausējuma un caurkausējuma laukuma noteikšanu, kas pielietojams citu uzkausējuma raksturlielumu aprēķināšanai. Darbā noteiktas arī uzkausējuma šķērsriezuma profila cietību vērtības, lietojot INNOVATEST NEXUS 4000TM aprīkojumu.

Abām minētajām uzkausējumu raksturlielumu mērīšanas metodēm rezultāta nolasījuma precizitāte ir būtiska rezultāta precizitātei. Uzkausējuma ģeometriskajiem raksturlielumiem programmā SolidWorks izzīmēts katra parauga uzkausējuma un caurkausējuma perimetrs, izveidojot modeli, kur veicami visi nepieciešamie mērījumi. Savukārt cietības mērījums veikts, izmērot iespaiduma diagonāles, kas iestatītajā spēkā un ilgumā mehāniski iespiesta ar piramīdas formas uzgali. Abām mērīšanas metodēm rezultātu nolasījums realizējams bez kontakta un tas atkarīgs no precīzas kontūras identificēšanas un atzīmēšanas. Tādēļ, lai pārliecinātos par raksturlielumu noteikšanas metožu piemērotību, šajā nodaļā veikta mērījumu kļūdas noteikšana, nosakot variācijas koeficientu un standarta kļūdu.

Sekojošā 5.3. tabulā parādīta desmit atkārtotu rezultātu A_c mērījumu vērtību nolasīšana un tālāku arī variācijas koeficienta un standarta kļūdas aprēķinu gaita. Aprēķinos lietotas vispārzināmas statistikas aprēķinu izteiksmes: standartnovirzes, variācijas koeficienta un standartkļūdas aprēķina izteiksmes (5.3), (5.4) un (5.5) [1], [3], [21].

5.3. tabula

MAG uzkausēšanas eksperimenta parauga Nr.16 rezultāta A_c variācijas koeficienta un standarta kļūdas aprēķins

n	A_c , mm ²	$(A_{c\text{ vid}} - A_c)^2$
1	64,59	0,94
2	63,18	0,20
3	64,25	0,39
4	63,18	0,21
5	63,59	0,001
6	63,80	0,03
7	63,20	0,18
8	63,69	0,003
9	63,15	0,23
10	63,65	0,001
$A_{c\text{ vid}}$	63,63	$\sum A_{c\text{ vid}}$ 2,17
s		0,49
V		0,77
$s_{A_{c\text{ vid}}}$		0,16

Standartnovirzes aprēķins (5.3).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ci} - A_{cvid})^2}{n - 1}}. \quad (5.3)$$

Variācijas koeficienta aprēķins (5.5).

$$V = \frac{s}{A_{cvid}} \cdot 100. \quad (5.4)$$

Vidējā aritmētiskā standartklūda (5.5).

$$s_{Acvid} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.5)$$

Kopumā variācijas koeficienta un standarta klūdas aprēķini veikti uzkausējuma un caurkausējuma laukumam (A_c , A_b), kā arī minimālajam un maksimālajam uzkausējuma augstumam (H_{min} , H_{max}). Sekojošā 5.4. tabulā ir redzami parauga Nr. 16 variācijas koeficienti un standarta klūdas, kas noteiktas 10 atkārtotiem, neatkarīgiem mērījumiem.

5.4. tabula

Parauga Nr.16 variācijas koeficients un standarta klūda

	Variācijas koeficients, %	Standarta klūda
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 mērījumi nolasīti ar INNOVATEST NEXUS 4000TM aprīkojumu, kur katrs iespiedums ir individuāls cietības mērījums. Jāņem vērā, ka atkārtots iespiedums viena iespieduma tuvumā, kā arī citā uzkausējuma zonā, iespējams, dos pilnīgi atšķirīgu mērījumu. Tādēļ veikti viena individuāla mērījuma – viena iespieduma, 10 neatkarīgi rezultātu nolasījumi. Cietības mērījumu vērtības apkopotas sekojošā 5.5. tabulā, kur iekļautas arī variācijas koeficienta un standarta klūdas aprēķinu vērtības, kur aprēķiniem izmantotas (5.3), (5.4) un (5.5) izteiksmes [1], [3], [21].

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta cietības mērījumu variācijas koeficienta un standarta kļūdas

Nr.	HV , kg/mm ²	$(HV_{\text{vid}} - HV)^2$
1	506,2	25,3
2	508,3	8,58
3	509,8	2,04
4	501,6	92,74
5	511,8	0,32
6	519,8	73,44
7	518,8	57,3
8	507,4	14,67
9	517,8	43,16
10	510,8	0,18
HV_{vid}	511,23	ΣHV_{vid} 317,76
s		5,94
V		1,16
$s_{HV \text{ vid}}$		1,88

Pēc 5.3., 5.4. un 5.5. tabulās redzamajiem rezultātiem var secināt, ka pielietotās mērīšanas metodes sniedz rezultātus ar mazu variācijas koeficientu un standarta kļūdu. Lai arī standarta kļūda pie uzkausējuma ģeometrisko raksturlielumu noteikšanas ir krietni zemāka, no iegūtajiem aprēķinu rezultātiem ir secināms, ka uzkausējumu raksturlielumu vērtības ir ar augstu ticamību un tas attiecināms uz visiem uzkausēšanas eksperimentos veiktajiem mērījumiem, jo 5.3., 5.4. un 5.5. tabulās iekļautajiem mērījumiem nav bijis selektīvs raksturs. Turklāt šāda uzkausējuma raksturlielumu rezultātu noteikšanas metode ir izmantojama arī nākotnes uzkausēšanas eksperimentu raksturlielumu noteikšanai.

6. MATEMĀTISKĀS IZTEIKSMES UZKAUSĒŠANAS TEHNOLOĢISKO RAKSTURLIELUMU PROGNOZEI

Darbā, lai nodrošinātu tehnoloģiskā procesa rezultātu prognozējamību, ir izstrādātas matemātiskās izteiksmes. Minētās matemātiskās izteiksmes izstrādātas uzkausējuma raksturlielumu (H , $H_{\min}$, D_c un A_c) noteikšanai, izmantojot lietotos tehnoloģiskos parametrus: *MAG* tehnoloģijai U , v un w , bet lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai P , v un F_{pm} . Matemātisko izteiksmju izstrāde veikta uz darba autora izstrādāto *MAG* uzkausēšanas un lāzeruzkausēšanas eksperimentu rezultātu pamata, bet izteiksmju adekvātums pārbaudīts arī ar citu autoru izstrādāto eksperimentu materiāliem.

MAG uzkausēšanas tehnoloģijas matemātiskās izteiksmes izstrādātas, sastādot regresijas vienādojumu no tehnoloģiskajiem parametriem, to savstarpējiem reizinājumiem un noteiktajiem ietekmes koeficientiem. Savukārt lāzeruzkausēšanas matemātiskās izteiksmes izstrādātas, izveidojot kvadrātisku vienādojumu ar vienu faktoru, kur ieviestais faktors apraksta lietotos tehnoloģiskos parametrus.

6.1. *MAG* uzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana

Matemātiskās izteiksmes *MAG* tehnoloģijai veidotas, sastādot regresijas vienādojumu, kur iekļauti visi eksperimenta tehnoloģiskie parametri: spriegums (U), uzkausēšanas ātrums (v) un stieples padeves ātrums (w). *MAG* uzkausēšanas matemātiskās izteiksmes izstrādātas būtiskākajiem raksturlielumiem: minimālais uzkausējuma augstumu ($H_{\min}$), uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c) un siltuma daudzums (Q). *MAG* uzkausēšanā Q vērtību noteikšana, lietojot tehnoloģiskos parametrus, ir būtiska, jo tas atvieglo Q noteikšanu, pretēji jālieto (2.1), kur jāzina procesa vidējā strāva un spriegums. Matemātiskā izteiksme *MAG* uzkausēšanas tehnoloģijas raksturlielumiem izstrādātas, izmantojot SYSTAT programmatūru.

Visus uzskaitītos raksturlielumus iespējams izteikt ar funkciju (6.1), kur rezultāts ir atkarīgs no visiem iesaistītajiem tehnoloģiskajiem parametriem U , v un w . [3], [10], [21]

$$Y = f(U, v, w). \quad (6.1)$$

No funkcijas (6.1) iespējams uzrakstīt regresijas polinomu ar trīs mainīgajiem tehnoloģiskajiem parametriem, to savstarpējiem reizinājumiem un ietekmes koeficientiem $b_0 \dots b_{33}$ [21]:

$$Y = b_0 + b_1 U + b_2 v + b_3 w + b_{12} Uv + b_{13} Uw + b_{23} vw + b_{11} U^2 + b_{22} v^2 + b_{33} w^2. \quad (6.2)$$

Katra raksturlieluma matemātiskā izteiksme izstrādājama, noskaidrojot tehnoloģisko parametru (U, v, w) ietekmes koeficientus $b_0 \dots b_{33}$. Tehnoloģisko parametru ietekmes – regresijas koeficienti tiek atrasti, pielietojot SYSTAT programmas nodrošinātās iespējas. Izstrādātās matemātiskās izteiksmes apkopotas sekojošās (6.3), (6.4) un (6.5) izteiksmēs.

$$H_{\min} = -19,39 + 2,45U - 10,54v + 0,04w + 0,14Uv + 0,15vw - 0,06U^2 + 3,16v^2. \quad (6.3)$$

$$D_c = 378,41 - 54,40U + 235,90v + 32,351w - 12,94Uv - 1,88Uw + 8,45vw + 1,88U^2. \quad (6.4)$$

$$Q = 93,29 - 409,43v + 41,14w - 18,06Uv - 18,64vw + 0,51U^2 + 487,78v^2 - 0,91w^2. \quad (6.5)$$

Izveidotajām matemātiskajām izteiksmēm tika noskaidrots adekvātums, lietojot dispersijas analīzes tehniku (*ANOVA*¹), kas ir vispārzināma statistikas analīzes metode izlašu vērtību sadalījumu atšķirību noteikšanai [25]. *ANOVA* analīzes rezultāti apkopoti 6.1. tabulā.

6.1. tabula

MAG uzkausēšanas matemātisko izteiksmju *ANOVA* (Dispersijas) analīzes dati

	$H_{\min}$	D_c	Q
Noviržu kvadrātu summa			
Regresija	3,24	495,5	53927,3
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
<i>F</i> kritērijs	42,57	8,12	1002,07
<i>p</i> -vērtība (<i>F</i> testam)	<0,0005	0,003	<0,0005
Determinācijas koeficients R^2 (%)	97,1	86,3	99,9

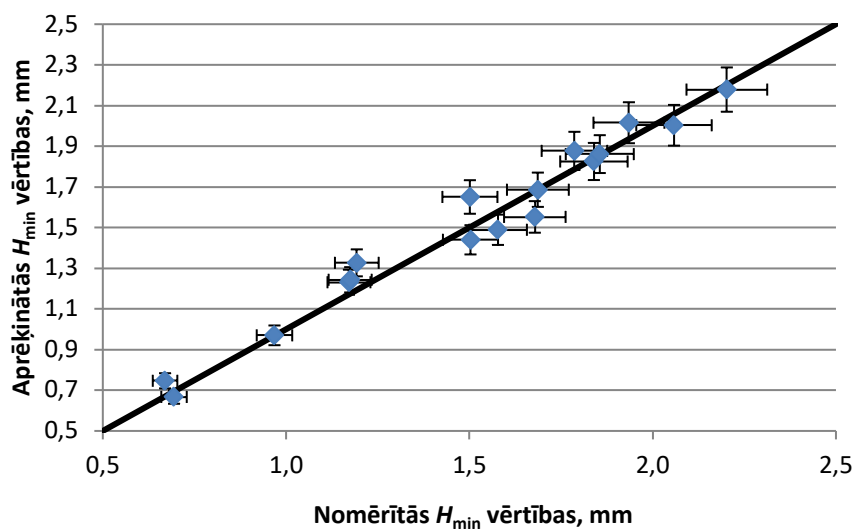
Saskaņā ar *ANOVA* [25] pārbaudes tehniku, ja matemātiskajām izteiksmēm pēc Fišera kritērija (*F* ratio) testa *p*-vērtības nesasniedz 0,05 vērtību, tad ieviestā izteiksme ir būtiska. Aplūkojot 6.1. tabulu, redzams, ka lielākā *p*-vērtība = 0,003 iegūta pie D_c izteiksmes, kas ļauj secināt, ka izstrādātās matemātiskās izteiksmes ir būtiskas un pamatotas.

Determinācijas koeficients R^2 ir korelācijas koeficienta kvadrāta vērtības un tas tiek izmantots matemātisko izteiksmju adekvātuma pārbaudei. R^2 norāda procentuālos gadījumus, kad veiktā eksperimenta rezultāti tiek izskaidroti ar ieviesto matemātisko izteiksmi. Mazākās R^2 vērtības (86,3%) norāda uz to, ka 86% eksperimenta uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) vērtības ir izskaidrotas ar izveidoto matemātisko izteiksmi (6.4). Savukārt labākie rezultāti ir

¹ *analysis of variance (ANOVA) technique* (angl.)

pie minimālā uzkausējuma augstuma un siltuma daudzuma matemātiskām izteiksmēm, kur attiecīgi 97,1% un 99,9% rezultātu tiek izskaidroti ar konkrēto matemātisko izteiksmi [3], [25].

Redzams (6.1. tabula), ka lielākās matemātisko izteiksmju adekvātuma problēmas vērojamas pie D_c , kur matemātiskās izteiksmes neizskaidro 13,7 % rezultātu. Bet $H_{\min}$ un Q matemātiskās izteiksmes uzrādīja augstu precizitāti, kur visa eksperimenta rezultātos neatbilstība nepārsniedz 3 %, bet individuālos rezultātos katrs atsevišķs mērījums ietilpst 5 % kļūdas robežās (6.1. att.). Pēc 6.1. attēlā redzamā rezultātu atspoguļojuma var spriest par izstrādātās matemātiskās izteiksmes precizitāti, jo nomērīto un aprēķināto rezultātu vērtības ir tuvākas diagonālei, jo precīzāka aprēķina izteiksme.



6.1. att. Nomērītās un aprēķinātās $H_{\min}$ vērtības.

Matemātiskās izteiksmes, kas apraksta D_c , skar lielākās adekvātuma problēmas, kas izskaidrojamas ar to, ka raksturlielums ir atkarīgs gan no uzkausēšanas procesa tehnoloģiskajiem parametriem, kas ietverti aprēķinā, gan uzkausēšanas procesā notiekošajiem materiālu pārvietošanās, formēšanās procesiem, elektriskā loka un citiem procesiem, kas nav ietverti izteiksmē (6.4).

Darba 16. pielikumā ir iekļautas divas alternatīvas izteiksmes ($H_{\min}$ un A_c noteikšanai) ar vienu parametru, kas ietver siltuma ievadi, stieples padevi un uzkausēšanas ātrumu, līdzīgi kā darīts lāzeruzkausēšanas matemātisko izteiksmju izstrādē. Bet salīdzinājumā ar šajā apakšnodaļā izstrādātajām izteiksmēm, tās uzrāda zemāku precizitāti.

Nodaļā izstrādātās matemātiskās izteiksmes nav salīdzināmas ar literatūras avotos publicētajiem *MAG* uzkausēšanas eksperimentu rezultātiem. Kā tas norādīts arī literatūras apskatā: izmantotajā literatūrā [10], [23] netiek lietoti identiski tehnoloģiskie parametri. Savukārt avotā [10] nav norādītas uzkausēšanas eksperimentā lietotās stieples padeves vērtības (w , m/min), bet avotā [23] nav informācijas par lietotajām sprieguma vērtībām (U , V).

Kopumā visas nodaļā izstrādātās matemātiskās izteiksmes ir pielietojamas praksē, lai prognozētu iegūstamo rezultātu un atvieglotu tehnoloģiskā procesa izstrādi un realizēšanu ikdienas un pētniecības darbā.

6.2. Lāzeruzkausēšanas matemātisko izteiksmju noteikšana

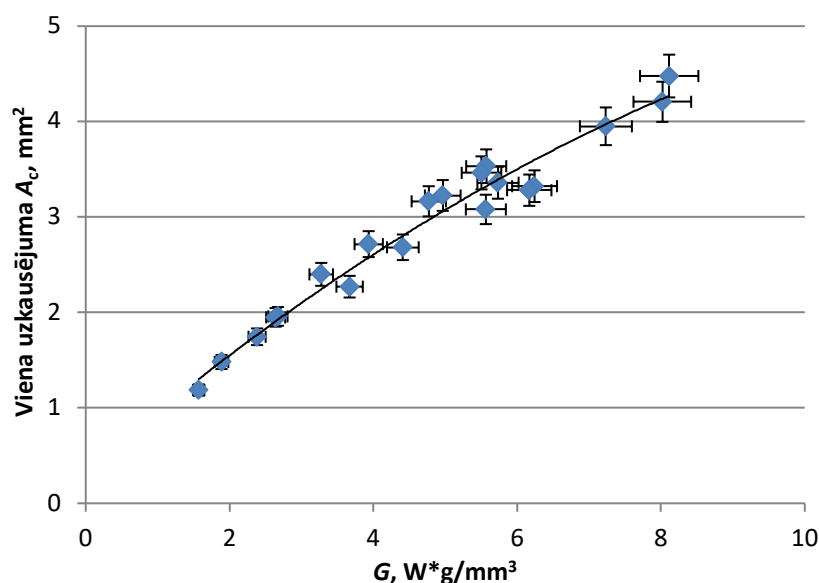
Lāzeruzkausēšanas eksperimenta analīzē noskaidrots, ka lāzeruzkausēšanas jauda (P), sprauslas leņķis (α) un lietoto optikas elementu veidotais lāzera punkta laukums (S) apraksta uzkausēšanas lāzera jaudas intensitāti (I_{LP}), kas aprēķināma pēc izteiksmes (5.1). Lietojot I_{LP} un iekļaujot tehnoloģiskos parametrus: uzkausēšanas ātrumu (v) un pulvera plūsmas daudzumu (F_{pm}), tai skaitā, ņemot vērā pulvera plūsmas intensitāti (I_{PF}), kas aprēķināma ar izteiksmi (5.2), iespējams ieviest jaunu lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G (6.6). Ieviestais parametrs G iekļauj un apraksta visus lietotos tehnoloģiskos parametrus vienā parametrā.

$$G = \frac{4 \cdot P \cdot \sin \alpha}{\pi D^2} \cdot \frac{F_{pm}}{v} \cdot \frac{\left(0.072 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180^\circ}\right) + 0.701\right)}{0.814}, \left[\frac{W \cdot g}{mm^3}\right]. \quad (6.6)$$

Sekojoši noskaidrots, ka ieviestais lāzeruzkausēšanas ietekmes parametrs G (6.6) ir pielietojams uzkausēšanas raksturlielumu aprēķināšanai. Turklāt, pielietojot vienkāršotu izteiksmi (6.7), netiek būtiski ietekmēta precizitāte¹.

$$G = \frac{4 \cdot P \cdot \sin \alpha}{\pi D^2} \cdot \frac{F_{pm}}{v}, \left[\frac{W \cdot g}{mm^3}\right]. \quad (6.7)$$

Parametra G (6.7) ietekme uz uzkausējuma laukumu (A_c) redzama 6.2. attēlā un A_c aprēķina izteiksme, lietojot G , parādīta (6.8). Izteiksme (6.8) izskaidro 96,7% eksperimentā iegūto A_c rezultātu. Ņemot vērā to, lāzeruzkausēšanā parametrs G (6.7) izmantots arī citu uzkausēšanas raksturlielumu noteikšanai.



6.2. att. G parametra ietekme uz A_c , atsevišķie mērījumi norādīti ar 5 % kļūdu.

$$A_c = -0.02G^2 + 0.65G + 0.33. \quad (6.8)$$

¹ Vienīgi pie D_c precizitātes novērots 1,5 procentpunktu samazinājums

Ieviestais parametrs G (6.7) pielietots arī citu kvantitatīvo uzkausējuma raksturlielumu prognozēšanai, kas apkopoti sekojošās izteiksmēs. Viena uzkausējuma augstuma (H) vērtību prognozes aprēķins, lietojot parametru G , iekļauts (6.9) izteiksmē, kas izskaidros 95,3 %.

$$H = -0,008G^2 + 0,25G + 0,2. \quad (6.9)$$

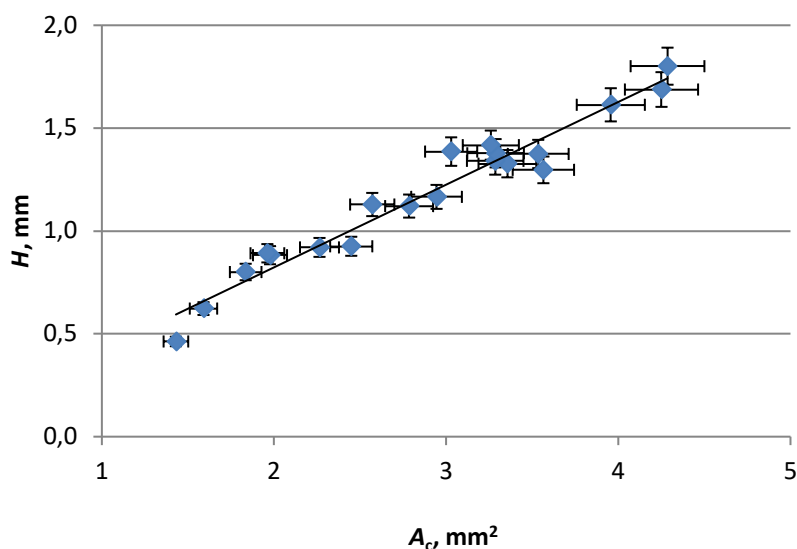
Vairāku sekojošu uzkausējumu jeb laukuma uzkausējums veidots vienīgi lāzeruzkausēšanas un MAG uzkausēšanas salīdzināšanas eksperimentā (4. nodaļa), tādēļ pieejams mazāks datu apjoms, lai iegūtu augstas precizitātes minimālās uzkausēšanas augstuma ($H_{\min}$) prognozes aprēķinu. Neskatoties uz to, darbā apskatīta $H_{\min}$ vērtību atkarība no parametra G , kas ietverta (6.10) izteiksmē. Kā sagaidāms, izteiksme (6.10) izskaidro 70 % iegūto rezultātu, kas kopumā vērtējams kā labs rezultāts.

$$H_{\min} = 0,025G^2 - 0,065G + 0,58. \quad (6.10)$$

Uzkausējuma samaisījuma pakāpe (D_c), izmantojot parametru G , aprēķināma pēc sekojošas (6.11) izteiksmes, kas izskaidro 81 % rezultātu.

$$D_c = 0,7G^2 - 9,77G + 43,64. \quad (6.11)$$

Analizējot uzkausēšanas tehnoloģijas rezultātus, secināts, ka uzkausējuma laukumam (A_c) ir tieša ietekme uz H vērtībām, savstarpējā raksturlielumu atkarība parādīta 6.3. attēlā. Un augstuma noteikšanai iespējams pielietot vienkāršu lineāru vienādojumu (6.12), kur iegūtais aprēķins izskaidro 95,2 % iegūto rezultātu.



6.3. att. Uzkausējuma augstuma (H) atkarība no uzkausējuma laukuma (A_c), atsevišķie rezultāti norādīti ar 5% kļūdu.

$$H = 0,38A_c + 0,06. \quad (6.12)$$

Nodrošinot plašākas uzkausējuma laukuma prognozēšanas iespējas, empīriski veikta izteiksmes (6.8) pilnveidošana. Pilnveidošana iespējama, ņemot vērā uzkausēšanas efektivitāti (E_{pm}), jo uzkausēšanā var tiek lietotas atšķirīgas uzkausēšanas sprauslas un tehnoloģiskie parametri, kas ietekmēt E_{pm} . Ņemot vērā minēto, darbā izstrādāta izteiksme (6.13), kuras izstrādes gaita iekļauta 17. pielikumā.

$$A_c = \frac{\left(-1,7 \cdot \frac{E_{pm}}{\rho} + 10\right) G^2 + \left(77,83 \cdot \frac{E_{pm}}{\rho} + 1,11 \cdot 10^{-12}\right) G + \left(86,5 \cdot \frac{E_{pm}}{\rho} + 5\right)}{10000}. \quad (6.13)$$

Izveidotā teorētiskā matemātiskā izteiksme (6.13) paredzēta viena uzkausējuma laukuma aprēķināšanai, zinot tehnoloģiskos parametrus G aprēķināšanai, paredzamo uzkausēšanas efektivitāti E_{pm} (pie $\alpha = 90^\circ$) un uzkausējamā materiāla īpatsvaru (ρ). Rezultātā aprēķins ir piemērots A_c vērtību noteikšanai, lietojot jebkādu citu uzkausēšanas materiālu, tehnoloģiskos parametrus un uzkausēšanas aprīkojumu. Izteiksmes (6.13) adekvātums nav darbā pārbaudīts, jo tā radīta pēc eksperimentu izstrādes posma, kā arī citu autoru pētījumos nav nepieciešamo parametru apjoms, lai to pārbaudītu.

Nodaļā izstrādātās lāzeruzkausēšanas raksturlielumu prognozes izteiksmes veidotas, lietojot lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G . Izstrādātās izteiksmes ar parametru G izskaidro pārliecinošu daļu uzkausēšanas raksturlielumu rezultātu, līdz ar to aprēķini ir pielietojami praktiskajā darbā.

Raksturlielumu aprēķinu izteiksmes izstrādātas pie 3 l/min pulvera transportgāzes (Ar) un 15 l/min aizsarggāzes (Ar) padeves, līdz ar to minētajās vērtībās izteiksmes uzrādīs visaugstāko ticamību. Vienīgi (6.13) aprēķinam aizsarggāzes un pulvera transportgāzes padeves vērtības ir izvērtētas E_{pm} vērtībā.

Nodaļā izstrādātās lāzeruzkausēšanas raksturlielumu prognozes izteiksmes sekojoši darbā pārbaudītas, lietojot ar izteiksmju izstrādi nesaistītus autora eksperimentus, kā arī citu autora publicētos pētījumus.

6.3. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru aprēķina izteiksmes

Darbā ir izstrādātas matemātiskās izteiksmes, kuras precīzi determinē iegūstamos raksturlielumus, zinot lietotos tehnoloģiskos parametrus. Šādā veidā ar augstu precizitāti iespējams noteikt raksturlielumus, bet nevis 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 Uzskaitītie parametri pielietojami turpmāk, kas 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. Sekojoši darbā izstrādāta izteiksme (6.14), ar kuras palīdzību iespējams noteikt lietojamo P , kas izteikta no (5.1) izteiksmes.

$$P = I_{LP} \cdot \frac{\pi D^2}{4 \sin \alpha}. \quad (6.14)$$

Sekojoši no lāzeruzkausēšanas eksperimenta rezultātiem un rezultātu analīzes izdalīti atsevišķi lineāri vienādojumi (6.15), (6.16) un (6.17). Lineārie vienādojumi iegūti pēc regresijas vienādojumu izveides un apraksta (6.14) trūkstošos parametrus.

$$I_{LP} = 37,475 \cdot H + 67,54. \quad (6.15)$$

$$H = 0,187 \cdot G + 0,252. \quad (6.16)$$

$$G = 4,81 \cdot H_{\min} - 0,073. \quad (6.17)$$

Jaudu P nosaka, izteiksmē (6.14) ievietojot (6.15), (6.16) un (6.17) izteiksmes. Tiek iegūts vienkāršs empīrisks aprēķins P noteikšanai (6.18), kur $H_{\min}$ ir vienīgais nezināmais.

$$P = 8,42 \cdot \pi D^2 \cdot (H_{\min} + 2,27) [W]. \quad (6.18)$$

No izteiksmes (6.7) izsaka F_{pm} un iegūst izteiksmi (6.19).

$$F_{pm} = \frac{G \cdot v}{I_{LP}} = \frac{G \cdot v \cdot \pi D^2}{4P \cdot \sin \alpha}. \quad (6.19)$$

Lietojot izteiksmi (6.19) un (6.17), iespējams iegūt empīrisku izteiksmi (6.20) F_{pm} noteikšanai.

$$F_{pm} = \frac{72,165 \cdot \pi D^2 \cdot v \cdot (H_{\min} - 0,0015)}{P} \left[\frac{g}{min} \right]. \quad (6.20)$$

Apakšnodaļā izstrādātās teorētiskās aprēķina izteiksmes (6.18) un (6.20) pielietojamas 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.

6.4. Lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru aktīvā kontrole un koriģēšana uzkausēšanas procesa gaitā

Analizējot uzkausēšanas eksperimenta rezultātus, saskatīts, ka ir nepieciešama tehnoloģisko parametru regulēšana procesa gaitā, kas nodrošinātu vienmērīgu uzkausējumu, samazinot mehāniskās apstrādes daudzumu. Industrijā tiek pielietota *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, bet tas nedod tiešu informāciju par uzkausējuma raksturlielumiem. *E-MAqS* sistēmā datu sasaiste ar reāliem uzkausēšanas raksturlielumiem ir iegūstama vienīgi pēc sistemātiskiem empīriskiem eksperimentiem. Ērtāka būtu tieša tehnoloģiskā parametra kontrole uzkausēšanas procesa laikā. Pieejamākais parametrs šāai kontrolei ir uzkausēšanas augstums H .

Kontrolējot uzkausējuma augstumu H_{kontr} un nosakot tā neatbilstību, noteiktās robežās tiek uzsākta tehnoloģisko parametru korekcija nepieciešamajā virzienā un nepieciešamajā apmērā. Darbā nav apskatītas iespējamās augstuma kontroles metodes vai tehniskais nodrošinājums, kā arī nav apskatīts veids, kā tiešsaistes informācija – atgriezeniskā saite, tiek izmantota un kādā veidā tehnoloģiskie parametri tiek koriģēti. Bet sekojoši ir apskatīti lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskie parametri, kas piemēroti tiešsaistes parametru korekcijai.

Veicot uzkausējumus plaknei ar lineāru uzkausēšanas sprauslas trajektoriju, konstatējot H_{kontr} izmēra vērtību neatbilstību, visērtāk ir mainīt uzkausēšanas soli f , ko koriģē pie nākamā uzkausējuma uzsākšanas. Taču f koriģēšanai ir būtiski trūkumi: pie garākiem uzkausējumiem (virs 100 mm) korekcija var būt novēlota, koriģējot f , tiek ietekmēts kopējais uzkausējuma platums un to nav iespējams pielietot pie spirālveida uzkausējumiem (uzkausējot vārpstas un urbumus).

Pulvera padeves daudzuma F_{pm} koriģēšana lāzeruzkausēšanas procesa gaitā nav vēlama, jo parametra izmaiņa nav tūlītēja, to ietekmē padeves pievadu garums un padeves iekārta, transportgāze u.c. nenosaukti faktori.

Par piemērotākajiem lāzeruzkausēšanas tehnoloģiskajiem parametriem, kas pakļaujami korekcijai, ir parametrs P vai v , kuriem ir tieša ietekme uz parametru G (6.7). Tehnoloģiski vienkāršākais veids ir koriģēt P , tas praksē jau tiek darīts ar *E-MAqS* sistēmu, un izmaiņas ir veicamas, 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 tehnoloģiski ir iespējama, vienīgi empīriski ir jāizvērtē v izmaiņas paātrinājums, jo tehniski ātruma izmaiņu var realizēt tūlīt, bet tas var atstāt sekas uz uzkausējuma kvalitāti. Kā arī pie ātruma korekcijas būtu jāsaņem iespēja noteikt korekcijas soli un/vai minimālās, maksimālās ātruma vērtības.

Lietojot izteiksmi (6.7), ieviests aprēķins, kas apraksta nominālo G un izmaināmo G_{izm} vērtību ar korekcijas parametriem P_{izm} un v_{izm} , attiecīgi izteiksmes (6.21) un (6.22). Sekojoši izstrādātas izteiksmes (6.23) un (6.24), kas paredzētas P vai v vērtību korekcijai reālā laikā, koriģējot tās attiecīgā apjomā un virzienā pēc aprēķinātajām P_{izm} vai v_{izm} vērtībām.

$$G + G_{izm} = \frac{(P + P_{izm}) \cdot 4 \cdot \sin\alpha \cdot F_{pm}}{\pi D^2 \cdot v} \rightarrow P_{izm} = \frac{\pi D^2 \cdot v (G + G_{izm})}{F_{pm}} - P. \quad (6.21)$$

$$G + G_{izm} = \frac{P \cdot 4 \cdot \sin\alpha \cdot F_{pm}}{\pi D^2 \cdot (v + v_{izm})} \rightarrow v_{izm} = \frac{P \cdot 4 \cdot \sin\alpha \cdot F_{pm}}{\pi D^2 \cdot (G + G_{izm})} - v. \quad (6.22)$$

$$P_{izm} = \frac{v \cdot \pi D^2 \cdot (9,62H_{min} - 5,35H_{kontr} + 1,2)}{F_{pm} \cdot 4\sin\alpha} - P. \quad (6.23)$$

$$v_{izm} = \frac{P \cdot F_{pm} \cdot 4\sin\alpha}{\pi D^2 (9,62H_{min} - 5,35H_{kontr} + 1,2)} - v. \quad (6.24)$$

Lāzeruzkausēšanas korekcijas izteiksmes, kas izstrādātas šajā apakšnodaļā (6.23) un (6.24), ir teorētiskas izteiksmes, kuru precizitāte darbā nav pārbaudīta. Bet izteiksmes (6.23) un (6.24) dod informāciju par veidu, kā tiešsaistes tehnoloģisko parametru korekcija ir iespējama, ja tiek nodrošināta ticama informācija par H_{kontr} vērtībām.

Nodaļā izstrādātas matemātiskās izteiksmes uzkausējuma raksturlielumu aprēķinam, lietojot jaunieviestu lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G , kas apkopo visus lietotos tehnoloģiskos parametrus. Secināts, ka ar lāzeruzkausēšanas ietekmes parametru G izstrādātās matemātiskās izteiksmes raksturlielumu prognozei uzrāda augstu precizitāti, kas nodrošina izteiksmes sekmīgu pielietojamību praktiskajā darbā.

Darbā ieviestas lāzeruzkausēšanas tehnoloģisko parametru P un F_{pm} aprēķina izteiksmes, zinot nepieciešamo uzkausējuma augstumu H_{min} . Kā arī ieviestas 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. Kā arī izstrādātās uzkausēšanas augstuma kontroles izteiksmes potenciāli nodrošina nepieciešamo uzkausējuma augstumu visam uzkausējumam, samazinot nepieciešamo pēcapstrādi.

Izstrādāto lāzeruzkausēšanas raksturlielumu prognozes izteiksmju pārbaude, papildus šajā nodaļā attēlotajai, ir iekļauta sekojošā 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

Šajā apakšnodaļā veikta uzkausējuma laukuma (A_c), augstuma (H) un uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) prognozēšanas matemātisko izteiksmju (6.8), (6.9) un (6.11), precizitātes pārbaude. Visu minēto matemātisko izteiksmju precizitātes pārbaude veikta, salīdzinot tos ar lāzeruzkausēšanas salīdzinošā eksperimenta (4. nodaļa, 50. lpp.) rezultātiem, kas nav saistīti ar uzskaitīto izteiksmju izstrādi. Turklāt rezultāti salīdzināti ar literatūras avotos publicētajiem eksperimentu rezultātiem. Šeit vienīgi nav iespējams pārbaudīt $H_{\min}$ aprēķina izteiksmi (6.10), jo tā jau ir veidota, izmantojot salīdzinošā eksperimenta datus (4. nodaļa), turklāt citu autora eksperimentos nav veikts laukuma uzkausējums un nav analizētas $H_{\min}$ vērtības.

Kopumā nav daudz literatūras avotu, kuros būtu atrodama informācija par eksperimenta tehnoloģiskajiem parametriem un apskatīti uzkausējuma ģeometriskie rezultāti. Rezultātu salīdzināšanai tika izmantoti literatūras apskatā izmantotie avoti [13], [40], turklāt apskatītas arī jaunākas publikācijas [6], [19], [28], [30], [33], [36].

Atsevišķi publicētie pētījumi nav pielietojami, jo nav norādīta pilnīga informācija par eksperimenta tehnoloģiskajiem parametriem un apstākļiem. Piemēram, pētījumā, kas publicēts [36] avotā, nav norādīta informācija par lietotā lāzera punkta izmēriem, kas liedz noteikt lietotās jaudas intensitāti (I_{LP} , W/mm²). Savukārt avotā [33] nav norādītas adekvātas – atkārtojamas uzkausējamā pulvera padeves vērtības, tās attēlotas kā tehnoloģiskā aprīkojuma padeves diska rotācijas ātrums (9. pielikumā, pulvera padeves iekārta), nenorādot vispārpieņemtās g/min vai g/s mērvienības.

Darbā netika izmantota arī publikācija [28], lai arī avotā plaši apskatīti uzkausējuma raksturlielumi (A_c un H). Bet avots [28] tieši neatklāj iegūto rezultātu vērtības. Turklāt rezultāti izteikti ar ieviestu tehnoloģisko parametru PI , kur nav atšifrēti visi parametrā PI ietilpstošie lielumi.

Visos apskatītajos literatūras avotos nav atrodami pētījumi, kas apskatītu A_c rezultātus, līdz ar to (6.8) matemātiskā izteiksme pārbaudāma vienīgi ar autora veikto eksperimentu. Savukārt par raksturlielumu H un D_c vērtībām un lietotajiem tehnoloģiskajiem parametriem ir atrodama informācija gan autora, gan literatūras avotos atrodamos eksperimentos. Tādēļ darbā izstrādātajām matemātiskajām izteiksmēm (6.9) un (6.11), kas paredzētas H un D_c aprēķinam, adekvātums tika pārbaudīts liekot kopā autora salīdzināšanas eksperimenta un citu autoru eksperimenta rezultātus.

Darbā matemātisko izteiksmju precizitāte noteikta, lietojot determinācijas koeficientu, kas ir korelācijas koeficienta kvadrāta vērtības un tiek apzīmēts ar R^2 . Determinācijas koeficients attēlo, kāda rezultatīvās pazīmes variācijas daļa tieši atkarīga no faktorālās pazīmes variācijas. Pārfrazējot, lāzeruzkausēšanas matemātiskās izteiksmes precizitātes analīzē R^2 norāda, cik procentos gadījumu matemātiskās izteiksmes un ieviestais faktors G izskaidro iegūtos

eksperimenta rezultātus. Šīs vērtības dod iespēju novērtēt matemātisko izteiksmju precizitāti. Determinācijas koeficienta R^2 aprēķināts pēc izteiksmes (7.1) [3], [25].

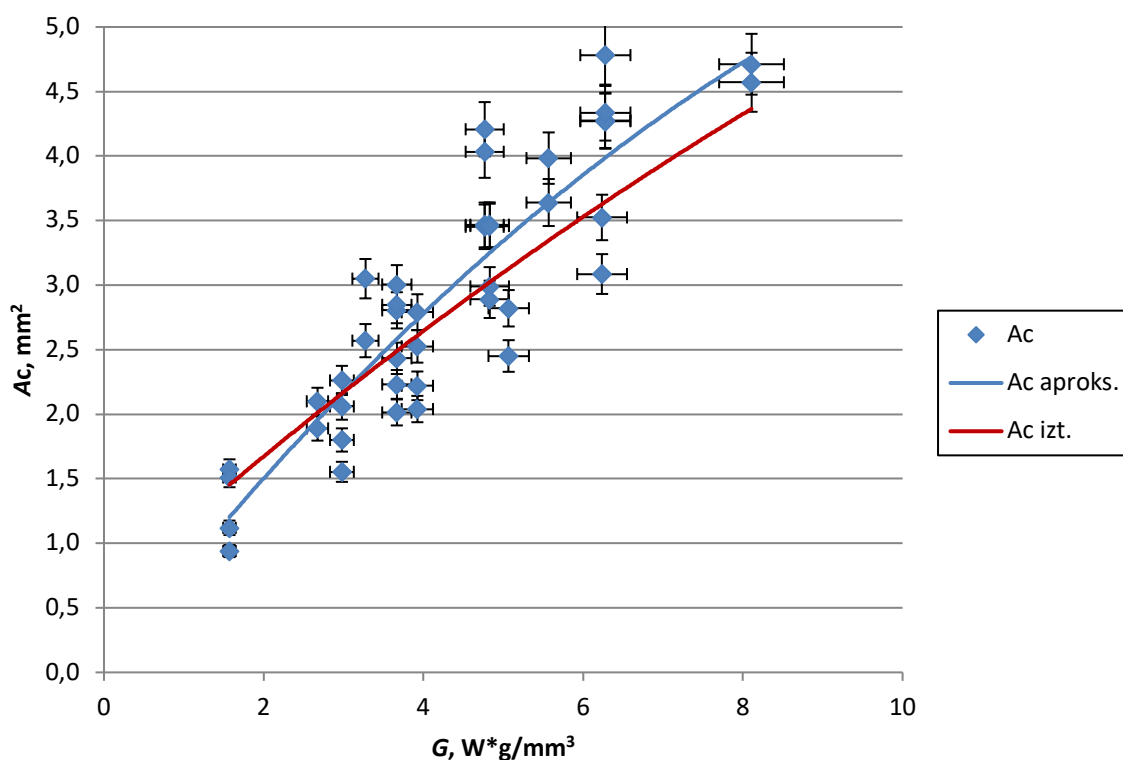
$$R^2 = \left(\frac{\sum A_c \cdot A_{c \text{ Mod}} - \frac{\sum A_c \cdot \sum A_{c \text{ Mod}}}{n}}{\sqrt{\sum A_c^2 - \frac{(\sum A_c)^2}{n}} \cdot \sqrt{\sum A_{c \text{ Mod}}^2 - \frac{(\sum A_{c \text{ Mod}})^2}{n}}} \right)^2. \quad (7.1)$$

Uzkausējuma laukuma (A_c) aprēķina matemātiskās izteiksmes (6.8) pārbaude

Uzkausējuma laukuma izteiksmei (6.8) ir veikta rezultātu precizitātes pārbaude, izmantojot salīdzinošā eksperimenta rezultātus (4. nodaļa). Salīdzinošajā eksperimentā tika veidots viens atsevišķs un pieci sekojoši uzkausējumi ar atšķirīgiem uzkausēšanas sprauslas sagāzuma leņķiem (90° un 36°).

Sekojošā grafikā (7.1. att.) sarkanā līkne attēlo ar izteiksmi (6.8) aprēķinātās A_c vērtības, bet zilie punkti ir eksperimenta individuālie rezultāti, un zilā līkne ir eksperimenta rezultātu kvadrātiskā aproksimācija.

Salīdzinošā eksperimenta rezultātos, kā arī 7.1. attēla grafikā iekļautas gan atsevišķo uzkausējumu A_c vērtības, gan piecu sekojošo uzkausējumu vidējās A_c vērtības, kas izteiktas uz viena atsevišķa uzkausējuma. Lai pārlicinātos par izteiksmes piemērotību prognozēt A_c vērtības dažādos uzkausējuma izpildījumos, ar izteiksmi (7.1) atsevišķi noteikta individuāla uzkausējuma un laukuma uzkausējuma atbilstība.



7.1. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma laukumu A_c , rezultāti ar 5 % kļūdu.

Lietojot izteiksmi (7.1), aprēķināts determinācijas koeficients vienam atsevišķam uzkausējumam, kur eksperimenta A_c vērtības salīdzinātas ar prognozēto. Aprēķins parādīts (7.2) izteiksmē, savukārt aprēķina dati iekļauti 18. pielikumā.

$$R^2 = \left(\frac{168,95 - 154,84}{\sqrt{170,74 - 149,98} \cdot \sqrt{171,08 - 160,95}} \right)^2 = 0,87. \quad (7.2)$$

Izteiksmē (7.3) pārbauda matemātiskās izteiksmes (6.8) piemērotību noteikt laukuma uzkausējuma – vairāku uzkausējumu šķersgriezuma A_c vērtības. Aprēķinā lietotās vērtības iekļautas 19. pielikumā.

$$R^2 = \left(\frac{194,23 - 181,55}{\sqrt{223,77 - 205,63} \cdot \sqrt{171,08 - 160,29}} \right)^2 = 0,82. \quad (7.3)$$

Iegūtie rezultāti liecina, ka matemātiskā izteiksme (6.8) ar 87 % precizitāti apraksta tehnoloģiju salīdzināšanas eksperimenta rezultātus pie atsevišķiem uzkausējuma šķersgriezuma laukumiem, bet pie virsmas uzkausējumu veidošanas rezultātu prognozes precizitāte ir tikai nedaudz zemāka – 82 %, kur galvenā rezultātu nobīde vērojama pie lielākajām G vērtībām. Matemātiskās izteiksmes (6.8) uzrādītā precizitāte (82–87 %) nodrošina iespēju izteiksmi pielietot arī vairāku uzkausējumu šķersgriezuma laukumu noteikšanai.

Uzkausēšanas augstuma H aprēķina matemātiskās izteiksmes (6.9) pārbaude

Šeit individuāli apskatīti citu autoru literatūras avotos publicētie pētījumi un iegūtie rezultāti. Bet rezultātu atbilstības noteikšana un grafiska attēlošana veikta, apkopojot visus apskatīto eksperimentu datus pievienojot arī autora salīdzināšanas eksperimenta rezultātus.

Avots 1. Literatūras avota [13] eksperimentā lietojamie tehnoloģiskie parametri un iegūtie rezultāti ir apkopoti 7.1. tabulā. Eksperiments veikts ar diožu lāzeru, kur lāzera punkta diametrs ir 4 mm. Uzkausējums veidots ar Co^1 -bāzētu sakausējuma 45–105 μm pulveri uz nerūsējošā tērauda (1,4301²) sagataves.

Analizējot iegūtos rezultātus (7.1.tabula), secināts, ka daļai rezultātu ir rupjas kļūdas. Piemēram, paraugam Nr.5. H iegūts par 46 % zemāks nekā H vērtība, paraugam Nr.2., lai arī Nr.2 paraugs veikts ar identisku materiāla pievades daudzumu, bet ar zemāku jaudu (P). Identisks novērojums ir paraugiem Nr.7, 8 un 9. Šāda veida neprecizitātes var rasties, ja uzkausējuma procesā bijis mainīgs uzkausēšanas ātrums vai nevienmērīga pulvera padeve, kā arī, ja paraugu šķersgriezuma makrošlifs veidots uzkausējuma sākumā, kur uzkausējums nav izveidojies pilnīgs. Rezultātu pārbaudē minētie rezultāti nav izslēgti.

¹ Co – kobalts (*kīm. elements*)

² EN-ISO 9001:2008

7.1. tabula

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [13]

Nr.	P, W	$v, \text{mm/min}$	$F_{\text{pm}}, \text{g/min}$	H, mm
1	1550	360	8	0,78
2	1550	540	13	0,797
3	1550	720	18	0,834
4	1750	360	8	1,055
5	1750	540	13	0,43
6	1750	720	18	1,291
7	1950	360	8	0,692
8	1950	540	13	1,688
9	1950	720	18	0,604

Avots 2. Kā nākamais tika apskatīts [30] literatūras avots. Avotā [30] publicēts plašs lāzeruzkausēšanas eksperiments, kas veikts ar diožu lāzeru. Uzkausējums veidots uz konstrukciju tērauda bāzes materiāla, lietojot koaksiāla tipa sprauslu ar taisnstūra formas (12 mm x 3 mm) lāzera punktu un, izmantots Fe^1 – bāzēts sakausējumu 45–180 μm pulveris.

Kopumā, [30] literatūras avotā izveidoti 30 paraugi, kur tiek variēta jauda (P), pulvera padeve (F_{pm}), aizsarggāzes padeve, darba distance (L). Ņemot vērā, ka apskatītajā publikācijā tiek variēta aizsarggāzes padeve un L , rezultātu salīdzināšanā tika aplūkoti eksperimenta paraugi, kur gan aizsarggāze, gan L ir nulles faktora līmenī, jo disertācijā šie parametri ir saglabāti konstanti. Šādā veidā tika izslēgta abu parametru variācijas ietekme un kopējais apskatāmo paraugu skaits samazinājās līdz 10 paraugiem (7.2. tabula).

7.2. tabula

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [30]

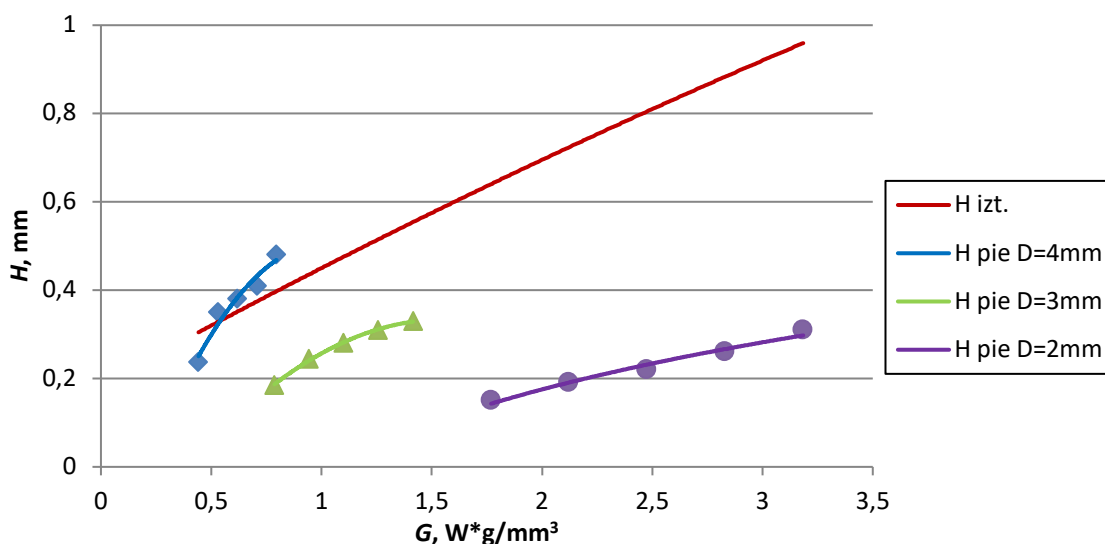
Nr.	P, W	$F_{\text{pm}}, \text{g/s}$	Aizsarggāze l/min	L, mm	H, mm
1	3500	1	15	10	2,04
2	3500	0,83	15	10	1,68
3	3500	0,83	15	10	1,71
4	3500	0,83	15	10	1,50
5	3500	0,83	15	10	1,59
6	4000	0,83	15	10	1,74
7	3500	0,67	15	10	1,68
8	3500	0,83	15	10	1,85
9	3500	0,83	15	10	1,77
10	3000	0,83	15	10	1,55

¹ Fe – dzelzs (*kīm. elements*)

Apskatot iegūtos eksperimenta [30] rezultātus 7.2. tabulā, secināts, ka paraugos Nr.4 un Nr.5 ir pieļautas rupjas kļūdas, jo 4 paraugi, kas veidoti ar identiskiem parametriem, uzrāda krietni atšķirīgus rezultātus. Bet arī šie rezultāti nav izslēgti pie rezultātu pārbaudes.

Avots 3. Savukārt [40] literatūras avotā publicētais eksperiments realizēts ar atšķirīgu lāzera tipu, izmantots CO₂ lāzers. Minētajā darbā lietota koaksiāla tipa sprausla un uzkausēts Ni¹ – bāzēts sakausējuma pulveris. Literatūras avots [40] tika apskatīts literatūras apskatā un eksperimentā lietotie tehnoloģisko parametru diapazoni ir uzrādīti 1.5. tabulā (29. lpp.). Savukārt no avotā publicētajiem rezultātiem tikai daļa datu ir pielietota šajā darbā. Galvenokārt noskaidrots, ka mazākajiem lāzera punkta izmēriem (3 mm un 2 mm) izstrādātā izteiksme (6.9) nav piemērota, kā redzams 7.2. attēla grafikā.

Tādēļ izmantoti visi [40] publikācijā pieejamie rezultāti ar 4 mm lāzera punkta izmēru. Minētie rezultāti sastāda mazu daļu no publikācijas rezultātiem (7.3.tabula), piedevām H vērtību atkarība no lietotajiem tehnoloģiskajiem parametriem apskatīta pie konstanta uzkausēšanas ātruma un pulvera padeves, bet ar mainīgu lāzera jaudu.



7.2. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu H .

7.3. tabula

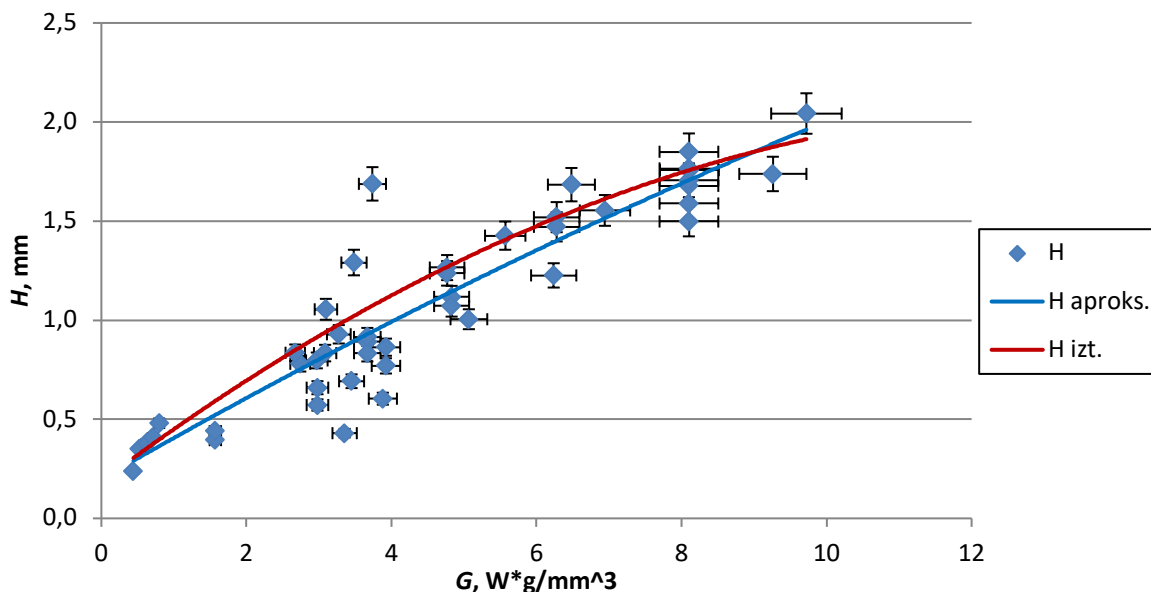
Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [40]

Lāzera punkts, mm	P , W	F_{pm} , g/min	v , mm/s	H
4	500	4	6	0,24
4	600	4	6	0,35
4	700	4	6	0,38
4	800	4	6	0,41
4	900	4	6	0,48

Apkopojot avotu [13], [30] un [40] datus un pievienojot salīdzināšanas eksperimenta rezultātus, kopā ir noteikta izstrādātās matemātiskās izteiksmes (6.9) atbilstība. Sekojošā

¹ Ni – niķelis (*kīm. elements*)

7.3. attēla grafikā apkopota visu apskatīto eksperimentu raksturlieluma H atkarību no G parametra un dati salīdzināti ar (6.9) izteiksmi aprēķinātajām vērtībām.



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

Veicot 7.3. attēlā redzamā grafika datu analīzi, noteikts determinācijas koeficients (7.1) individuālajiem eksperimentu rezultātiem un ar izteiksmi (6.9) aprēķinātajām vērtībām. Noskaidrots, ka viena uzkausējuma augstuma (H) vērtības prognoze ar izteiksmi (6.9) izskaidro 84 % visu iekļauto eksperimentu rezultātus, kas ir augsts rādītājs. Bet salīdzinājumā ar izteiksmes (6.9) izstrādes eksperimenta izskaidrotajiem 95,3 % (6.2. nodaļa), tas ir sliktākais adekvātuma rādītājs. Savukārt, ja no apkopotajiem citu autoru eksperimentiem izslēdz piefiksētās rupjās kļūdas [13] un [30] literatūras avotos, izteiksme (6.9) izskaidro 92 % individuālo eksperimenta rezultātu (rezultāti grafiski attēloti 20. pielikumā).

Pēc rezultātu salīdzināšanas var secināts, ka matemātiskā izteiksme (6.9) pielietojama lāzeruzkausēšanas rezultātu prognozei, ja izmantots 4 mm un lielāks lāzera punkts, pielietojot apaļu un taisnstūra formas lāzera punktus. Kā arī nav vērojama būtiska izteiksmes (6.9) nepilnība pie atšķirīga lāzera enerģijas veida, sagataves materiāla un pulvera materiāla pielietošanas.

Uzkausējuma samaisījuma pakāpes D_c aprēķina matemātiskās izteiksmes (6.11) pārbaude

Šeit individuāli apskatīta D_c rezultātu atkarība no parametra G , kas publicēta citu autoru literatūras avotos. Rezultātu atbilstība noteikta, apkopojot visus pieejamo eksperimentu D_c rezultātus vērtības un attēlojot tās grafiski, un veicot aprēķinus, pielietojot (7.1) izteiksmi.

Avots 1. Literatūras avotā [19] detalizēti attēloti eksperimenta tehnoloģiskie parametri un raksturlieluma D_c vērtības (7.4. tabula). Eksperiments veikts, lietojot cietvielu Yb šķiedras lāzeru (YLR-5000); 1070 nm lāzera spektru, uzkausējot pulveri ANSIA 422L (līdz 150 μm) uz nerūsējošā tērauda bāzes materiāla ASI 422 (izmēros 100 mm x 63 mm x 19,5 mm).

7.4. tabula

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti [19]

Nr.	P , W	F_{pm} , g/min	v , mm/min	D_c , %
1	1000	5	700	23,4
2	1000	5	750	33,3
3	1000	7	800	18,8
4	1300	6	750	28,9
5	1300	6	800	32,9
6	1300	7	700	42,7
7	1500	6	800	32,9
8	1500	5	700	45,1
9	1500	7	750	60,8

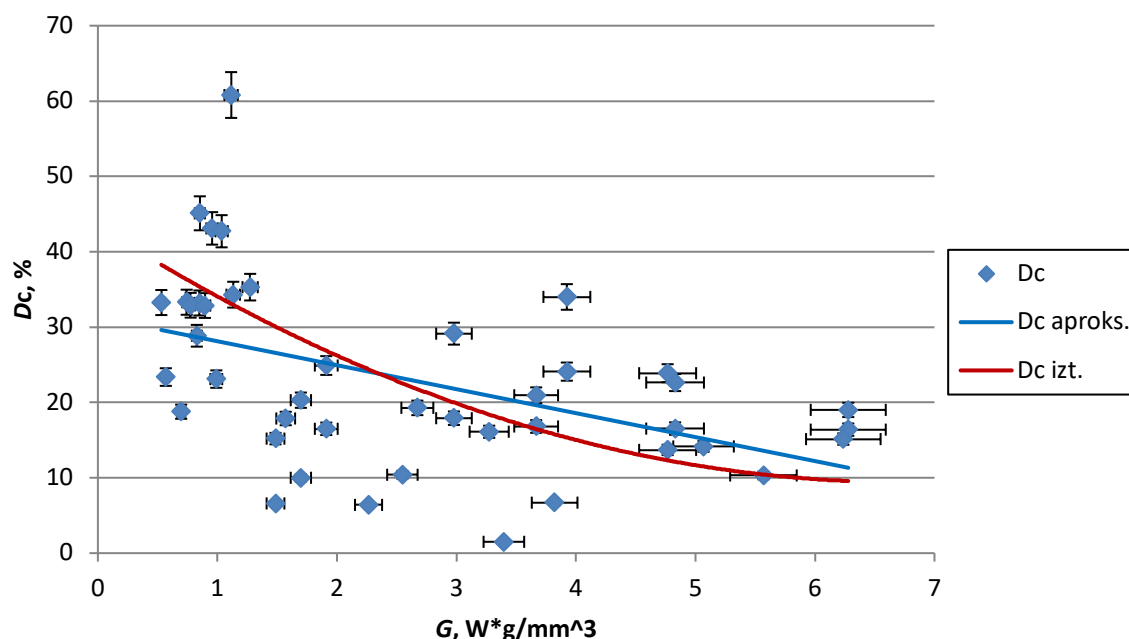
Avots 2. Literatūras avota [6] eksperiments veikts ar 2mm lāzera punktu, kur izmantots Ti- 48Al-2Cr-2Nb (100–200 μm), pulveri un uzkausējumu veidojot uz Ti6Al4V sagataves materiāla. Šie ir specifiski materiāli un tiek izmantoti aviācijas dzinējos un elektroenerģijas ieguves tvaika turbīnās. Turklāt šos rezultātu var izmantot vienīgi indikatīviem nolūkiem, jo literatūrā [6] minētais eksperiments veikts ar priekšsildīšanu pie 350 °C un 450 °C. Eksperimenta parametri un rezultāti attēloti 7.5. tabulā.

7.5. tabula

Eksperimenta tehnoloģiskie parametri un rezultāti pie 450°C [6]

Nr.	P , W	F_{pm} , g/min	v , mm/min	D_c , %
1	700	2	300	15,2
2	800	2	300	20,3
3	900	2	300	24,9
4	700	2	450	23,1
5	800	2	450	34,3
6	900	2	450	35,3
7	700	2	600	33,3
8	800	2	600	33,2
9	900	2	600	43,1
10	800	4	300	1,5
11	900	4	300	6,7
12	800	4	450	6,4
13	900	4	450	10,4
14	700	4	600	6,6
15	800	4	600	10,0
16	900	4	600	16,5

Visi pieejamie literatūras avoti [6], [19], kur publicēti lāzeruzkausēšanas eksperimenta tehnoloģiskie parametri un D_c vērtības, kā arī darba autora pētījuma dati, kas nav saistīti ar matemātiskas izteiksmes (6.11) izstrādi, apkopoti 7.4. attēlā iekļautajā grafikā. Grafikā attēlota individuālo eksperimenta D_c vērtību atkarība no parametra G un ar izteiksmi (6.11) aprēķinātās prognozētās D_c vērtības. Sekojoši individuālajiem eksperimenta D_c rezultātiem un ar izteiksmi (6.11) aprēķinātajām D_c vērtībām noteikts determinācijas koeficients, lietojot (7.1) izteiksmi.



7.4. att. Parametra G ietekme uz uzkausējuma samaisījuma pakāpi D_c , rezultāti ar 5 % kļūdu.

Pēc determinācijas koeficienta noteikšanas secināts, ka izteiksme (6.11) eksperimenta individuālos rezultātus izskaidro 27 % gadījumu, kas ir vājš rezultāts. No determinācijas koeficienta aprēķina (7.1), izslēdzot [6] literatūras eksperimenta datus (20. pielikums), kas atzīmēts kā references pētījums, jo veikta materiāla priekšsildīšana, izteiksmes (6.11) adekvātums uzlabojas līdz 38 %. Bet 62 % rezultātu izteiksme izskaidro, ja izdalīti tikai salīdzinošā eksperimenta rezultāti (21. pielikums). Savukārt pie izteiksmes (6.11) izstrādes rezultāts tika izskaidrots 81 % gadījumu. Var secināt, ka D_c vērtība ir būtiski atkarīga no eksperimentā lietotā bāzes materiāla, uzkausējamā materiāla u.c. nenosauktiem apstākļiem. Bet izteiksme (6.11) uzrāda vidējurezultātu izskaidrošanu, kas saistīts ar iepriekš minētajiem eksperimenta apstākļiem un D_c vērtību komplecītāti.

Šajā nodaļā noskaidrota darbā izstrādāto matemātisko izteiksmju precizitāte, salīdzinot rezultātus ar matemātisko izteiksmju izstrādi nesaistītu eksperimentu rezultātiem un ar citu autoru publicētajiem lāzeruzkausēšanas eksperimentiem.

Uzkausējuma laukuma (A_c) vērtību ietekmes pētījumi apskatītajos literatūras avotos nav izmantojama rezultātu analīzei nepilnīgās informācijas dēļ. Tādēļ A_c aprēķina izteiksme (6.8) pārbaudīta vienīgi ar autora eksperimenta rezultātiem. Secināts, ka A_c noteikšanas izteiksme (6.8) autora eksperimentos rezultātu izskaidro 82–87 % gadījumu. Bet izteiksmes izstrādes

eksperimenta rezultāti aprakstīti ar 96,7 % precizitāti. Izstrādātā izteiksme (6.8) uzrāda augstu atbilstību.

Individuāla uzkausējuma augstuma (H) vērtības aprēķina izteiksme (6.9) izskaidro 84 % visu darbā apskatīto eksperimentu rezultātu. Bet izteiksmes (6.9) izstrādes eksperimenta rezultāti izskaidroti 95,3 % gadījumu. Ieviestā izteiksme (6.9) uzrāda augstu precizitāti.

Uzkausējuma samaisījuma pakāpes (D_c) izteiksme (6.11) autora veidotā eksperimentā izskaidro 62 % rezultātu pie izteiksmes izstrādes 81 % rezultātu. Bet citu autoru eksperimentos izteiksme (6.11) izskaidro 38 % eksperimenta rezultātu individuāliem rezultātiem. D_c vērtība ir būtiski atkarīga no uzkausēšanas materiāliem, kas nav izvērtēts izteiksmē (6.11), bet pilnveidojams nākotnes pētījumos. Tādējādi izteiksme (6.11) D_c vērtību prognozēšanai turpmākos darbos ir jāpilnveido, izvērtējot bāzes un pulvera materiālu kušanas temperatūras, materiālu siltuma vadītspējas, kā arī aizsarggāzes plūsmas ietekmes nozīmību. Kopumā izteiksme (6.11) uzrāda vidēju adekvātumu, kas norāda uz galvenajām D_c vērtību izmaiņu tendencēm.

Disertācijā izstrādātās matemātiskās izteiksmes uzrāda augstu precizitāti un tās ir pielietojamas praktiski, lai prognozētu lāzeruzkausēšanas rezultātus, atvieglojot tehnoloģiskā procesa izstrādi, kas potenciāli rezultējas ar samazinātu apstrādes 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 pielietošanai.

Tādējādi ir iegūti sekojoši 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 , bet 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. Bet *MAG* uzkausēšanas tehnoloģija efektīvāk izmantojama pie lielu uzkausējuma augstumu veidošanas, kur nav nepieciešama specializētu uzkausējuma slāņa veidošana. Turklāt secināts, ka lāzeruzkausēšanā materiāla apjoms, kas uzkausēts, ir mazāks kā *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 augstākā. 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 ietekmējošie faktori lāzeruzkausēšanā

7. Salīdzinot lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas paraugu šķērsriezuma 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 salīdzinājumā ar bāzes materiāla S355J2 $HV\ 200\ \text{kg/mm}^2$ cietību. Savukārt lāzeruzkausēšana ar pulveri *STELLITE*®6 nodrošina $HV\ 550\ \text{kg/mm}^2$ cietību, kas ir 2,8 reizes lielāka cietība nekā bāzes materiālam. *STELLITE*®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 $\alpha = 90^\circ$, tad pulvera plūsma nav simetriska un sekojoši 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 T_A 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, tādus kā 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 jauns 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 87–96,3 % iegūto rezultātu, H 84–95,3 %, D_c 38–81 % 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 pielietojamas praktiskajā darbā, lai prognozētu iegūstamos rezultātus. Savukārt tehnoloģisko parametru aprēķinu un kontroles izteiksmes potenciāli atvieglo uzkausēšanas tehnoloģisko procesu izstrādi, kā arī samazina uzkausēšanas un sekojošās pēcapstrādes laiku.

Rekomendācijas uzkausēšanas tehnoloģiju praktiskai pielietošanai

16. Lai pēc uzkausēšanas tehnoloģijas būtu nepieciešama pēc iespējas mazāka pēcapstrāde, ir jāizveido iespējami vienmērīgāks uzkausējuma profils, kas realizējams *MAG* tehnoloģijai pie $w/v = 8,5–11$, bet lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai $F_{pm}/v = 28–65$ 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 $\alpha = 90^\circ$ lietot vienīgi, ja ar α samazināšanu var atrisināt uzkausējamās virsmas pieejamības jautājumu, kā arī situācijā, ja jāuzkausē OH pozīcijā, bet pie OH jālieto $\alpha = 36^\circ$, 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 “*aizēnojumu*”. Minētie uzlabojumi potenciāli nodrošinātu drošu aprīkojuma ekspluatāciju, augstāku uzkausējuma kvalitāti un mazāku uzkausējuma raksturlielumu atkarību no uzkausēšanas pozīcijas. Tas sasniedzams, 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. Un 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 (A_c , $H_{\min}$, H un D_c). Darbā izstrādātās matemātiskās izteiksmes pielietojamas 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 pielietošana 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. Batchelor, Andrew W.; Lam, Loh Nee; Chandrasekaren, Margam. Materials Degradation and Its Control by Surface Engineering (2nd Edition). London. *Imperial College Press*. 2003, 429 p.
5. Brückner, F., Nowotny, S., & Leyens, C. Innovations in laser cladding and direct metal deposition. *SPIE Proceedings - The International Society for Optical Engineering*. 2012, article no. 823904.
6. Carcel, B., Serrano, A., Zanbrono, J. Laser cladding of TiAl intermetallic alloy on Ti6Al4V. Process optimization and properties. *Physics Procedia*. 2014, Vol. 56, 284–293 p.
7. Chattopadhyay, R. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes. *Kluwer Academic Publishers*, Hingham, USA. 2004, 392 p.
8. Chattopadhyay, R. Surface Wear : Analysis, Treatment, and Prevention. Materials Park, OH, USA. *ASM International*. 2001, 318 p.
9. 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.
10. 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.
11. Dowden, J. M. The Theory of Laser Materials Processing: Heat and Mass Transfer in Modern Technology. *Springer Science & Business Media*. 2009, 404 p.
12. Fischer, A., Bobzin, K., (eds.) Friction, Wear and Wear Protection. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim. 2009, 758 p.
13. 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 p.
14. Haake, J.M. Laser cladding high performance materials for small modular reactor system components. *ASME 2014. Small Modulus Reactors Symposium April 15-17*. Washington DC. 2014, 24 p.
15. 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.

16. 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.
17. Ion, J., Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Boston. *Butterworth-Heinemann*. 2005, 576 p.
18. 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.
19. 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.
20. Bach, Fr.-W., Laarmann, A., and Wenz, T., (eds.). Modern Surface Technology. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim. 2006, 338 p.
21. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments, 5th Ed. *John Wiley & Sons*. 2001, 699 p.
22. Olson, D. L., Dixon, R., and Liby, A. L., (eds.). Welding: Theory and Practice. *Elsevier*, Amsterdam. 2012, 389 p.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Rombouts, M., Krieken, van G., Husslage, W. Practical Guideline: Laser Cladding. *Laser Applicatie Centrum*. The Netherlands. 2012, 98 p.
28. 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.
29. Schneider, M. Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties. *University of Twente*. 1998, 177 p.
30. 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.
31. Sonntag, R. E., Borgnake, C. and Van Wylen, G. J. Fundamentals of Thermodynamics. 6th edition. *Wiley*. 2002, 816 p.

32. Sun, S., Durandet, Y., Brandt, M. Parametric investigation of pulsed Nd: YAG laser cladding of stellite 6 on stainless steel. *Surface & Coatings Technology*. 2005, Vol.194, 225–231 p.
33. 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.
34. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance/ Edited by Davis, J. R. Materials Park, OH, USA. *ASM International*. 2001, 392 p.
35. Suryanarayanan, R., Plasma spraying: theory and applications. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd*. 1993, 302 p.
36. 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.
37. 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.
38. Toyserkani, E., Khajepour, A. & Corbin, S., Laser Cladding. *Taylor & Francis*. Abingdon (UK). 2004, 280 p.
39. Welding Handbook. Eight Edition. Vol.2. Welding Processes / Edited by R.L. O'Brien. - *American Welding Society*. Miami. 1997, 955 p.
40. 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.

Standarti:

41. LVS EN 657:2005 – Termiskā uzsmidzināšana - Terminoloģija, klasifikācija
42. LVS EN 10149-3 – Karsti velmētie izstrādājumi no augstas stiprības tēraudiem aukstai presēšanai.
43. LVS EN ISO 15614-7:2007 – Metālisku materiālu metināšanas procesu specificēšana un kvalificēšana. Metināšanas procesu tests. 7. daļa: Uzkausēšanas metināšana.
44. LVS EN ISO 4063:2011 – Metināšana un radnieciskie procesi. Procesu saraksts un norādes numuri.

Interneta resursi:

45. www.elsasrl.com, resurss apskatīts 2011.g. 2 decembrī
46. www.esab.co.uk/, resurss apskatīts 2011.g. 20 decembrī
47. www.terpa.lv/tehnolo%20lat.htm, resurss apskatīts 2012.g. 23. janvārī
48. www.castolin.hu/wCastolin_com/pdf/products/coating/Laser_brochure.pdf, resurss apskatīts 2012.g. 28. janvārī

49. www.sulzermetco.com/en/portaldata/13/Resources//documents2/Brochures/Plasma_Solutions_EN3.pdf, resurss apskatīts 2012.g. 21.februārī
50. www.primes.de, resurss apskatīts 2013.g. 12.februārī
51. www.stellite.co.uk/, resurss apskatīts 2013.g. 10. martā
52. www.kobelco.co.jp/, resurss apskatīts 2013.g. 10. maijā
53. www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-the-difference-between-heat-input-and-arc-energy, TWI Technical Knowledge, resurs apskatīts 2014.g. 11. februārī
54. www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/thermal_coating_additive_manufacturing/laser_cladding/system_technology.html, resurss apskatīts 2014.g. jūnijā
55. www.vamberk.eu/cd-ENG/PDF_eng/1_Consum_BROCHURES/8_weldG3SI1_small.pdf, resurss apskatīts 2014.g. jūnijā
56. www.nittanylasertech.com, resurss apskatīts 2014.g. jūlijā
57. www.lincolnelectric.com, resurss apskatīts 2017.g. janvārī
58. <http://www.esab.com>, resurss apskatīts 2017.g. janvārī
59. www.hobartbrothers.com, resurss apskatīts 2017.g. janvārī
60. <http://exocor.com>, resurss apskatīts 2017.g. februārī

PIELIKUMS

1. pielikums

Materiāla S355J2 fizikālās īpašības

Stiepes izturība, $R_m, \text{N/mm}^2$	Minimālā tecēšanas robeža, $R_{eH}, \text{N/mm}^2$	Triecienizturība KV, J pie $t^\circ = -20\text{C}^\circ$	Cietība HB
490–630	355	27	160

Metināmās stieples ISO 14341–A G3Si1 ķīmiskais sastāvs

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %
0,06–0,12	0,7 - 1	1,3–1,6	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$

Uzkausēšanas sprausla *COAX12*

Coaxial Cladding Nozzle Coax 12

**Technical data**

Optimum powder grain size	20 ... 150 µm	Other sizes are possible.
Recommended powder feed rates	10 ... 50 g/min	The named rates refer to 3 kW laser power. Values up to 50 g/min are possible (e.g. Ni base alloys).
Distance nozzle-surface	13 - 25 mm	Other working distances on request.
Minimum powder focus	2 ...4 mm	
Maximum laser power	3 kW	Higher laser power may decrease the long-term stability.
Compatible laser	CO ₂ , Nd:YAG, diode laser	
Dimensions nozzle body	Height: 83 (57) mm Length : 81 mm	
Nozzle displacement	0° - 90°	Other angel must test.
NOTE:	The named values are recommendations, for which the cladding unit was optimized. Deviating values may possible but can harm the unit or have impact on function and reliability.	

Notes to the industrial safety

For each laser welding process – with or without powder – an exhaust is needed. While handle coating powders, a protective mask is necessary.

E-MAqS uzkausēšanas uzraudzības sistēmaModul *E-MAqS*

- Abmessungen: 111 x 63 x 157
- Komponenten:
 - Gehäuse (Aluminium, blau eloxiert)
 - Wärmebildkamera mit Objektiv
 - Filterschieber mit Filter
 - 2 Endschalter für Filterschieber
 - Pneumatikventil zur Betätigung des Filterschiebers
 - Schutzglas (optional)
 - Separate Spannungsversorgung für Kamera (optional)
- Elektrische Anschlüsse:
 - Modulsteuerung: SUB-D15 (-> SPS Roboter / CNC)

Fraunhofer

Institut
Werkstoff- und
Strahltechnikmm³

Pin	Bezeichnung	Funktion
	Spannungsversorgung Schaltventil	24 V DC
	Spannungsversorgung Endschalter	5 V DC
	Endschalter Filter ein	0 V = Filter nicht ein 5 V = Filter ein
	Endschalter Filter aus	0 V = Filter nicht aus 5 V = Filter aus

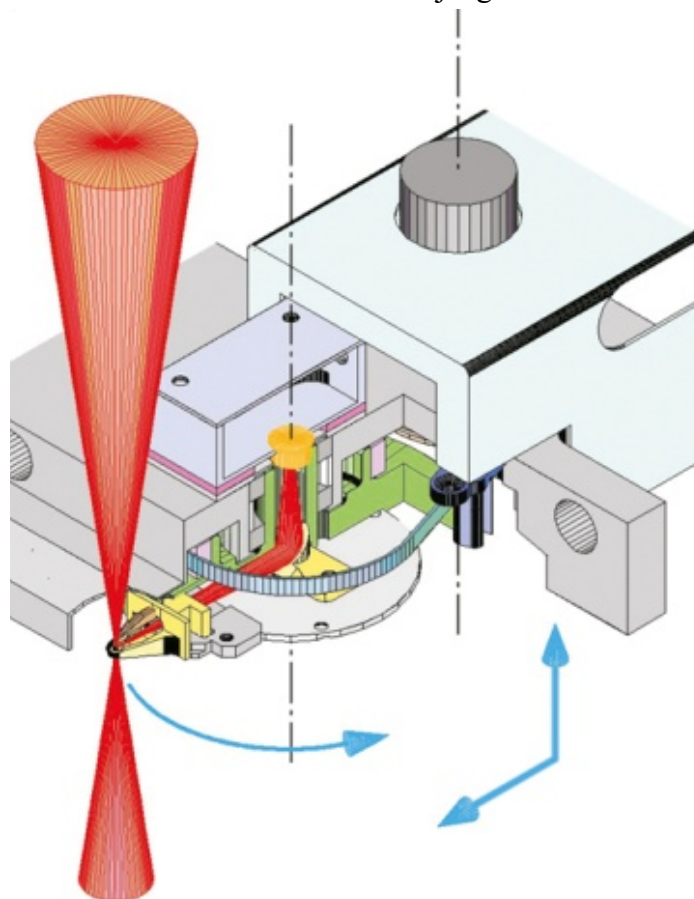
- Kamera: Hirose 12 Pin (-> Framegrabber LompocPro-IPC)

Pin	Bezeichnung	Funktion
1	GND	
2	Spannungsversorgung	+ 12 V DC
3	Videoausgang (GND)	
4	Videoausgang (Signal)	Analog Video-Out
5	HD (GND)	
6	HD (Signal)	Horizontal- Synchronisation

Primes Laser Diagnose Focus Monitor FM aprīkojums



Lāzera stara uztvērējuzgalis



Mērīšanas shēma

MAG metināmais aprīkojums „FRONIUS TransPlus Synergic 3200”

TransPuls Synergic 3200



Zoom

- Pulse welding up to 320 A
- For manual and robot applications

The TransPuls Synergic 3200 for short circuit, spray and pulsed arcs is a fully digitised and microprocessor-controlled MIG/MAG power source with an output of 320 A. The power source gives the best weld properties in every respect, and reproducible results time and time again. The multiprocess power source is suitable for MIG/MAG, TIG and electrode welding, as well as manual or robotic applications.

Pulse welding with 320 A, highest precision, exact reproducibility and best weld properties, anytime, anywhere.

3 - 320 A

40 % d.c. at 320 A, 100 % d.c. at 220 A

35,6 kg / 78.48 lb

3 x 400 V

Process MIG/MAG

Base metals

- Aluminium
- CrNi
- Special metals
- Steel

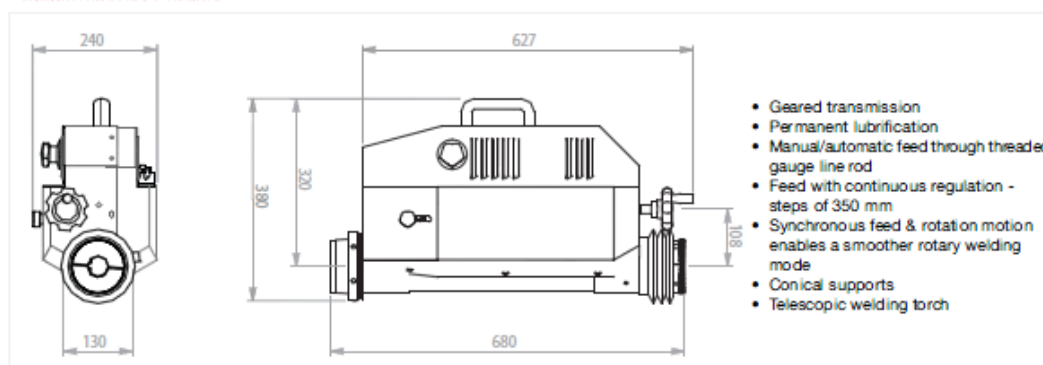
Fields of use

- Aerospace industry
- Automobile and component supply industry
- Industrial plants, pipeline construction, assembly companies
- Maintenance and repair
- Manufacture of special vehicles and construction machinery
- Metal and gantry construction, fitting shops and forges
- Plant, container and machine construction, steel engineering
- Rail vehicle construction
- Robotic welding
- Shipbuilding / offshore

Tehnoloģiskais aprīkojums „*SUPERCOMBINATA 40/I*”**SUPERCOMBINATA SC1 40/1**

WORKING DIAMETERS

(from Ø 42 mm to Ø 400 mm)

**TECHNICAL DATA SHEET****Diameters:**

IN LINE BORING:	Ø 42 mm - Ø 400 mm
EXTERNAL BORING:	Kit optional
INTERNAL WELDING:	Ø 42 mm - Ø 400 mm
EXTERNAL WELDING:	Ø 42 mm - Ø 400 mm
DRILLING:	Ø 10 mm - Ø 45 mm
TAPPING:	Ø 10 mm - Ø 45 mm
THREAD:	Kit optional
FLANGE FACING:	Kit optional

Rotation Motor:

AC motor single phase
Power at rated speed 1800 W
Rated speed rpm 2800
Engine rpm, 1° speed range 40-120 rpm 2° speed range 120-400 rpm

Feed Motor:

DC motor
Power at rated speed 90 W
Engine rpm 11

Electronic Control Panel:

Voltage - 220 V 50/60 Hz
Main switch
Emergency switch
Inverter cw/cww feed
Inverter cw/cww rotation
Potentiometer adjustment rotation rpm
Potentiometer adjustment feed rpm
Electrical absorption 2000 W

STANDARD EQUIPMENT

N° 1 ELECTRONIC CONTROL PANEL
N° 1 BORING BAR Ø 40 X 2200 mm
N° 1 BORING BAR Ø 40 X 1100 mm
N° 1 BORING BAR EXTENSION 520 mm
N° 1 TELESCOPIC WELDING TORCH
N° 1 BOX WITH 10 CUTTING EDGES
N° 1 TOOL HOLDER RIGHT Ø 12x100 mm
N° 1 TOOL HOLDER LEFT Ø 12x60 mm
N° 1 SPINDLE CENTRING KIT
N° 1 SPINDLE CENTRING KIT FOR BLIND HOLES
N° 2 MAIN BAR SUPPORT
N° 2 ADDITIONAL SUPPORT
N° 1 DIAL GAUGE SUPPORT
N° 1 DIAL GAUGE
N° 1 TOOL HOLDER FOR BORING FROM Ø 100 TO 400 mm
N° 1 BORING MACHINE STAND
N° 1 LANCE FOR EXTERNAL WELDING
N° 5 LANCE EXTENSION
N° 1 LANCE EXTENSION 100 mm
N° 5 SHORT CONTACT TIP Ø 0,8 mm
N° 5 LONG CONTACT TIP Ø 0,8 mm
N° 4 SHORT NOZZLE
N° 4 LONG NOZZLE
N° 1 TELESCOPING GAUGE UP TO 400 mm
N° 12 BRACKET FOR FLANGES
N° 1 COMPLETE SET OF WRENCHES

Laserline GmbH diožu lāzers LDF 20000-200 specifikācija

Technical data LDF

Optical specification						
Max. output power	3,000 W	4,500 W	6,000 W	10,000 W	15,000 W	20,000 W
Minimum beam quality	20 mm·mrad	30 mm·mrad	40 mm·mrad	60 mm·mrad	100 mm·mrad	200 mm·mrad
Optical fiber	400 µm [NA 0.1]	600 µm [NA 0.1]	400 µm [NA 0.2]	600 µm [NA 0.2]	1,000 µm [NA 0.2]	2,000 µm [NA 0.2]
Larger fibers with lower beam qualities are available, tailored to the applications						
Min. focus at f = 150 mm	300 µm	450 µm	600 µm	900 µm	1.5 mm	3 mm
Fiber length	10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 100 m and more on request					
Fiber-coupling unit	LLK-D/Auto, LLK-B/15 mm up to 4 kW on request					
Power stability	< +/- 2 % over 2 hours					
Wavelength range	900 nm to 1,070 nm					
Mechanical specification						
VG Power	Weight approx. 600 kg, dimensions: 950 x 770 x 1,700 mm³ (L x W x H) (except at 20 kW)					
VG Flex	Weight approx. 800 kg, dimensions: 1,220 x 1,100 x 1,750 mm³ (L x W x H)					
Connection data						
Voltage	360 – 480 V, 3 phase, PE, 50 or 60 Hz					
Power connector	CEE 32A-6h	CEE 32A-6h	CEE 32A-6h	CEE 32A-6h	CEE 32A-6h	
Power consumption at nom. Power, approx.	11 kW	15 kW	17 kW	30 kW	40 kW	50 kW
Cooling requirements, max.	8 kW	10,5 kW	11 kW	20 kW	25 kW	30 kW
Cooling lines, tap water	19 mm inner diameter tubing with quick disconnect lines (only 20,000 W without disconnect)					
External inputs	Digital 24 V, analog power control 0-10 V, safety interlocks					
Operating conditions						
Temperature	10 – 45 °C operational, 5 – 65 °C storage					
Humidity	max. 75 % @ 25 °C, with humidity protection max. 85 % @ 35 °C					
Protection rating	IP54					
Safety class	Laser safety class 4 according to EN60825-01					
Options						
Interface	PROFINET, Interbus-S, Profibus DP, DeviceNet, EtherNet/IP					
Beam switch	Time sharing or power sharing. 2 fibers (VG Power), 6 fibers (VG Flex)					
Optics	Laserline optics or commercial optics for every application					
Other	Teleservice, pilot laser, pyrometer, CCD camera, software for PC, separate control panel, dust and humidity protection, water chiller with compressor, optics chiller					
Warranty and lifetime						
Warranty	5 years on diode laser elements, 2 years on all other components					
Diode cooling	Active for highest power density and reliability					
Uptime	Typically >99.5 %					

KUKA Roboter GmbH KR 60 HA specifikācija

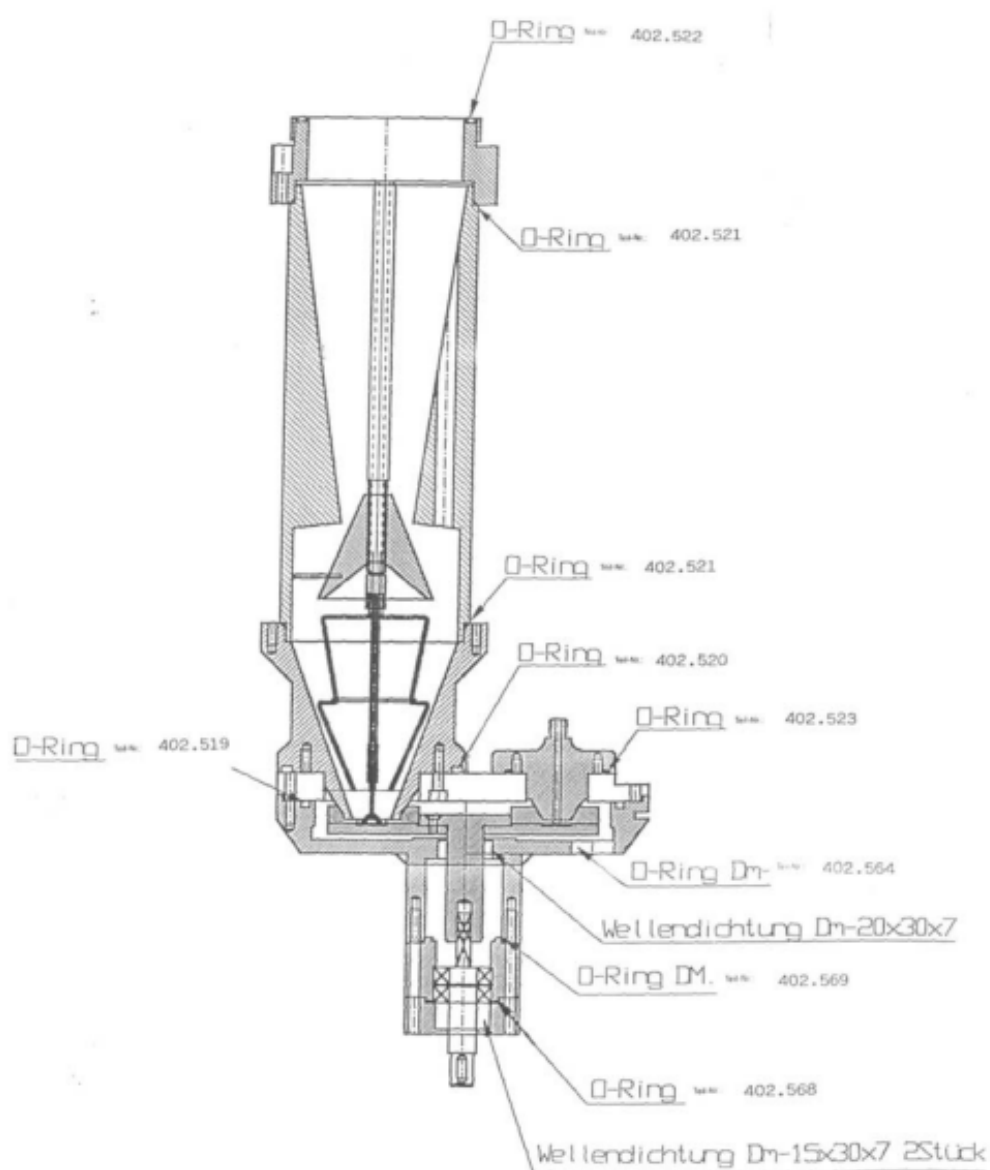
Type	KR 30 HA	KR 60 HA	KR 60 L45 HA	KR 60 L30 HA
Maximum reach	2,033 mm	2,033 mm	2,230 mm	2,429 mm
Rated payload	30 kg	60 kg	45 kg	30 kg
Suppl. load, arm/link arm/rotating col.	35/-/- kg			
Suppl. load, arm + link arm, max.	35 kg			
Maximum total load	65 kg	95 kg	80 kg	65 kg
Number of axes	6			
Mounting position	Floor, ceiling			
Variant				
Positioning repeatability*	±0.05 mm			
Path repeatability*	±0.16 mm			
Controller	KR C2 edition2005			
Weight (excluding controller), approx.	665 kg	665 kg	671 kg	679 kg
Temperature during operation	+10 °C to +55 °C			
Protection classification	IP 64, IP 65 (In-line wrist)			
Robot footprint	850 mm x 950 mm			
Connection	7.3 kVA			
Noise level	< 75 dB			

Axis data	Range (software)	Speed with rated payload			
		30 kg	60 kg	45 kg	30 kg
Axis 1 (A1)	±185°	140°/s	128°/s	128°/s	128°/s
Axis 2 (A2)	+35°/-135°	126°/s	102°/s	102°/s	102°/s
Axis 3 (A3)	+158°/-120°	140°/s	128°/s	128°/s	128°/s
Axis 4 (A4)	±350°	260°/s	260°/s	260°/s	260°/s
Axis 5 (A5)	±119°	245°/s	245°/s	245°/s	245°/s
Axis 6 (A6)	±350°	322°/s	322°/s	322°/s	322°/s

GTV GmbH MF-PF 2/2 specifikācija

4.1 SPECIFICATION

- Installation Voltage: 230 V/50 Hz or **110 V/60 Hz**
- Feeder gas pressure: 4 bar
- Canister Capacity: 1.5 Litre (Option 5 Litre and 0,3 Litre for Laser)
- Dimensions PF 2/X: 600 mm x 350 mm x 1400 mm (W x D x H)
PF 4/2: 600 mm x 600 mm x 1400 mm (W x D x H)
- Heater jacket Temp: 0 - 50° C



MAG uzkausēšanas eksperimenta analītiskās daļas matemātiskās izteiksmes

Grafika (3.3. att.) redzamās sakarības izteiktas matemātiskās sakarībās, no (0.1) līdz (0.6).

$$H_{\max} = 0,01w^2 + 0,06w + 1,21. \quad (0.1)$$

$$H_{\max} = 0,004U^2 + 0,05U - 0,37. \quad (0.2)$$

$$H_{\min} = -0,02w^2 + 0,44w - 0,61. \quad (0.3)$$

$$H_{\min} = -0,03U^2 + 1,31U - 12,63. \quad (0.4)$$

$$H_{\text{diff}} = 0,03w^2 - 0,38w + 1,82. \quad (0.5)$$

$$H_{\text{diff}} = 0,03U^2 - 1,26U + 12,26. \quad (0.6)$$

Sakarībās, kas iekļautas 3.4. attēlā redzamā grafika iekļautas izteiksmēs no (0.7) līdz (0.9):

$$A_c = 0,22w^2 + 5,42w + 13,23. \quad (0.7)$$

$$A_{vc} = -0,42w^2 + 11,96w - 16,89. \quad (0.8)$$

$$C_v = 0,004w^2 + 0,05w - 0,37. \quad (0.9)$$

Attēlā 3.5. izvirzītās sakarības apkopotas no (0.10) līdz (0.12):

$$C_v = -0,23 \left(\frac{w}{v}\right)^2 + 5,89 \left(\frac{w}{v}\right) + 3672. \quad (0.10)$$

$$D_c = -0,08 \left(\frac{w}{v}\right)^2 + 1,18 \left(\frac{w}{v}\right) + 26,02. \quad (0.11)$$

$$H_{\min} = -0,007 \left(\frac{w}{v}\right)^2 + 0,28 \left(\frac{w}{v}\right) - 0,80. \quad (0.12)$$

HIGHYAG Lasertechnologies Optiskais kabelis

Technical specifications

Description	Technical specifications
Fiber core diameter	200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500 μm
Laser light cable length	5, 10, 15, 20, 30, 50 m (other lengths on request)
Connector dimensions	Refer to section 5.3
Minimum permissible bending radius	
Fiber core diameters of 200 – 800 μm	250 mm
Fiber core diameters of 1000 – 1500 μm	300 mm
Maximum permissible torsion	
Fiber core diameters of 200 – 1000 μm	90°/m, max. of 180° altogether
Fiber core diameter of 1500 μm	45°/m, max. of 180° altogether
<i>Careful! Avoid exposure to torsion as far as possible! Torsion, even when below the limits stated herein, can reduce the service life of the laser light cable. The values stated herein are the limit values for torsion exposure that cannot be avoided!</i>	
Maximum numerical aperture:	
Fiber core diameters of 200 – 1000 μm	0.20
Fiber core diameters of 1500 μm	0.32
Minimum numerical aperture:	0.125
Max. permissible laser power	
Fiber core diameters of 200 – 300 μm	5 kW
Fiber core diameters of 400 – 1500 μm	10 kW
Wavelength of the laser light which can be transmitted	
Laser light cable LLKD for diode lasers	$\lambda = 800 - 980 \text{ nm}$
Electric resistance of the closed safety circuit	
between pin 1 and pin 3	< 50 Ω
between pin 1 and pin 2	Interpretation by LSM02
(The exact amount depending on the length of the laser light cable)	
Operating temperature	+15 °C to +60 °C
<i>Careful! Condensation on the optical surfaces (fiber tips) must be ruled out! If cooled laser light cable receivers are used, the cooling-water temperature must be higher than the dew-point temperature of the ambient air!</i>	

Laserline GmbH optikas specifikācija

Optics Series

Laserline optics specifications

Mechanical spec.	Compact	Standard
Lens diameter	1" (25.4 mm)	2" (50.8 mm)
Optics dimensions, outside	Ø 44 mm	70 x 70 mm ²
Weight of standard processing optics ^{*1}	< 0.5 kg	< 4 kg
Weight of optics mount ^{*2}	0.7 kg	0.7 kg
Torsion protection	–	yes
Optical specifications	Compact	Standard
Max. laser power	< 4,000 W ^{*3}	< 20,000 W
Numerical aperture	NA 0.1 – 0.2	
Beam quality	20 – 150 mm-mrad	
Focal length collimation ^{*4}	20 – 100 mm	60 – 200 mm
Focal length focusing ^{*4}	40 – 500 mm	80 – 600 mm
Wavelength range	900 – 1,070 nm	
Fiber plug connector	LLK-B, LLK-D/ Auto	LLK-B, LLK-D/ Auto
Fiber diameter (LLK)	200 – 2,000 µm	

Operating conditions

Ambient temperature	10 – 45 °C
Operating temperature	Max. 50 °C
Humidity	Non condensing
Active water cooling	Recommended above 500 W cw

Auxiliary components

On-axis components	Pyrometer, CCD camera, power meter	
Coupling unit	Single, 0°/90°	Single, double, 0°/90°
Interfaces	C-Mount, SM1, M40 x 1.5	
Options	Homogenizing elements, cross-jet, 90°-coupling cube, 19" rack mount optics chiller, cladding nozzle, ring-/twin-/telescope optics zoom, quick-change cover slide	

Spot variants

Pic	Type	min. [mm]	max. [mm]
	Single spot	0.2	30
	Twin spot	0.2	15
	Ellipse	0.3 x 0.4	5 x 10
	Ring	2.0	50
	Line	0.2 x 4.0	1.0 x 135
	Rectangle	3 x 5	9 x 135
	Square	2 x 2	135 x 135
	Scanner	30 x 40 Focus 0.25	400 x 400 Focus 1.8

*1 fiber connector, collimating and focusing optics, cover slide

*2 base plate, optics mount

*3 higher power upon request

*4 other focal lengths available upon request

Lāzeruzkausēšanas un *MAG* uzkausēšanas salīdzināšanas eksperimenta analītiskās daļas matemātiskās izteiksmes

Attēlā 4.6. redzamajā grafika matemātiskās sakarības apkopotas no (0.13) līdz (0.18). Sakarības apraksta uzkausējuma augstumu vērtības pie soļa $f = 2$ mm.

$$H_{\max} = 0,07 F_{\text{pm}} + 0,49. \quad (0.13)$$

$$H_{\max} = 5 \cdot 10^{-4} P + 0,96. \quad (0.14)$$

$$H_{\min} = 0,08 F_{\text{pm}} + 1,59. \quad (0.15)$$

$$H_{\min} = 5 \cdot 10^{-4} P - 0,05. \quad (0.16)$$

$$H_{\text{diff}} = -0,008 F_{\text{pm}} + 1,1. \quad (0.17)$$

$$H_{\text{diff}} = -5 \cdot 10^{-5} P + 0,92. \quad (0.18)$$

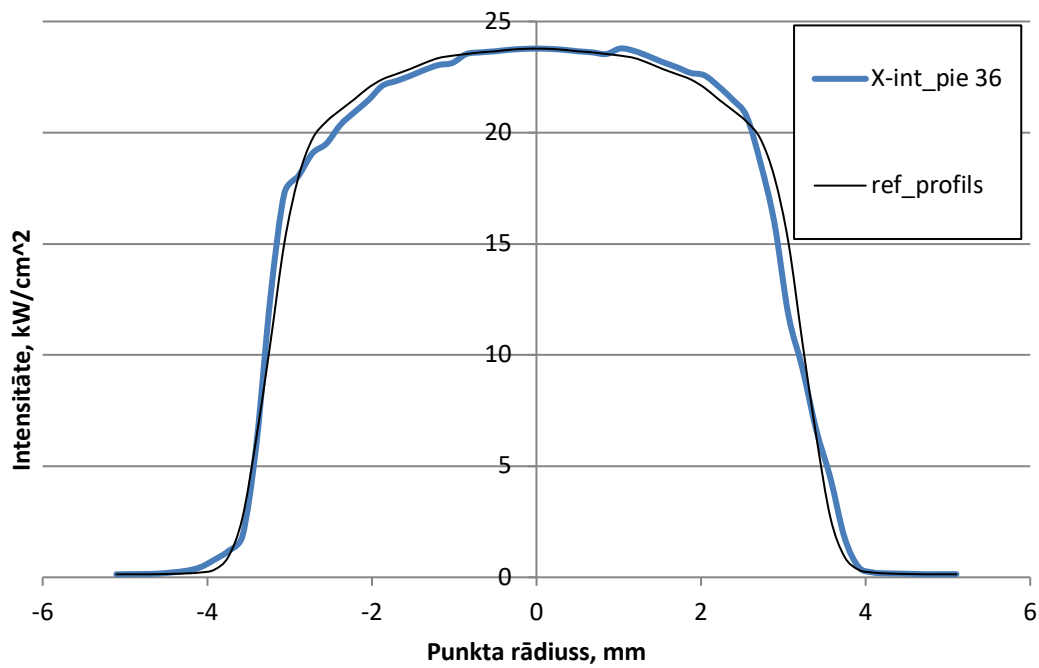
Lāzeruzkausēšanas tehnoloģijai 4.7. attēlā redzamais ir aprakstāms ar matemātiskām sakarībām no (0.19) līdz (0.21):

$$C_v = -0,002 \left(\frac{F_{\text{pm}}}{v} \right)^2 + 0,25 \left(\frac{F_{\text{pm}}}{v} \right) + 60,16. \quad (0.19)$$

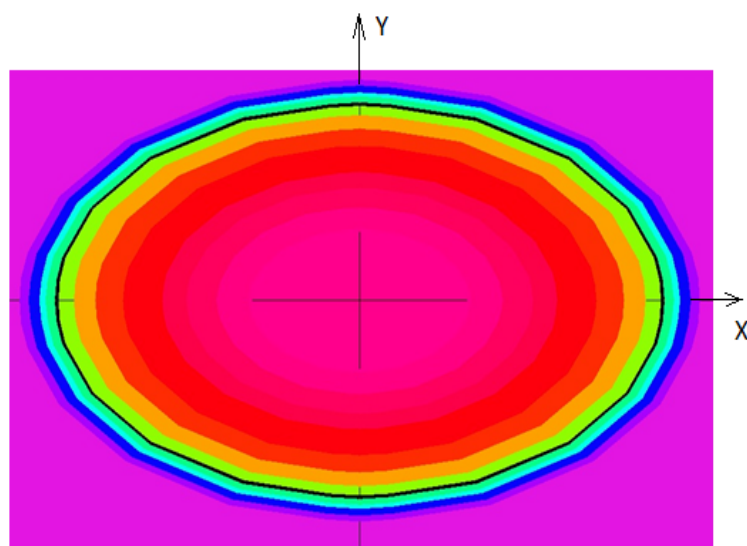
$$D_c = 4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{F_{\text{pm}}}{v} \right)^2 + 0,014 \left(\frac{F_{\text{pm}}}{v} \right) + 0,06. \quad (0.20)$$

$$H_{\min} = 0,029 \left(\frac{F_{\text{pm}}}{v} \right)^2 - 3,29 \left(\frac{F_{\text{pm}}}{v} \right) + 101,8. \quad (0.21)$$

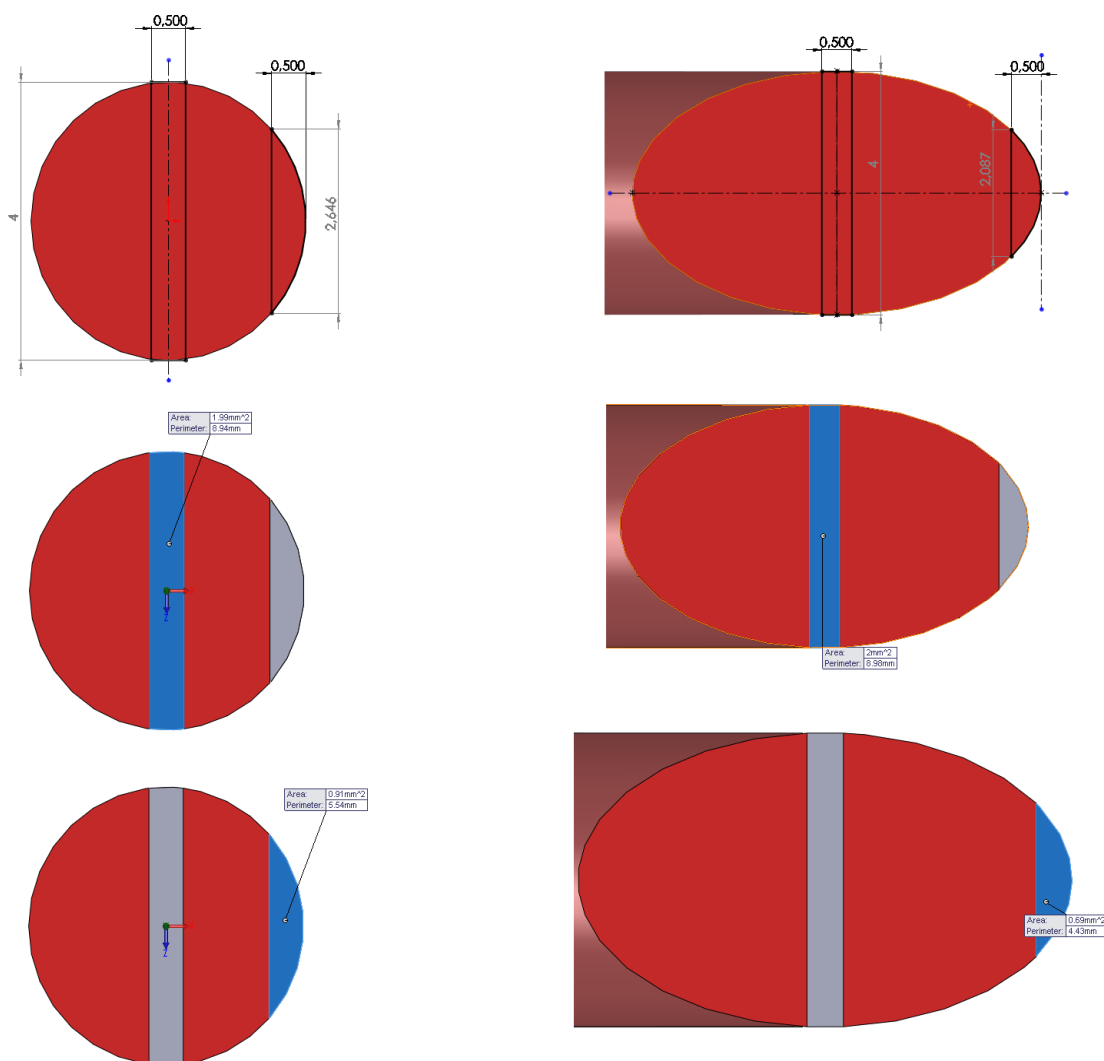
Lāzera punkta konstruēšana pie $\alpha = 36^\circ$



Y ass virzienā notiek uzkausēšana



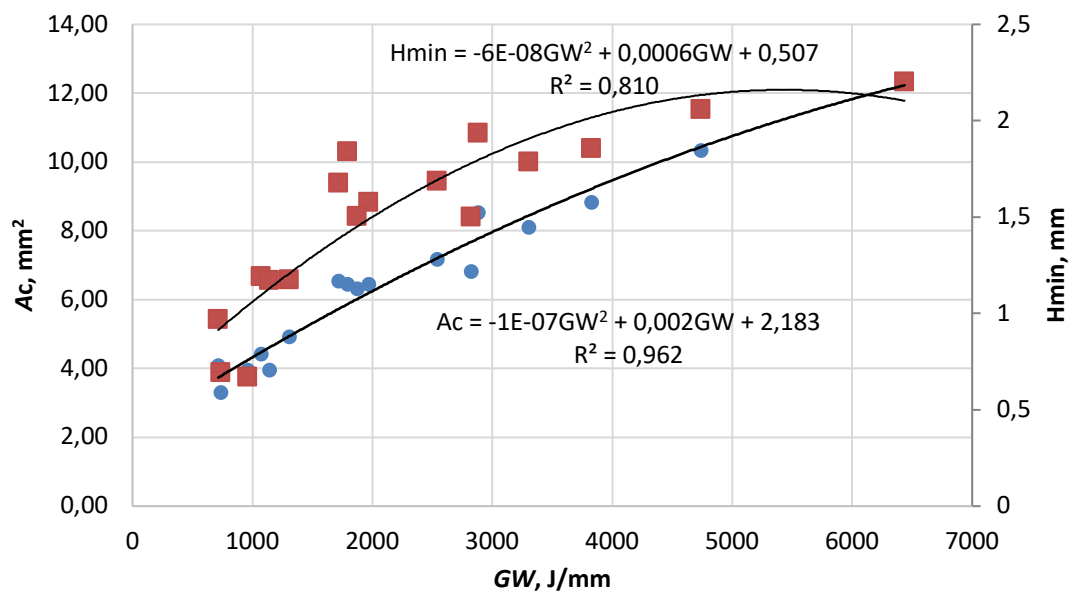
Lāzera punkta segmentu garumi pie $\alpha = 90^\circ$ un $\alpha = 36^\circ$



Lāzera punkta segments	vidus	mala	mala
α	90	90	36
v; mm/s	8,33	8,33	8,33
L pie 0,5mm segmenta; mm	4	2,646	2,087
t; s	0,48	0,32	0,25
% īsāks t par 90 vidu; %	0	-34	-48

MAG matemātiskā modeļa alternatīva uzkausējuma laukuma un minimālā uzkausējuma augstuma noteikšanai pēc tehnoloģiskajiem parametriem, un siltuma ievades Q

$$GW = Q \cdot \frac{w}{v}, \left[\frac{J}{mm} \right].$$



MAG izmērītie un aprēķinātie rezultāti lietojot parametru GW

GW, J/mm	A_c , mm ²	A_c apr, mm ³	H_{min} , mm	H_{min} apr, mm
740,11	3,31	3,61	0,69	0,92
960,56	3,95	4,01	0,67	1,03
1793,99	6,45	5,45	1,84	1,39
2885,54	8,53	7,12	1,94	1,74
3306,75	8,11	7,70	1,79	1,83
4742,46	10,34	9,42	2,06	2,00
6436,29	12,42	10,91	2,20	1,88
1071,98	4,42	4,21	1,19	1,08
1720,72	6,55	5,33	1,68	1,36
1970,90	6,46	5,74	1,58	1,46
2823,28	6,82	7,03	1,50	1,72
3828,40	8,83	8,37	1,86	1,92
714,57	4,08	3,56	0,97	0,91
1144,72	3,96	4,34	1,17	1,12
1310,51	4,92	4,63	1,17	1,19
1875,09	6,33	5,58	1,50	1,42
2540,51	7,17	6,62	1,69	1,64

Apraksts izteiksmes (6.13) izstrādāšanai

Noskaidrots, ka lāzeruzkausēšanas eksperimentā pie $\alpha = 90^\circ$ vidējā uzkausējuma efektivitāte (E_{pm}) ir 60 %. Kā arī ir noskaidrota izteiksme (0.22), kas apraksta A_c atkarību no G pie $\alpha = 90^\circ$ un $E_{pm} = 60$ %.

$$A_c = -0,012G^2 + 0,55G + 0,61. \quad (0.22)$$

Sekojoši izstrādāta empīriskā izteiksme (0.23), lai noteiktu rezultātus, kādi ir sagaidāmi pie $\alpha = 90^\circ$ un $E_{pm} = 100$ % (uzkausēts viss pievadītais materiāls).

$$A_c = -0,02G^2 + 0,92G + 1,02. \quad (0.23)$$

Darbā ir zināms uzkausējamā materiāla īpatsvars ($\rho = 0,00846 \text{ g/mm}^3$), kas dod iespēju matemātiskās izteiksmes paplašināt, lai raksturlielumu prognozēšanā iekļautu ne tikai dažādas uzkausējuma efektivitātes, bet arī dažādus uzkausējamus materiālus. Tādēļ ir ieviests jauns uzkausējuma efektivitātes un materiāla īpatsvara koeficients E_{pm}/ρ . Sastādīta 0.1. tabula, kur iekļauts koeficients E_{pm}/ρ , izteiksmju (0.22) un (0.23) vienādojumu koeficienti.

0.1. tabula

Koeficienta E_{pm}/ρ un regresijas vienādojumu (0.22) un (0.23) koeficienti pie G

$\rho, \text{ g/mm}^3$	$E_{pm}, \%$	E_{pm}/ρ	Koeficienti		
			G^2	G	c
0,00846	1	118,20	-0,02	0,92	1,02
0,00846	0,6	70,92	-0,012	0,55	0,61

Lietojot 0.1. tabulas E_{pm}/ρ un parametra G koeficientus, izteiksmei (0.24) iespējams sastādīt lineārus regresijas vienādojumus, attiecīgi katram: G^2 , G un brīvajam loceklim (c), kur nezināmos locekļus apzīmē ar koeficientiem $c_{11} \dots c_{32}$.

$$A_c = \left(c_{11} \cdot \frac{E_{pm}}{\rho} + c_{12}\right) G^2 + \left(c_{21} \cdot \frac{E_{pm}}{\rho} + c_{22}\right) G + \left(c_{31} \cdot \frac{E_{pm}}{\rho} + c_{32}\right). \quad (0.24)$$

Izteiksmes (0.24) koeficientu $c_{11} \dots c_{32}$ vērtības noskaidro, atrisinot lineāros vienādojumus, iegūtās vērtības apkopotas 0.2. tabulā.

0.2. tabula

Koeficientu vērtības izteiksmei

c_{11}	$-1,7 \cdot 10^{-4}$
c_{12}	$10 \cdot 10^{-4}$
c_{21}	$77,83 \cdot 10^{-4}$
c_{22}	$1,11 \cdot 10^{-16}$
c_{31}	$86,5 \cdot 10^{-4}$
c_{32}	$5 \cdot 10^{-4}$

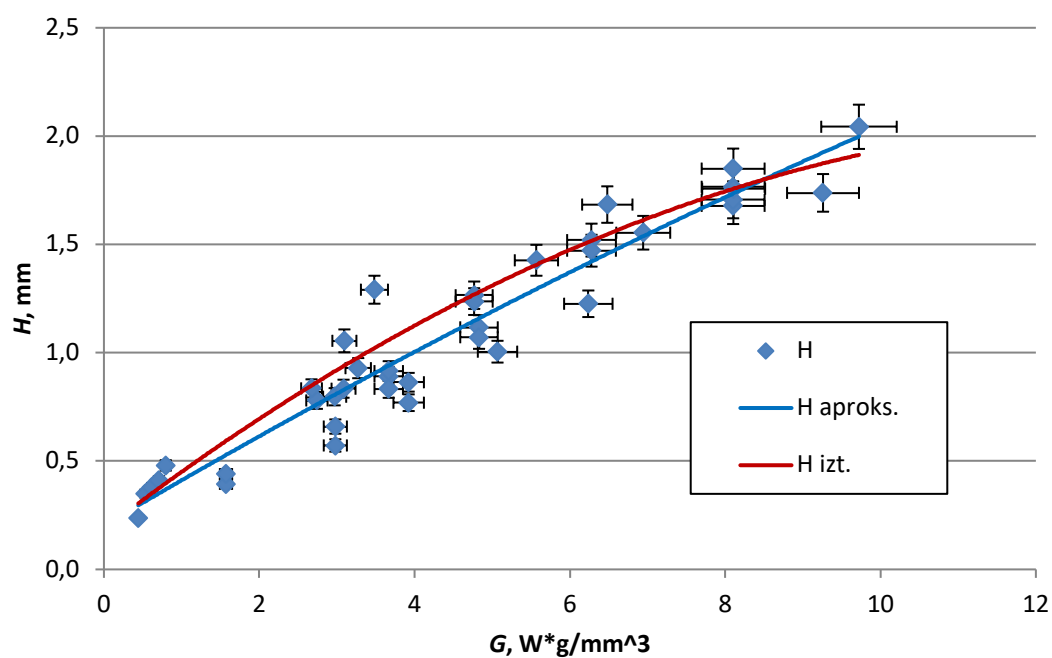
Iepriekšējā izteiksmē (0.24), ievietojot 0.2. tabulas koeficientus, iespējams izveidot matemātisko izteiksmi (6.13) (87 lpp.).

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta un modelētās A_c vērtības determinācijas koeficienta
aprēķinam izteiksmei (7.2)

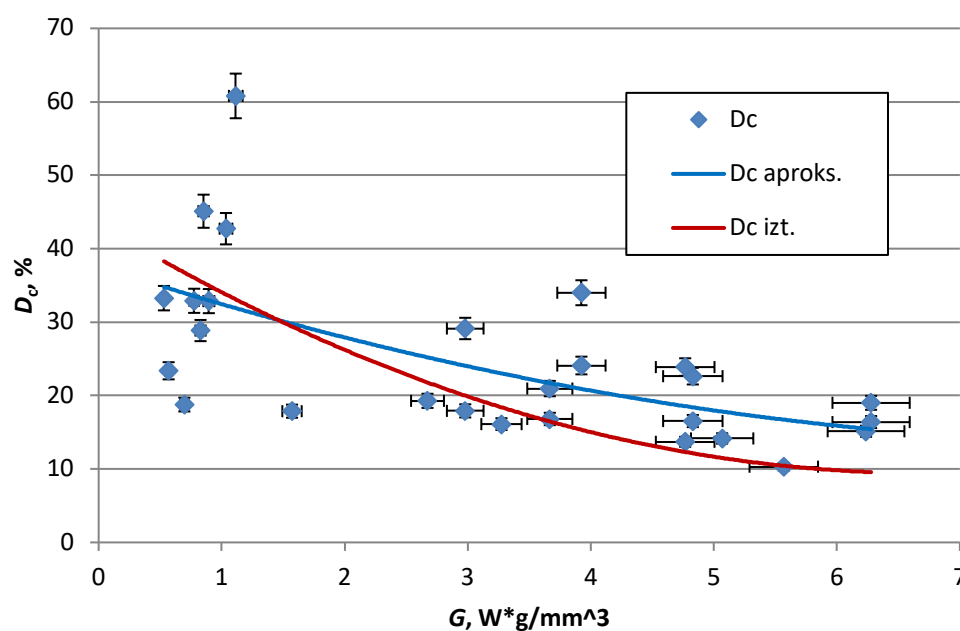
n	G	A_c	$A_c \text{ mod}$	A_c^2	$A_c \text{ mod}^2$	$A_c * A_c \text{ mod}$
1	4,77	3,45	2,99	11,92	8,97	10,34
2	3,67	2,43	2,49	5,92	6,20	6,06
3	3,67	2,01	2,49	4,06	6,20	5,01
4	2,98	1,80	2,16	3,24	4,67	3,89
5	6,28	4,28	3,65	18,29	13,29	15,59
6	4,83	2,99	3,02	8,94	9,13	9,04
7	3,92	2,22	2,61	4,93	6,81	5,79
8	1,57	0,94	1,45	0,88	2,11	1,37
9	1,57	1,12	1,45	1,25	2,11	1,63
10	3,27	2,57	2,30	6,60	5,30	5,92
11	4,77	3,47	2,99	12,02	8,97	10,38
12	3,67	2,23	2,49	4,98	6,20	5,55
13	2,98	1,55	2,16	2,41	4,67	3,36
14	6,28	4,27	3,65	18,23	13,29	15,56
15	4,83	2,89	3,02	8,35	9,13	8,73
16	3,92	2,04	2,61	4,16	6,81	5,32
17	8,11	4,71	4,37	22,20	19,06	20,57
18	6,24	3,09	3,63	9,52	13,16	11,20
19	5,07	2,45	3,13	6,01	9,78	7,67
20	2,67	1,89	2,01	3,57	4,04	3,80
21	5,57	3,64	3,35	13,25	11,19	12,18
	SUM	56,05	58,02	170,74	171,08	168,95

Lāzeruzkausēšanas eksperimenta un modelētās A_c vērtības determinācijas koeficienta
aprēķinam izteiksmei (7.3)

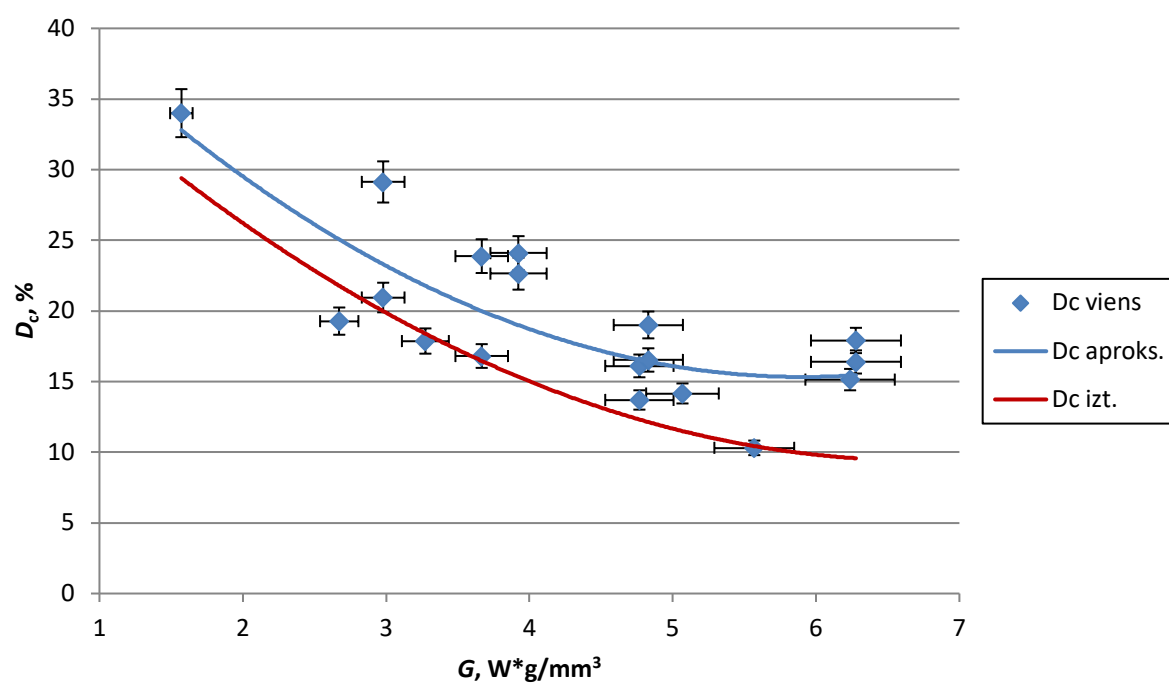
n	G	A_c	$A_c \text{ mod}$	A_c^2	$A_c \text{ mod}^2$	$A_c * A_c \text{ mod}$
1	4,77	4,03	2,99	16,26	8,97	12,08
2	3,67	2,80	2,49	7,87	6,20	6,98
3	3,67	2,85	2,49	8,11	6,20	7,09
4	2,98	2,06	2,16	4,25	4,67	4,45
5	6,28	4,34	3,65	18,81	13,29	15,81
6	4,83	3,47	3,02	12,03	9,13	10,48
7	3,92	2,53	2,61	6,38	6,81	6,59
8	1,57	1,57	1,45	2,47	2,11	2,28
9	1,57	1,51	1,45	2,28	2,11	2,19
10	3,27	3,05	2,30	9,30	5,30	7,02
11	4,77	4,21	2,99	17,70	8,97	12,60
12	3,67	3,00	2,49	9,03	6,20	7,48
13	2,98	2,26	2,16	5,12	4,67	4,89
14	6,28	4,78	3,65	22,87	13,29	17,43
15	4,83	3,46	3,02	11,96	9,13	10,45
16	3,92	2,79	2,61	7,78	6,81	7,28
17	8,11	4,57	4,37	20,90	19,06	19,96
18	6,24	3,52	3,63	12,42	13,16	12,79
19	5,07	2,82	3,13	7,96	9,78	8,82
20	2,67	2,10	2,01	4,41	4,04	4,22
21	5,57	3,98	3,35	15,87	11,19	13,33
SUM		65,71	58,02	223,77	171,08	194,23



Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu H , salīdzinot modelētās H vērtības un citu autoru publikācijās atrodamos eksperimenta rezultātus



Parametra G ietekme uz uzkausējuma augstumu D_c , salīdzinot modelētās H vērtības un citu autoru publikācijās atrodamos eksperimenta rezultātus



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