



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Didzis Avišāns**

# **AIZSARGGĀZES IETEKME UZ AUGSTAS STIPRĪBAS TĒRAUDA METINĀŠANAS PROCESU UN ŠUVI PUSAUTOMĀTISKĀ METINĀŠANĀ**

Promocijas darba kopsavilkums



# **RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Mehānikas un mašīnbūves institūts

## **Didzis Avišāns**

Doktora studiju programmas “Ražošanas tehnoloģija” doktorants

# **AIZSARGGĀZES IETEKME UZ AUGSTAS IZTURĪBAS TĒRAUDA METINĀŠANAS PROCESU UN ŠUVI PUSAUTOMĀTISKĀ METINĀŠANĀ**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Avišāns D. Aizsarggāzes ietekme uz augstas stiprības tērauda metināšanas procesu un šuvi pusautomātiskā metināšanā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 38 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-16” 2022. gada 29. jūnija lēmumu, protokols Nr. 3.

Promocijas darbs izstrādāts un finansēts sadarbībā ar SAM 8.2.2. “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekts Rīgas Tehniskajā universitātē Nr.8.2.2.0/18/A/017.



Vāka fotogrāfijas autors – Austris Auziņš.

<https://doi.org/10.7250/9789934228490>

ISBN 978-9934-22-849-0 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 14. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 204. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Viktors Mironovs,  
Rīgas Tehniskā universitāte

*Dr. sc. ing.* Olegas Černašejus,  
Viļņas Ģedimīna tehniskā universitāte, Lietuva

*Dr. sc. ing.* Fjodor Sergejev,  
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

## APSTIPRINĀJUMS

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

Didzis Avišāns ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, noslēgums un secinājumi, literatūras saraksts, 48 attēli, deviņas tabulas, seši pielikumi, kopā 71 lappuse, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 66 atsauces.

## Saturs

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	5
Tēmas aktualitāte .....	5
Darba mērķis un uzdevumi.....	6
Pētījumu metodes.....	6
Zinātniskā novitāte.....	7
Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti .....	7
Praktiskā nozīmība.....	8
Darba aprobācija.....	8
PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN TERMINI.....	11
1. LITERATŪRAS APSKATS.....	12
1.1. Aizsarggāzes ietekme uz <i>MAG</i> metināšanas procesu.....	12
1.2. Kūstošā elektroda materiāla, pamata materiāla un metināšanas parametru ietekme uz <i>MAG</i> metināšanas procesu .....	12
1.3. Pētnieku veikto eksperimentu apkopojums .....	13
2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI.....	16
2.1. Eksperimentālo procesu un paraugu izvēle .....	16
2.2. Sametinātās šuves izpēte .....	19
2.3. Sametinātās šuves mikrostruktūras izpēte .....	21
2.4. Sametinātās šuves ķīmiskais sastāvs .....	24
2.5. Sametinātās šuves materiāla cietība .....	26
3. SAMETINĀTĀS ŠUVES MATERIĀLA LEĢĒJOŠO ELEMENTU UN CIETĪBAS PROGNOZĒŠANAS IZSTRĀDĀTAIS MODELIS .....	29
3.1. Aizsarggāzes un metināšanas parametru sakarības ar leģējošo elementu Mn un Ni procentuālā sastāva izmaiņu prognozēšanas modelis .....	29
3.2. Aizsarggāzes procentuālā sastāva un metināšanas parametru sakarības ar sametinātās šuves materiāla cietības izmaiņu prognozēšanas modeli .....	29
4. PROGNOZĒŠANAS MODEĻA APROBĀCIJA UN TĀLĀKĀS IZPĒTES VIRZIENI .....	33
PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	34
INFORMĀCIJAS AVOTI.....	36

## DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Augstas izturības tēraudu metināšana mūsdienu ražošanā kļūst arvien aktuālāka. Šie materiāli ļauj, minimāli palielinot izmaksas, samazināt konstrukciju svaru. Metāla izstrādājumu ražošanā plaši tiek izmantota pusautomātiskā metināšana aizsarggāzes vidē (*MAG; Metal-Active-Gas*). Viens no galvenajiem uzdevumiem šī procesa laikā ir nezaudēt materiāla mehāniskās īpašības. Metināšanas laikā sametinātājā šuvē notiek metalurģiski procesi – metāla izkausēšana, ķīmisko un legējošo elementu sastāva maiņa, metāla mikrostruktūras veidošanās no jauna, metālam atdzīstot. Šos procesus būtiski ietekmē gan izmantotie piedevmateriāli, gan aizsarggāze, gan arī iestatītie metināšanas parametri.

Līdz šim veiktie pētījumi galvenokārt fokusēti uz mazlegētu tēraudu (235–355 MPa) metināšanu, kas veikti īsajā lokā, kad metināšanas stieples pārnese notiek pilienu veidā. Tā ietekmē rodas lēnāka šuves formēšanās, termiskā ietekme jeb siltuma ieguldījums uz metināšanas šuvi ir liels. Turpretim legējošo materiālu izmaiņas, kā arī materiāla mehāniskās īpašības būtiski netiek ietekmētas. Šajos pētījumos arī tiek uzsvērtā aizsarggāzes ietekme. Daudzos pētījumos kā viens no labākajiem maisījumiem tiek ieteikts 25 % CO<sub>2</sub> (oglekļa dioksīda) maisījums Ar (argonā) [5, 14, 29, 31]. Ir arī veikti līdzīgi pētījumi par ļoti augstas izturības tēraudu metināšanu (890–1000 MPa) [38, 40, 42, 43]. Šajos pētījumos tiek uzsvērts, ka aizsarggāzes maisījumi ar mazāku CO<sub>2</sub> saturu Ar dod labāku rezultātu. Šie pētījumi ir veikti, metinot ar metināšanas parametriem, kas nodrošina kūstošā elektroda pāreju strūklveidā. Tas ļauj palielināt metināšanas ātrumu, samazināt siltuma ieguldījumu. Tā rezultātā metināšanas šuves veidošanās un metalurģiskie procesi norisinās ātrāk, loka temperatūra paaugstinās, izkausētais materiāls kļūst šķidrāks, šuves veidošanās process nav tik viegli kontrolējams [14]. Tomēr paaugstināta CO<sub>2</sub> klātbūtne aizsarggāzē un metināšanas laikā palielina iespēju veidoties īssavienojumam, kā rezultātā var tikt izdedzināti nozīmīgi legējošie materiāli. Tas var izraisīt metinātās šuves mehānisko īpašību pasliktināšanos, līdz ar ko tā var kļūt par vājāko punktu konstrukcijā.

Analizējot pēdējos gados veiktos pētījumus, tika secināts, ka iztrūkst pētījumu par mazlegētu, augstas izturības (420–850 MPa) tēraudu metināšanu. Tieši šie materiāli tiek arvien vairāk izmantoti un kļūst pieprasīti ne tikai Latvijas, bet arī citos tirgos. Līdz ar to var secināt, ka pētījums par mazlegētu augstas izturības tēraudu metināšanu un aizsarggāzes ietekmi uz procesu ir aktuāla. Pēdējos gados metināšanas iekārtu ražotāji tirgū piedāvā augstas jaudas un veiktspējas aprīkojumu, kas uzņēmumiem sniedz iespēju palielināt ražošanas jaudas, paaugstinot metināšanas parametrus. Līdz ar to pētījums par augstas ražības parametru un metināšanu strūklveida pārnesei vidē un to ietekmi uz sametinātās šuves mehāniskajām īpašībām arī ir ļoti nozīmīgs.

Hipotēze: mazlegētu augstas izturības tēraudu (420–850 MPa) *MAG* metināšanā ar strūklveida pārnesei aizsarggāzes, kuru sastāvā, palielinoties CO<sub>2</sub> saturam, kā arī O<sub>2</sub> pievienošanas rezultātā samazinās sametinātās šuves materiāla cietība. Pamatojoties uz šo pieņēmumu, tika veikts pētījums, kas ir izklāstīts šajā promocijas darbā.

## Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izpētīt un noskaidrot *MAG* metināšanas ar augstiem metināšanas parametriem (metināšanas strāva virs 265 A līdz 365 A), kas nodrošina strūklveida pārnesei un aizsarggāzes maisījuma ietekmi uz mazlēģētu augstas izturības tēraudu sametināto savienojumu mehāniskajām īpašībām, mikrostruktūras izmaiņām un ķīmisko sastāvu. Pētījuma rezultātā paredzēts izstrādāt matemātisko modeli, kas palīdzētu prognozēt sametinātās šuves mehāniskās īpašības atkarībā no metināšanas parametru un aizsarggāzes lietošanas.

Mērķa sasniegšanai tika veikti vairāki uzdevumi.

1. Līdzšinējo pētījumu izpēte un analīze.
2. Metināšanas paraugu sametināšana ar dažādām aizsarggāzēm un dažādiem augstiem metināšanas parametriem, kas nodrošina kustošā elektroda pārnesei strūklveidā.
3. Sametināto paraugu vizuālā testēšana, metāla ķīmiskā sastāva un mikrostruktūras analīze.
4. Iegūtā savienojuma mehānisko īpašību (cietības) pārbaude.
5. Mehānisko īpašību (cietības) prognozēšanas matemātiskā modeļa izstrāde.
6. Iegūto pētījumu rezultātu aprobācija.

## Pētījumu metodes

Promocijas darba mērķu sasniegšanai un uzdevumu risināšanai tika izmantotas kvalitatīvās un kvantitatīvās pētījumu metodes, kā arī tiek uzskaitīts un aprakstīts eksperimentu tehniskais nodrošinājums.

Lai nodrošinātu veikto eksperimentu kvalitatīvu rezultātu, izmēģinājumiem tika izvēlēta viena no šī brīža labākajām metināšanas iekārtām *FRONIUS®* (Šveice). Eksperimentu veikšanai tika izmantota viena no pēdējā laikā izstrādātajām iekārtām *Fronius®500i*, kas nodrošina paredzēto augstas strāvas parametru izpildi, kā arī stabilu strūklveida metināšanas elektroda pārnesei, kas ir būtisks nosacījums šim pētījumam. Stabila metināšanas procesa virzības nodrošināšanai tas tika mehanizēts ar *FRONIUS®FlexTrack 45 Pro* (Šveice) metināšanas traktoru. Metināšanas parametru precīzai izvēlei tika izmantota uzņēmuma *FRONIUS®* izstrādātā aplikācija *WeldConnect®*, ar kuras palīdzību tika piemeklēti atbilstošie metināšanas parametri, kas nodrošinātu kustošā elektroda pārnesei strūklveidā, izturot iestatīto metinātās šuves izmēru.

Pēc veiktajiem eksperimentiem paraugi tika sagatavoti tā, lai būtu iespējams veikt tālākus sametinātās šuves mikrostruktūras izpēti, caurmetinājumu un sakusumu, ķīmisko analīzi un cietības mērījumus. Paraugu sagatavošanā tika izmantots laboratorijas aprīkojums *Texmet 2000* (Itālija). Sagatavotie paraugi tika kodināti ar 9 % slāpekļskābi, kā rezultātā ir redzama sametinātās šuves forma un var tikt veikti turpmākie pētījumi un mērījumi. Izmantojot optisko mikroskopu *Axiovert 40 MAT* (Vācija) ar 50 reizu palielinājumu, tika noteikts poru un citu iekļāvumu lielums un daudzums. Izveidotās mikrostruktūras graudu izvietojums un to veidojums tika noteikts ar 200 reizu lielu palielinājumu. Izmantojot optisko spektrometru *HITACHI PMI-MASTER Pro2* (Japāna), tika noteikts gan pamatmateriāla, gan no jauna izveidotās sametinātās šuves ķīmiskais sastāvs, pēc kura tika veikti tālākie darba secinājumi.

Iegūto paraugu cietības mērījumi tika veikti ar *Mitutoyo Micro Vickers* cietības mērītāju *HM-210D* (Japāna).

Datu apstrādē izmantotas statistikas metodes: aprakstošā/deskriptīvā statistika; prognozēšanas modeļa izstrādē izmantota sakarību noteikšanas secinošā statistikas metode – daudzfaktoru regresijas analīze un korelācijas analīze. Rezultātu attēlošana nodrošināta grafiku, attēlu un tabulu veidā.

### Zinātniskā novitāte

- Pierādīts, ka metināšanas aizsarggāze ar samazinātu ogļskābās gāzes procentuālo sastāvu argonā nodrošina pamatmateriālam atbilstošākas sametinātās šuves materiāla īpašības un ķīmiskā sastāva proporcijas, metinot ar augstiem metināšanas parametriem, kas nodrošina kustošā elektroda strūklveida pārnesei.
- Izstrādāts matemātiskais modelis, ar kura palīdzību iespējams prognozēt izvēlētajā metināšanas parametru un aizsarggāzes procentuālā sastāva ietekmi uz sametinātās šuves īpašībām.
- Konstatēts, ka termiskās ietekmes zonā izveidotais materiāls augsto parametru ietekmē pēc cietības ir vājāks nekā pamatmateriāls vai no jauna izveidotās šuves metāls pretēji iepriekš konstatētajam un definētajam apgalvojumam par šīs zonas paaugstināto cietību mazlēģētu konstrukciju tēraudu metināto savienojumu gadījumos.

### Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti

**Ekspperimentālo pētījumu rezultāti, kas apraksta sametinātās šuves ķīmiskā sastāva un cietības likumsakarības starp metināšanas parametru un aizsarggāzes izvēli.** Veiktajos eksperimentos metināšanas parametri tika izvēlēti no 280 A līdz 320 A, aizsarggāzes sastāvs – no 8 % līdz 25 % CO<sub>2</sub> (ogļskābās gāzes) maisījumi ar Argonu, kā arī 5 % CO<sub>2</sub> un 5 % O<sub>2</sub> (skābekļa) maisījums ar argonu. Palielinoties CO<sub>2</sub> gāzes procentuālajam saturam, netika novērotas būtiskas leģēto elementu izmaiņas, kā arī cietības mērījumu rezultātos, sametinātajā šuvē mainoties metināšanas parametriem. Samazinoties CO<sub>2</sub> saturam, tika novērota leģējošo materiālu samazināšanās, kā arī uzrādītās metinātās šuves materiāla cietības samazināšanās, palielinoties metināšanas parametriem. Aizsarggāzes, kuru sastāvā bija 5 % CO<sub>2</sub> un O<sub>2</sub>, maisījuma rezultātā leģējošo elementu procentuālais sastāvs sametinātajā šuvē bija viszemākais neatkarīgi no izvēlētajiem un iestatītajiem metināšanas parametriem. Izmaiņas vai būtiska samazināšanās uzrādītajā cietībā netika novērotas neatkarīgi no izmaiņām metināšanas parametros.

**Izstrādātais sametinātās šuves cietības prognozēšanas modelis atkarībā no metināšanas aizsarggāzes un metināšanas parametru mijiedarbības.** Izmantotās aizsarggāzes mijiedarbība ar izvēlētajiem metināšanas parametriem strūklveida pārnesei apstākļos būtiski ietekmē metinātās šuves materiāla cietību. Ar izstrādātajā modeļa palīdzību turpmāk ir iespējams prognozēt cietības parametru izmaiņas (tās noturību vai samazināšanos) atkarībā no izvēlētajās aizsarggāzes un metināšanas parametriem.



## Praktiskā nozīmība

Promocijas darbā iegūtie rezultāti var kalpot uzņēmumiem, kas nodarbojas ar metālapstrādi un dažādu metāla konstrukciju izgatavošanu. Paaugstinātas izturības tērauds ir viens no materiāliem, no kura izgatavošanas uzņēmumi mēdz izvairīties, nezinot tā īpatnības un iespējas to apstrādāt. Šādi materiāli arvien biežāk tiek izmantoti konstrukciju svāra samazināšanai, turpretim izmaiņas tehnoloģijā, kas atšķiras no nelegēta tērauda apstrādes, liek atteikties no pasūtījumu izpildes, kas nepareizas ražošanas rezultātā var nest zaudējumus.

Attīstot un metālapstrādes industrijas uzņēmumiem prezentējot iegūtos rezultātus, kā arī tos konsultējot par paaugstinātas izturības tēraudu metināšanas iespējām, tie iegūtu priekšrocības šādu materiālu apstrādē. Tas arī dotu iespēju samazināt pielautās kļūdas un izslēgtu neatbilstošu tehnoloģiju izmantošanu jau projektu sākumā. Izstrādātais prognozēšanas modelis izmantots SIA “Green Power” produkcijas izgatavošanā no paaugstinātas izturības tērauda (650 MPa), kur nepieciešams būtiski samazināt konstrukcijas svaru, nezaudējot tās izturību. To apliecina uzņēmuma valdes priekšsēdētāja M. Grantiņa vēstule.

Papildus tam, sadarbojoties ar SIA “Speciāls Elektrods”, kas ir viens no vadošajiem MAG metināšanas aprīkojuma *Fronius*<sup>®</sup> izplatītājiem Latvijā, ir izanalizēts pētījums un uz tā pamata izvērtēti un piedāvāti risinājumi metālapstrādes uzņēmumiem augstas izturības tēraudu metināšanā.

## Darba aprobācija

Publikācijas žurnālos, citējamās starptautiskās datubāzēs.

1. I. Boiko, D. Avisans “Study on Shielding Gases for MAG Welding”, Journal “Materials Physics and Mechanics”, Vol. 16, No 2 (2013), pp. 126–134, ISSN 1605-8119, datubāze: SCOPUS, Chemical Abstracts and Elsevier Bibliographic Databases.

Publikācijas pilna teksta konferenču rakstu krājumos.

1. D. Avišāns, I. Boiko “Защитные газы для MAG сварки: вопросы экономической эффективности”, Proceedings of 7th International Symposium “Surface Engineering. New Powder Composition Materials. Welding”, 2nd Part, 23–25 March 2011, Minsk, Belarus, p. 226–232.
2. I. Boyko, V. Kulakova, D. Avisans “New approach for modeling of the welding processes”, Proceedings of 15th International Research/Expert Conference” Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2011, Prague, Czech Republic, 12–18 September 2011, Year 15, No 1, pp. 809–812.
3. Avišāns, D., Boiko, I. “Review on Shielding Gases for Mag Welding of Mild Steel”. No: 12th International Symposium “Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding”: Proceedings, Baltkrievija, Minsk, 7.–9. aprīlis, 2021. Minsk: Belarusskaya Navuka, 314.–324. lpp. ISBN 978-985-08-2709-8.
4. D. Avišāns, I. Boiko, A. Avišāne “Influence of 8% Co<sub>2</sub> and Argon Shielding Gas Mixture on Mag Welding of High Strength Steel (650 Mpa) in Spray Arc”, Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development 2022”, Jelgava, Latvija, 25.–27.05.2022, p. 936–942.

Konferenču tēzes

1. D. Avišāns, I. Boiko “Aizsarggāzes MAG metināšanā”, 50. RTU studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli, 2009. g. aprīlī, Latvija, Rīga. – Rīgā: RTU Izdevniecība, 2009. g., 15. lpp.
2. D. Avisans, I. Boiko “Study of the Shielding Gas Influence on Costs of the Welding Joint”, Book of abstracts of the 20th International Baltic Conference “Materials Engineering 2011”, 27–28 October 2011, Kaunas, LITHUANIA, ISSN 2029-8307, p. 56.

Dalība starptautiskās konferencēs

1. I. Boyko, V. Kulakova, D. Avisans “New approach for modeling of the welding processes”, 15th International Research/Expert Conference” Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2011, Prague, Czech Republic, 12–18 September 2011.
2. D. Avišāns, I. Boiko “Защитные газы для MAG сварки: вопросы экономической эффективности”, 7th International Symposium “Surface Engineering. New Powder Composition Materials. Welding”, 23–25 March 2011, Minsk, Belarus.
3. D. Avisans, I. Boiko “Study of the Shielding Gas Influence on Costs of the Welding Joint”, 20th International Baltic Conference “Materials Engineering 2011”, 27–28 October 2011, Kaunas, Lithuania.
4. D. Avisans “Shielding gases in mag welding: economical issues”, 8th International Conference MET-2013 Materials, Environment, Technology, June 19–20, 2013, Riga, Latvia.

#### RTU starptautiskās konferences

1. D. Avišāns, I. Boiko “Metināšanas ar kūstošu elektrodu aizsarggāzu vidē galvenie raksturojumi”, 51. RTU starptautiskā zinātniski tehniskā konference, 2010. gada 11.–15. oktobris, Rīga, Latvija.
2. D. Avišāns, I. Boiko “Metināšanas ar kūstošu elektrodu aizsarggāzu vidē galvenie raksturojumi”, 52. RTU starptautiskā zinātniski tehniskā konference, 2011. gada 13.–16. oktobris, Rīga, Latvija.
3. D. Avisans, I. Boiko “Study of the Shielding Gas Influence on Welding Joint Appearance”, Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni, 11–12 October 2012, Rīga, Latvija.
4. D. Avišāns “Research of Welding by Melting Electrodes in Protective Gas Environment”, 54. RTU starptautiskā zinātniski tehniskā konference, 2013 gada 14.–16. oktobris, Rīga, Latvija.

## PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN TERMINI

A – strāvas stiprums ampēros;

V – spriegums, kas mērīts volts;

m/min – kūstošā elektroda stieples padeves ātrums;

CO<sub>2</sub> – ogļskābā gāze;

O<sub>2</sub> – skābeklis;

Ar – argons;

Mn – mangāns;

Ni – niķelis;

aizsarggāze – gāzu maisījums, kura sastāvā ir argons, ogļskābā gāze, kā arī skābeklis, kas nodrošina metinātās šuves aizsardzību no apkārtējās vides ietekmes metināšanas procesa laikā;

mazleģēts augstas izturības tērauds – tērauds, kura sastāvā legējošo elementu sastāvs nepārsniedz 2,5 % un tā minimālā tecēšanas robeža tiek sasniegta pie 450–750 MPa;

metināšanas vannīte – metināšanas laikā metāla un kūstošā elektroda radītā zona, kur metāls atrodas šķidrā fāzē;

strūklveida pārnese – kūstošā elektroda pārveidošanās veids no cietas vielas fāzes šķidrā pirms nonākšanas saskarē ar izkausēto materiālu;

caurmetinājums – no jauna izveidotās sametinātās šuves izkausētā un pēc tam sacietējušā metāla sakausējuma forma un dziļums pamatmateriālā;

*MAG – Metal Active Gas* – metināšana ar kūstošu elektrodu aktīvās aizsarggāzes vidē;

TIZ – termiskās ietekmes zona, kas atspoguļo elektriskā loka darbības ietekmē neizkusušo pamatmateriāla metāla apgabalu, kas ir bijis pakļauts augstas temperatūras ietekmei un tā rezultātā ir mainījušās tā fizikālās un strukturālās īpašības.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

## 1.1. Aizsarggāzes ietekme uz *MAG* metināšanas procesu

Aizsarggāze *MAG* metināšanas procesa laikā nodrošina vairākas funkcijas. Tās galvenā funkcija ir aizsargāt metināšanas vannīti no apkārtējās atmosfēras ietekmes. Pēc vairāku pētījumu un literatūras apskata ir secināts, ka aizsarggāze papildus veic arī šādas funkcijas:

- 1) atbild par elektriskā loka veidošanos un tā stabilitāti [6, 7, 8, 14, 22, 29, 36, 48];
- 2) atbild par metalurģiskajiem procesiem metināšanas vannītē [5, 6, 29, 31, 38];
- 3) atbild par legējošo materiālu sastāvu sametinātajā šuvē [36, 38, 42, 46, 48];
- 4) atbild par poru un iekļāvumu veidošanos izveidotajā šuvē [5, 30, 42, 48];
- 5) atbild par metinātās šuves formas un sakausējuma veidošanos [29, 36, 46, 55].

Kā viena no galvenajām aizsarggāzēm, pateicoties kurai *MAG* process 20. gadsimta vidū kļuva izplatīts un pieejams CO<sub>2</sub> [1]. Turpretim tā paša gadsimta pēdējā gadu desmitā aktīvi sāka izmantot Ar un CO<sub>2</sub> maisījumus, kā arī Ar un O<sub>2</sub> vai arī visu trīs iepriekš minēto gāzu maisījumus *MAG* metināšanas procesam [14]. Arī pēdējos gados ir veikti un publicēti vairāki pētījumi par argona maisījumu ietekmi uz dažādu materiālu metināšanu aizsarggāzu vidē, secinājumi un rezultāti ir samērā pretrunīgi.

Dažādos pētījumos ir uzsvērts, ka, CO<sub>2</sub> saturam palielinoties, palielinās poru un dažādu iekļāvumu skaits sametinātajā šuvē [30, 36]. Taču ir arī vairākas publikācijas, kurās apgalvots pretējais [5, 29].

## 1.2. Kūstošā elektroda materiāla, pamatmateriāla un metināšanas parametru ietekme uz *MAG* metināšanas procesu

Pēdējo gadu pētījumi atklāj arī būtiskas atšķirības par aizsarggāzes sastāva ietekmi uz mazlēģētu tēraudu ar atšķirīgu tecēšanas robežu metināšanu. Konstrukciju tēraudiem, kuru minimālā tecēšanas robeža ir 235–355 MPa, kā viena no labākajām aizsarggāzēm tiek minēta Ar un CO<sub>2</sub> 25 % maisījums [5, 29]. Savukārt pētījumā par materiālu ar tecēšanas robežu 900–1000 MPa metināšanu kā vislabākais risinājums tiek minēts Ar un mazāku CO<sub>2</sub> saturu aizsarggāzē [38, 42]. Jāmin, ka iepriekš minētie pētījumi ir veikti, izmantojot metināšanu ar monolītu kūstošo stieples elektrodu. Tomēr izmantotie strāvas parametri atšķiras. Piemēram, vairākos pētījumos pirmā tipa materiāliem tiek izmantoti īsā loka parametri, kur kūstošais stieples elektrods metināšanas vannītē tiek izkausēts pilienu veidā [5, 6, 30, 31, 36]. Savukārt pētījumos par 900–1000 MPa materiālu metināšanā šī pāreja notiek strūklveidā pie lielākiem strāvas parametriem [38, 42, 46]. Pētījumā, kurā tiek apskatīta aizsarggāzu ietekme uz mazlēģētu konstrukcijas tēraudu metināšanu, tiek izmantots pulverveida kūstošais stieples elektrods [29]. Tā pārnese metināšanas vannītē tiek nodrošināta strūklveidā, jo, izmantojot šāda tipa kūstošo stieples elektrodu, var būtiski samazināt strāvas parametrus.

Papildus tika pētīti daži avoti, kur tiek izmantota pulverstieple, kas nodrošina pašai aizsargājošu efektu, bet neizmanto aizsarggāzi [43, 44, 45]. Šajos pētījumos apskatīta un aprakstīta legējošo materiālu ietekme uz sametinātās šuves mehāniskajām īpašībām.

### 1.3. Pētnieku veikto eksperimentu apkopojums

Veikto pētījumu apkopojums tika apvienots vienā tabulā – veiktā pētījuma eksperimentos izmantotā tehnoloģija, informācijas avots, kur aprakstīts pētījums, izmantotais metāls, aizsarggāze un metināšanas parametri. Tabulā apkopoti arī eksperimentos iegūtie rezultāti, kas tika pētīts, kādi ir secinājumi.

Analizējot apkopojumu, var secināt, ka ir veikti dažādi pētījumi par aizsarggāzes ietekmi uz tādiem oglekļa tēraudiem kā *S235*, *S275*, *S355*, kas ir standarta konstrukciju tēraudi. Pāris pētījumi, tiesa, bez aizsarggāzes izmantošanas, ir veltīti standarta konstrukciju tēraudu metināto šuvju pastiprināšanai, izmantojot legētu kūstošo elektrodu. Tiek apskatīti arī mazlēģēti tēraudi, kuru tecēšanas robeža sasniedz 850–1000 MPa. Tieši šos pētījumus daudzi autori veic, izmantojot augstus metināšanas parametrus.

Līdz ar to tika secināts, ka konstrukciju tēraudi, kas ir robežās 420–850 MPa, netiek apskatīti, lai arī mūsdienās tieši šie materiāli ražošanā tiek izmantoti arvien biežāk, palīdzot atvieglot konstrukciju svaru, nodrošinot to pietiekamu izturību.

Iepriekš minētie secinājumi paver iespēju jaunam pētījumam par aizsarggāzes ietekmes uz augstas izturības tēraudu (650MPa) ar *MAG* metināšanas tehnoloģiju. Ņemot vērā arī iepriekš pētīto, tika pieņemts lēmums pētījumu veikt, metinot ar augstiem metināšanas parametriem.

1.1. tabula

## Pētītās literatūras apkopojums

Eksperiments	Atsauce	Metāls	Aisargāze	Metināšanas parametri	Mehāniskās īpašības	Ķīmiskais sastāvs	Izstrādātais modelis
MAG + monolītā stieple	Kah [5]	S235	Ar + 2,5 % CO <sub>2</sub> , Ar + 10 % CO <sub>2</sub> , Ar + 18 % CO <sub>2</sub> , Ar + 25 % CO <sub>2</sub>	Īsais loks	Poru skaits/lielums	?	?
MAG + monolītā stieple	Knovel [6]	S235	Ar + 5 % CO <sub>2</sub> + 5 % O <sub>2</sub> , Ar + 20 % CO <sub>2</sub> , 100 % CO <sub>2</sub>	Īsais loks	Trīcienizturība	?	?
MAG + pulverstieple	Gadallah [29]	S235	100 % Ar, 100 % CO <sub>2</sub> , Ar + 5 % CO <sub>2</sub> , Ar + 10 % CO <sub>2</sub> , Ar + 18 % CO <sub>2</sub> , Ar + 20 % CO <sub>2</sub> , Ar + 25 % CO <sub>2</sub>	Pulsējošais loks	Cietības tests tikai atsevišķiem paraugiem	Mikrostruktūra, ķīmiskais sastāvs	?
MAG + monolītā stieple	Moreira [30]	S235	100 % Ar, Ar + 8 % CO <sub>2</sub> , Ar + 15 % CO <sub>2</sub> , Ar + 25 % CO <sub>2</sub>	Īsais loks	Poru skaits/lielums	?	?
MAG + pulverstieple	Çevik [31]	S275	100 % Ar, Ar + 12 % CO <sub>2</sub> + 2 % O <sub>2</sub>	Īsais loks	<i>Tensile strength</i> , šlakatas	Mikrostruktūra	?
MAG + monolītā stieple	Boiko [36]	S235	Ar + 8 % CO <sub>2</sub> , Ar + 18 % CO <sub>2</sub> , Ar + 25 % CO <sub>2</sub> , 100 % CO <sub>2</sub>	Īsais loks	?	Ķīmiskais sastāvs	Ekonomiskā pamatojuma modelis
MAG + monolītā stieple	Gouda [38]	S950	100 % Ar, Ar + 10 % CO <sub>2</sub> , Ar + 15 % CO <sub>2</sub> , Ar + 20 % CO <sub>2</sub> , Ar + 25 % CO <sub>2</sub>	Strūklveida pārnese	Trīcienizturības un cietības tests	Ķīmiskais sastāvs, mikrostruktūra	?
MAG + 3 monolītās stieples	Peng [40]	S890	Ar + 20 % CO <sub>2</sub>	Strūklveida pārnese	Tecēšanas un stiepes robeža, cietības tests	Mikrostruktūra	?
MAG Puls + monolītā stieple	Zhao [41]	S355J2 +N	Ar + 18 % CO <sub>2</sub> , Ar + 13 % CO <sub>2</sub> + 3 % O <sub>2</sub> , Ar + 10 % CO <sub>2</sub> + 3 % O <sub>2</sub> , Ar + 4 % CO <sub>2</sub> + 3 % O <sub>2</sub>	Pulsējošais loks	Caurkausējuma forma un izmērs, cietība	Mikrostruktūra	?
MAG + monolītā stieple	Tongbang [42]	S1000	Ar + 5 % CO <sub>2</sub> + 5 % O <sub>2</sub> , Ar + 10 % CO <sub>2</sub> , Ar + 20 % CO <sub>2</sub> , Ar + 30 % CO <sub>2</sub>	Strūklveida pārnese	Tecēšanas un stiepes robeža, cietības tests, trīcienizturība, poras	Ķīmiskais sastāvs, Mikrostruktūra	?

I. 1. tabulas turpinājums

Ekspieriments	Atsauce	Metāls	Aizsarggāze	Metināšanas parametri	Mehāniskās īpašības	Ķīmiskais sastāvs	Izstrādātais modelis
SMAW + 3 pulverstieple	<i>E. Keehan</i> [43]	S1000	?	Strūklveida pārnese	Tecēšanas un stiepes robeža	Mikrostruktūra	Modelis – struktūras sastāva veidošanās kā Mn un Ni saturs funkcija
SMAW + pulverstieple	<i>M. Lord</i> [44]	S420	?	Strūklveida pārnese	Tecēšanas robeža, triecienizturība	?	?
SMAW + pulverstieple	<i>B. Y. Kang</i> [45]	S355	?	Strūklveida pārnese	Tecēšanas robeža, triecienizturība	?	?
MAG + 2 monolītās stieples (1,6 mm)	R. E. Francis [46]	L485	100 % Ar, Ar + 1 % O <sub>2</sub> , Ar + 2 % O <sub>2</sub> , Ar + 3 % O <sub>2</sub> , Ar + 4 % O <sub>2</sub> , Ar + 5 % O <sub>2</sub> , Ar + 10 % CO <sub>2</sub> , Ar + 14 % CO <sub>2</sub> , Ar + 23 % CO <sub>2</sub> , Ar + 28 % CO <sub>2</sub> , Ar + 52 % CO <sub>2</sub> , Ar + 75 % CO <sub>2</sub> , 100 % CO <sub>2</sub>	Strūklveida pārnese	Caurkausējuma forma un izmērs	Ķīmiskais sastāvs, mikrostruktūra	Diagramma – struktūras sastāva veidošanās kā Mn un O saturs funkcijas



## 2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

### 2.1. Eksperimentālo procesu un paraugu izvēle

Ņemot vērā apskatīto literatūru un tehnoloģisko nodrošinājumu, tika veikti metināšanas eksperimenti, kas pietuvināti reāliem ražošanas apstākļiem. Ņemot vērā literatūras analīzi, lai to veiksmīgi izmantotu, jānodrošina, ka cilvēka faktors nevar ietekmēt metināšanas procesa norisi un metināšanas degļa kustības trajektorijai ir jābūt vienmērīgai un kontrolētai, kā arī pilnvērtīgi jānodrošina apkārtējās vides apstākļi, kas ietekmē metināšanas procesu.

#### Eksperimentālais paraugs

Pētījumu eksperimentiem tika izvēlēts *STRENX®650* markas 10 mm biezs materiāls, kura ķīmiskais sastāvs norādīts 2.1. tabulā un kas tika sagriezts vienādos 100 x 200 mm lielos paraugos. Tie tika salikti kopā, izveidojot T veida savienojumu. Tad ar divām punktveida metinātām šuvēm pretējā pusē no metināšanas eksperimentam paredzētās šuves tika izveidots stingrs savienojums turpmākajai eksperimentu norisei. Nevienam no metināšanas paraugiem netika veikta papildu sagatavošana (slīpētas vai frēzētas malas metināšanas pusē).

#### Eksperimentu apstākļi un aprīkojums

Lai nodrošinātu vienmērīgu metināšanas degļa kustību un stabilu metināšanas procesu, tika izmantots uzņēmuma *FRONIUS® TPS500i* metināšanas aprīkojums (2.1. att.) un metināšanas traktors *Fronius® FlexTrack 45 Pro* (2.2. att.).



2.1. att. Metināšanas iekārta *Fronius®MIG500i* [49].



2.2. att. Metināšanas traktors *Fronius® FlexTrack 45 Pro*.

Metināšanas stieples elektrods tika izmantots atbilstoši pamatmateriāla īpašībām ar lielāku mangāna (Mn) saturu. Metināšanas stieples ķīmiskais sastāvs norādīts 2.1. tabulā. Elektroda diametrs tika izvēlēts 1,2 mm, kas nodrošina lielāku kūstošā elektroda pārneši. Tas dod iespēju palielināt arī metināšanas ātrumu, kas metināšanas procesā palīdz samazināt siltuma atdevi.

2.1. tabula

Pamatmateriāla un kūstošā stieples elektroda ķīmiskais sastāvs.

	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	Ti	V	Avots
<b>Pamat-</b> <b>materiāls</b>	0,058	0,157	1,56	0,0162	0,0451	<0,0030	0,0251	0,0191	0,042	0,102	0,02	Eksp. mēr.
<b>Stieples</b> <b>elektrods</b>	0,075	0,63	1,63	0,007	0,28	0,22	1,42	0,006	0,002	0,001	0,09	Raž. sertif.

Metināšanas process tika veikts atbilstoši *EN ISO 6947 PB (Plate Horizontal Vertical)* pozīcijā, un tika nodrošināta metināšanas šuve ar augstumu 5 mm ( $a = 5$ ). 2.3. attēlā redzams metināšanas eksperimentu aprīkojums.



2.3. att. Metināšanas eksperimentu aprīkojums.

Pētījumā tika izmantoti argona maisījumi ar dažādu CO<sub>2</sub> procentuālo sastāvu, kā arī maisījums argons + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>. Šo gāzu sastāvs norādīts 2.2. tabulā un pilnā promocijas darba 4. pielikumā.

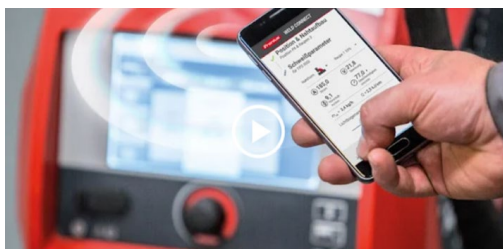
2.2. tabula

Aizsarggāzu maisījumu ķīmiskais sastāvs

Gāze	Argons	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
MISON®25 (M25)	75 %	25 %	–
MISON®18 (M18)	82 %	18 %	–
MISON®8 (M8)	92 %	8 %	–
CORGON®3 (C3)	90 %	5 %	5 %

Aizsarggāzu izvēle tiek pamatota ar to plašo lietojumu metālapstrādes uzņēmumos Latvijā, kā arī citās Eiropas valstīs un ārpus tām. Būtiski gāzu izvēlei ir arī pieļaujamais mitrums tās sastāvā – *max* 10 ppm. Tās plūsma tika nodrošināta 15 l/min, un pirms katra eksperimenta sākšanas visiem paraugiem tika veikta plūsmas kontrole.

Metināšanas parametri pētījumā tika iestatīti, lai sasniegtu strūklveida pārnese loka režīmus: 280 A pie 28 V, 300 A pie 29 V un 320 A pie 30 V. Katram eksperimentu blokam tika attiecīgi iestatīts metināšanas degļa pārvietošanās ātrums: 350 mm/min.; 380 mm/min. un 420 mm/min. Metināšanas parametru matrica izvēlēta, izmantojot speciālu metināšanas modelēšanas programmu *WeldConnect*® (2.4. att.).



2.4. att. *WeldConnect*® lietojumprogramma [50].

Loka stabilitāte tika pārbaudīta pēc metināšanas parametru iestatīšanas pirms katra eksperimentu bloka (pie 280 A/28 V, 300 A/29 V un 320 A/30 V). Metināšanas stieples elektroda izvirzījums no metināšanas uzgaļa tika iestatīts 19 mm pirms katra metināšanas eksperimenta veikšanas.

### Eksperimentu apstākļi

Metināšanai ar kustošo elektrodu aizsarggāzu vidē ir svarīgi nodrošināt noslēgtu telpu, kurā nav iespējams caurvējš. Tas var negatīvi ietekmēt metināšanas procesu, radīt poras sametinātajā šuvē. Telpas temperatūra tika nodrošināta nemainīga 20 °C, nodrošinot arī vienmērīgu materiāla paraugu nemainīgu temperatūru. Visi metināšanai paredzētie paraugi pirms eksperimentu veikšanas tika uzglabāti telpā vairākas dienas.

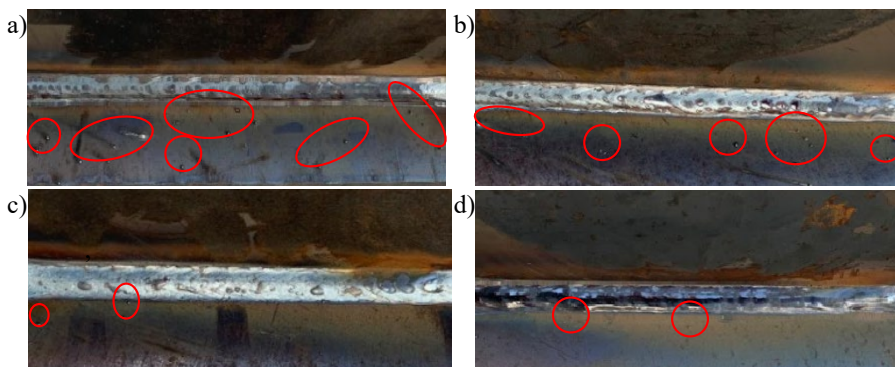
Metināšanas laikā izdalās dažādi metināšanas aerosoli, kas var ietekmēt gan metinātājus, gan metināšanas procesu uzraugošo personālu. Šim nolūkam tika izmantota gaisa recirkulācijas un attīrīšanas iekārta.

## 2.2. Sametinātās šuves izpēte

Pēc eksperimentu veikšanas visi sametinātie paraugi tika fotografēti, sazāģēti ar lentzāģi 10 mm biezos paraugos. Tad tika nogrieztas malas no visām pusēm, lai sagatavotu nelielus paraugus, kuros ir iespējams redzēt tikai sametinātās šuves šķērsriezumu un ko var iepresēt veidnēs un sagatavot slīpēšanai un pulēšanai [51, 52]. Pēc paraugu slīpēšanas un pulēšanas tie tika kodināti ar 9 % slāpekļskābes šķīdumu, kas deva iespēju saskatīt sametinātā savienojuma sakusuma formu jeb caurkausējumu.

### Metināšanas šļakatu veidošanās

Pēc fotogrāfiju iegūšanas bija iespējams veikt sametinātās šuves vizuālo novērtējumu. Kā viens no svarīgiem vizuālajiem novērtējumiem ir kūstošā elektroda radīto šļakatu daudzums uz pamatmateriāla (2.5. att.).

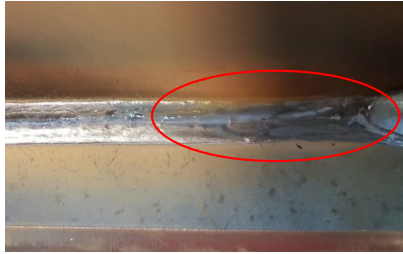


2.5. att. Šļakatu daudzums uz paraugu pamatmateriāla pie 300 A parametriem ar dažādām aizsarggāzēm: a) *M25*; b) *M18*; c) *M8*; d) *C3*.

Uz paraugiem, kas metināti ar aizsarggāzēm *M25* un *M18*, pie visiem metināšanas parametriem šļakatas parādījās vairāk. Saskaņā ar iepriekšējiem pētījumiem [36, 47] CO<sub>2</sub> gāze nodrošina un uztur īssavienojuma veidošanos metināšanas procesa laikā. Palielinot tā saturu argona maisījumā, palielinās šļakatu veidošanās iespēja. No tā var secināt, ka pat pie augstiem metināšanas parametriem CO<sub>2</sub> ietekme ir pietiekami liela un dod iespēju atsevišķos momentos radīt īssavienojumus strūklveida pārnesei laikā. Tas izraisa šļakatu veidošanos pēc metināšanas ar šīm divām aizsarggāzēm.

Šļakatas minimāli radās vai pat tās vispār netika novērotas, eksperimentos izmantojot aizsarggāzes *M8* un *C3*, visos izmēģinājumu režīmos.

Interesantu parādību bija iespējams novērot uz metināšanas šuves, kas tika metināta, izmantojot maisījumu *C3* (2.6. att.).



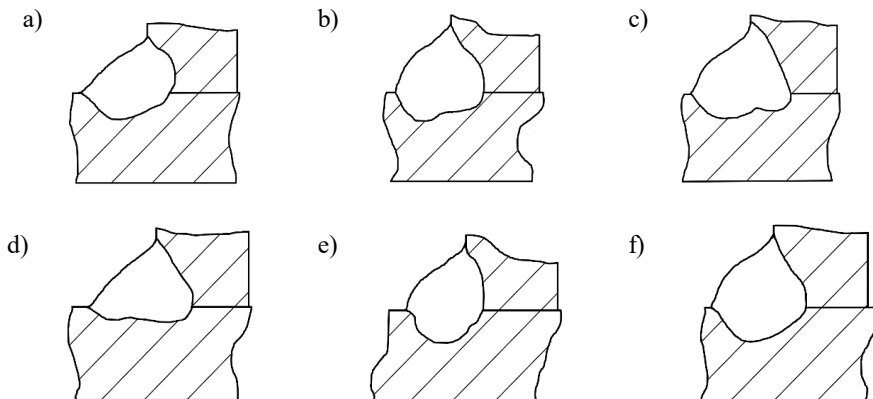
2.6. att. SiO<sub>2</sub> parādība uz sametinātās šuves.

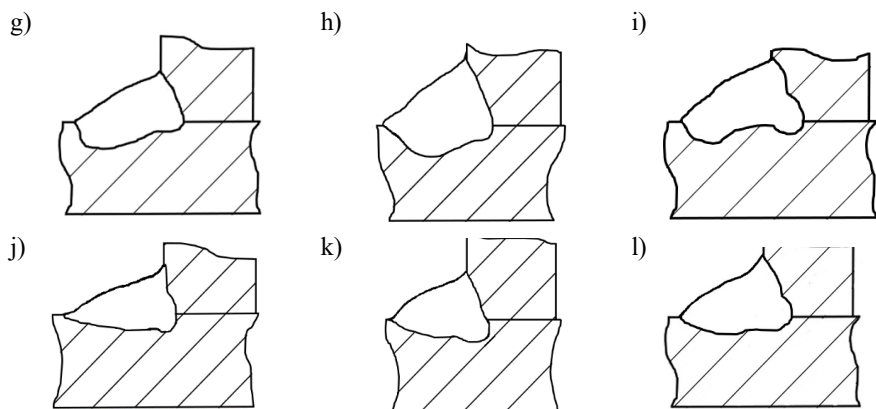
Plāns un caurspīdīgs slānis klāja metināšanas savienojumu visā tā garumā. Var secināt, ka tas ir SiO<sub>2</sub> (silīcija oksīda vai stikla) slānis. Silīcijs, kas tika izdedzināts no metināšanas vannītes metināšanas procesa laikā, augstās temperatūras ietekmē veidoja ķīmisku reakciju ar O<sub>2</sub>, kas atrodas aizsarggāzē, izveidojot plānu stikla slāni uz sametinātās šuves.

### Sametinātās šuves forma un caurkausējums

Pēc visu paraugu iepriekšējas sagatavošanas, slīpēšanas, pulēšanas un apstrādes ar slāpekļskābes šķidrumu kļuva iespējams novērtēt sametinātās šuves formu, noteikt tās izmērus, kā arī izpētīt iegūto caurkausējumu.

Gluda šuves forma ar nelielu pastiprinājumu, kā arī stabila caurkausējuma forma tika iegūta, izmantojot maisījumus *M25* un *M18* (2.7. a); b); c); d); e); f) att.). Palielinoties metināšanas parametriem, ir novērojama pastiprinājuma veidošanās šuves apakšējā zonā. To veicinājusi augstāka temperatūra metināšanas procesa laikā pie lielākas stieples padeves, kas veicinājis metināšanas vannītes notecēšanu. Laba caurkausējuma un metināšanas šuvju formas kombinācija tika panākta ar paraugiem, kas metināti ar *M8* aizsarggāzi pie 280 A un 300 A parametriem (2.7. g); h) att.). Lai arī pie 280 A režīma novērojama metināšanas vannītes neliela notecēšana, tomēr pastiprinājums ir izveidojies vienmērīgs pa šuves vidu visā tās garumā. Caurkausējuma forma kļuva nevienmērīga, palielinot metināšanas parametrus līdz 320 A, izmantojot to pašu *M8* aizsarggāzi 2.7. i att.. Pie šo pašu parametru un aizsarggāzes kombinācijas bija izteikti iespējams novērot tā sauktā “Argona pirksta” veidošanos šuvē.





2.7. att. Metināto paraugu šuves un caurkausējuma forma:  
 M25 – a) 280 A; b) 300 A; c) 320 A; M18 – d); e); f); M8 – g); h); i); C3 – j); k);  
 l).

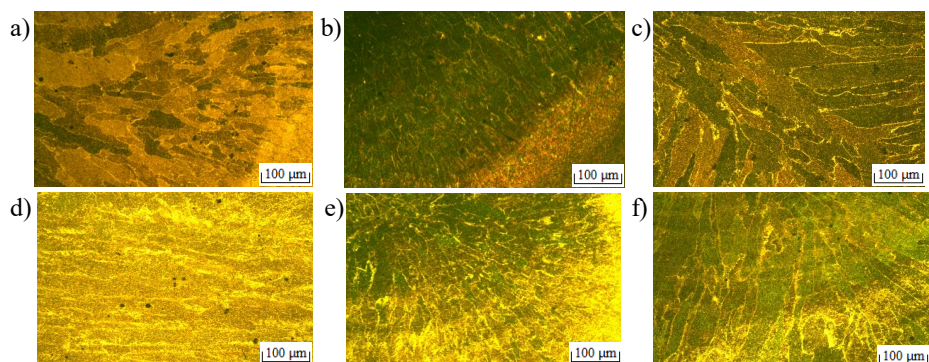
Nevienmērīgs caurkausējums, šuves notecēšana un pastiprinājuma noslīdēšana tika novērota visiem paraugiem, kas tika metināti ar C3 maisījumu (2.7. j); k); l) att.). Tas izskaidrojams ar augstāku metināšanas vannītes temperatūru, kuras rezultātā tika izkausēts pamatmateriāls ne tikai tur, kur bija vērsts kūstošais stieples elektrods, bet arī uz horizontālās pamatnes plāksnes virzienā prom no stūra. Šī iemesla dēļ 280 A parauga sānu plāksne gandrīz nebija izkausēta.

### 2.3. Sametinātās šuves mikrostruktūras izpēte

Visu metināto paraugu mikrostruktūra tika fiksēta ar optisko mikroskopu *Axiovert 40 MAT*. Viens no defektiem, ko iespējams noteikt ar 50 reižu lielu palielinājumu, ir ieslēgumi vai poras, kas izveidojušās sametinātajā šuvē. Ar 200 reižu lielu palielinājumu ir iespējams smalkāk izpētīt no jauna izveidotās sametinātās šuves mikrostruktūras uzbūvi.

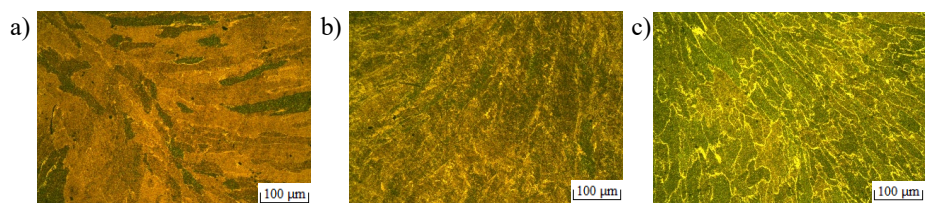
## Poras un ieslēgumi

Kā redzams 2.8. attēlā, vairāk poru un ieslēgumu tika fiksēts sametinātajos paraugos, kas tika metināti ar *M25* un *C3* aizsarggāzēm.



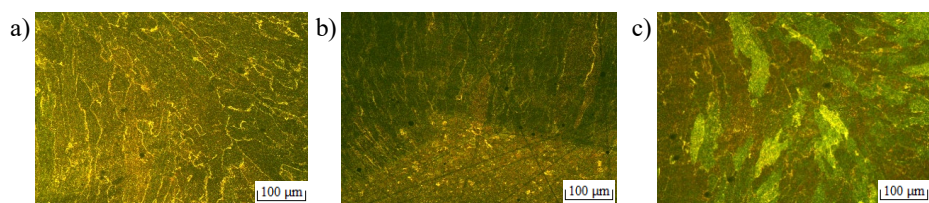
2.8. att. Sametināto paraugu ar *M25* un *C3* aizsarggāzēm šuvju mikrostruktūra (50 x): a) *M25* – 280 A; b) *M25* – 300 A; c) *M25* – 320 A; d) *C3* – 280 A; e) *C3* – 300 A; f) *C3* – 320 A.

Mazāka izmēra un skaita poru un ieslēgumu tika novēroti paraugu šuvēs, kas sametinātas ar *M18* aizsarggāzi (2.9. att.).



2.9. att. Sametināto paraugu ar *M18* aizsarggāzi šuvju mikrostruktūra (50 x): a) *M18* – 280 A; b) *M18* – 300 A; c) *M18* – 320 A.

Mazāks skaits poru un ieslēgumu tika novērots sametinātajos paraugos ar *M8* aizsarggāzi. Tomēr to izmērs bija mazliet lielāks nekā visiem iepriekš minētajiem paraugiem (2.10. att.).



2.10. att. Sametināto paraugu ar *M8* aizsarggāzi šuvju mikrostruktūra (50 x): a) *M8* – 280 A; b) *M8* – 300 A; c) *M8* – 320 A.

Ieslēgumu un poru veidošanos paraugos, kas metināti ar aizsarggāzi, kur ir lielāks  $\text{CO}_2$  saturs (*M18* un *M25*), kā arī ar aizsarggāzi, kuras sastāvā ir  $\text{O}_2$  (*C3*), var izskaidrot tieši ar paaugstinātu  $\text{O}_2$  ietekmi uz metināšanas procesu. Tas palielinātā apjomā pastāvīgi nonāk tieši šķidrā metālā šuves vannītē, kas palielināta metināšanas ātruma rezultātā ātri sacietē. Tā rezultātā  $\text{O}_2$ , kas aktīvi reaģē ar dažādiem legējošiem

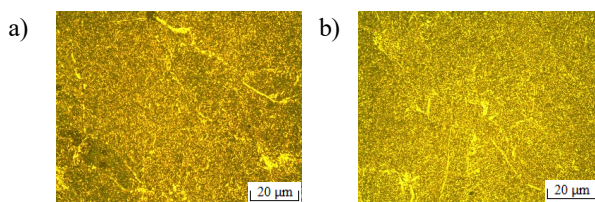
materiāliem, vienlaikus radot oksīdus un arī izdaloties gāzveida formā, nespēj nonākt šuves virspusē. Šo parādību apraksta M. Gouda pētījumā par 950 MPa izturības tēraudu metināšanu, kur arī tiek norādīts uz palielinātu O<sub>2</sub> saturu aizsarggāzē [38].

### Mikrostrukturā uzbūve

Vairākos augstas izturības tēraudu (950–1000 MPa) metināšanas pētījumos liela vērība tiek pievērsta sametinātās šuves mikrostrukturā uzbūvei [38, 40, 42, 43]. Tiek apskatīts un vērtēts to graudu lielums, kā arī to izkārtojums.

Optiskā mikroskopa uzņemtajos attēlos (ar 200x lielu palielinājumu) ir iespējams saskatīt izveidotās šuves struktūras graudu lielumu, formu un izvietojumu. Metāla struktūras graudu lielums var ietekmēt metāla stiprību un dažāda veida defektu veidošanos [59].

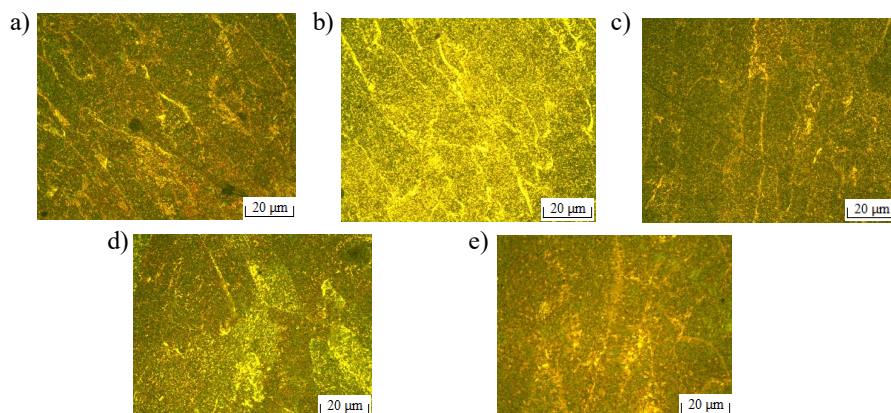
Pēc veiktajiem eksperimentiem var secināt, ka smalkāku ferīta un perlīta graudu struktūra veidojas paraugos *M25 320 A* un *M8 280 A* (2.11. att.). Struktūrā, ko veido *M25 320 A* var novērot arī vairākas plataķu un garāku ferīta graudu formējumus [62].



2.11. att. Materiāla mikrostrukturā (200 x): a) *M25 320 A*; b) *M8 280 A*.

Paraugu *M8 280 A* mikrostrukturā šie graudu formējumi veidojas daudz tievāki un īsāki, līdz ar ko struktūra veidojas vienmērīgāka [62].

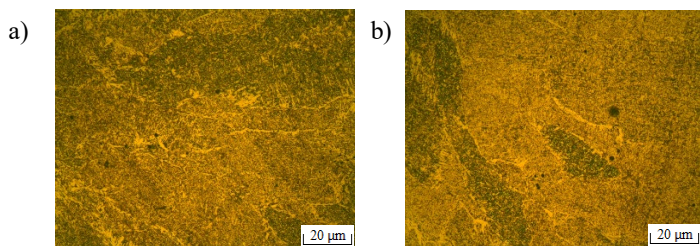
Vairākiem sametinātajiem paraugiem, piemēram, *M25 300 A*, *M18 320 A*, *M8 300 A*, *M8 320 A*, kā arī *C3 320 A*, sametinātā savienojuma struktūrā var novērot nevienmērīgu martensīta un ferīta-perlīta ieplaku veidošanos ar ferīta graudu. Kā var redzēt 2.12. attēlā, šāda struktūra veidojas pie lielākiem metināšanas režīmiem, kas var būt izskaidrojams ar straujāku paraugu atdzišanu un metalurģisko procesu norisināšanos šuvē [63].



2.12. att. Materiāla mikrostrukturā (200 x): a) *M25 300 A*; b) *M18 320 A*; c) *M8 300 A*; d) *M8 320 A*; e) *C3 320 A*.

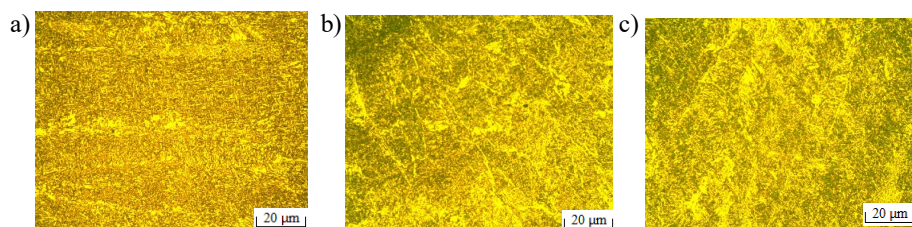


Savstarpēji līdzīgas struktūras ir izveidojušās paraugos *M25 280 A* un *M18 280 A* (2.13. att.). Mikrostruktūras graudu izmērs ir neliels, martensīta ieplakas ir sargrupētas nevienmērīgā attālumā viena no otras. Šīs ieplakas norobežo ferītu iegarenas robežas [62].



2.13. att. Materiāla mikrostruktūra (200 x): a) *M25 280A*; b) *M18 280 A*.

Sametināto paraugu *C3 280 A*, *C3 300 A* un *M18 300 A* mikrostruktūrā graudi veido garenas formas un vienmērīgus slāņus, kas atdalīti ar iegareniem ferīta graudiem (2.14. att.). Visas šīs struktūras ir vienmērīgas, tomēr noslāņošanās iegarenā graudu forma var negatīvi ietekmēt šuves metāla stiprības īpašības [60].



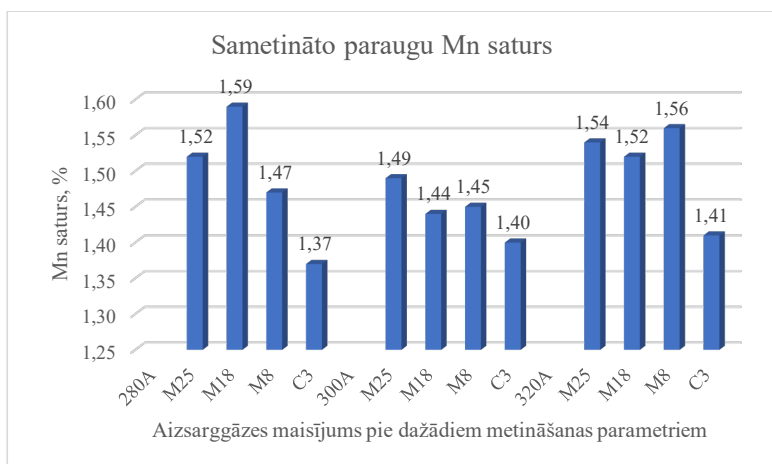
2.14. att. Materiāla mikrostruktūra (200 x): a) *C3 280 A*; b) *C3 320 A* c) *M18 320 A*.

Kā redzams 2.14. attēlā, paraugu mikrostruktūrā vairāk veidojas ferīta graudi. Saskaņā ar literatūras avotiem [61, 62], tas var padarīt metināšanas savienojumu trauslāku un ietekmēt starpkristālu vai lamināro plaisu veidošanos.

#### 2.4. Sametinātās šuves ķīmiskais sastāvs

Izmantojot optisko emisijas spektrometru *PMI-MASTER Pro2*, tika veikta visu metināto šuvju ķīmiskā sastāva izpēte. Aizsarggāze var ietekmēt leģējošo elementu daudzumu, kas var tikt izdedzināti no metināšanas šuves, kā tas tika konstatēts iepriekšējos pētījumos [36].

Kā viens no svarīgākajiem leģējošajiem elementiem, kas nodrošina metinātā savienojumu augstās stiprības īpašības, ir mangāns (Mn) [54]. Tā procentuālās izmaiņas sametinātās šuves ķīmiskajā sastāvā atkarībā no aizsarggāzes un metināšanas parametru ietekmes tika noteiktas pēc mērījumu veikšanas ar optisko emisijas spektrometru. 2.15. attēla grafikā redzamas Mn satura izmaiņas metināšanas savienojumā ar katru gāzi pie visiem trim metināšanas parametriem.



2.15. att. Mn satura diagramma sametinātajās šuvēs.

Metināšanas stieples kustošā elektroda ķīmiskais sastāvs tika noteikts, izmantojot ražotāja sertifikātu. Pamatmateriāla ķīmiskais sastāvs tika pārbaudīts, izmantojot optisko emisijas spektrometru. Iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar noteiktā sametinātās šuves ķīmiskā sastāva, kas iegūts ar optisko emisijas spektrometru, rezultātiem.

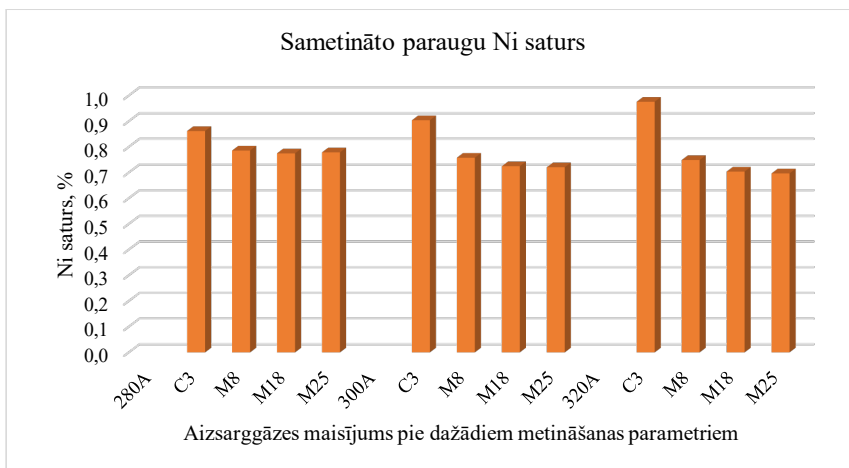
Kā apskatīts un konstatēts iepriekšējos pētījumos, vairāk leģējošo elementu tika izdedzināts no metinātajām šuvēm, kas metinātas, izmantojot aizsarggāzu maisījumu C3 un īsā loka parametriem [14, 36]. Arī šajā pētījumā tika novērots līdzīgs rezultāts. Mn saturs samazinās par vairāk nekā 16 % pret stieples elektrodu un vairāk nekā 12 % pret pamatmateriālu.

Labāks un stabilāks rezultāts, kur Mn procentuālais līmenis būtiski nesamazinājās, tika novērots metinātajās šuvēs, kas izgatavotas ar aizsarggāzu maisījumu M25. Ar šo maisījumu tika novērots samazinājums par 6–9 % pret stiepli un 1–4 % pret pamatmateriālu visos trīs izvēlētajos metināšanas parametros.

Vismazākais samazinājums pret kustošā elektroda stieples materiāla ķīmisko sastāvu (tikai 2 %) un vienmērīgs pieaugums pret pamatmateriāla ķīmisko kompozīciju tika novērots paraugos, kas metināti ar M18 maisījumu pie 280 A. Pie 300 A parametriem šis maisījums uzrādīja lielāku Mn satura kritumu (12 % pret stiepli; 8 % pret pamatmateriālu).

Parametriem palielinoties līdz 320 A, šajā pētījumā vislabāko rezultātu uzrādīja aizsarggāzes M8 maisījums. Mangāna saturs šajos metinātajos savienojumos samazinājās tikai par 2 % pret stieples materiālu un palika nemainīgs pret pamatmateriālu. Pie zemākiem parametriem šis maisījums uzrādīja mazāku Mn saturu metināšanas savienojumā (10–11 % pret stiepli; 6–7 % pret pamatmateriālu).

Kā norādīts vairākos pētījumos, arī Ni saturs augstas izturības tēraudos ietekmē tā mehāniskās īpašības [42, 43, 44, 45]. Arī izmantotās kustošā elektroda stieples pamatmateriālā ir novērojams augstāks Ni saturs pret pamatmateriālu. Līdz ar to tika veikti arī šī leģējošā elementa satura mērījumi atkarībā no izmantotās aizsarggāzes un metināšanas parametriem (2.16. att.).



2.16. att. Ni satura diagramma sametinātajās šuvēs.

Atšķirībā no Mn, kura procentuālais saturs, piedaloties O<sub>2</sub> aizsarggāzē, sametinātajā šuvē būtiski samazinājās, Ni saturs bija vislielākais visos sametinātajos paraugos. Būtiski ir uzsvērt novēroto parādību, ka Ni saturs pieauga, palielinoties metināšanas parametriem (par 14 % starp 280 A un 320 A).

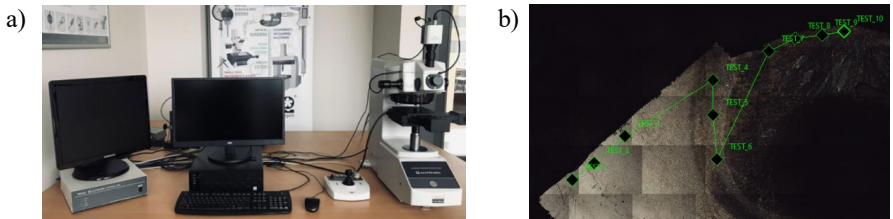
Pretējos paraugos, kas metināti ar C3 maisījumu, Ni saturs ar visām aizsarggāzēm, kuru saturā bija CO<sub>2</sub>, samazinājās. Būtiskāks samazinājums tika novērots maisījumos M18 un M25, kā arī palielinot metināšanas parametrus (līdz pat 10 %). Tas varētu būt izskaidrojams ar paaugstinātu loka temperatūru metināšanas procesā, kas palielina iespēju izdedzināt Ni kā leģējošo materiālu no sametinātās šuves, kā arī iepriekš novērotā un aprakstītā iespējamā īssavienojuma rašanās iespaidā. Maisījumam M8 izmaiņas Ni sastāvā nebija tik būtiskas (4 %).

Nobeigumā var secināt, ka ir parādījusies iespēja apskatīt un izveidot sakarību starp O<sub>2</sub> un metināšanas parametru ietekmi uz Ni saturu sametinātajā šuvē atkarībā no metināšanas parametru izmaiņām.

### 2.5. Sametinātās šuves materiāla cietība

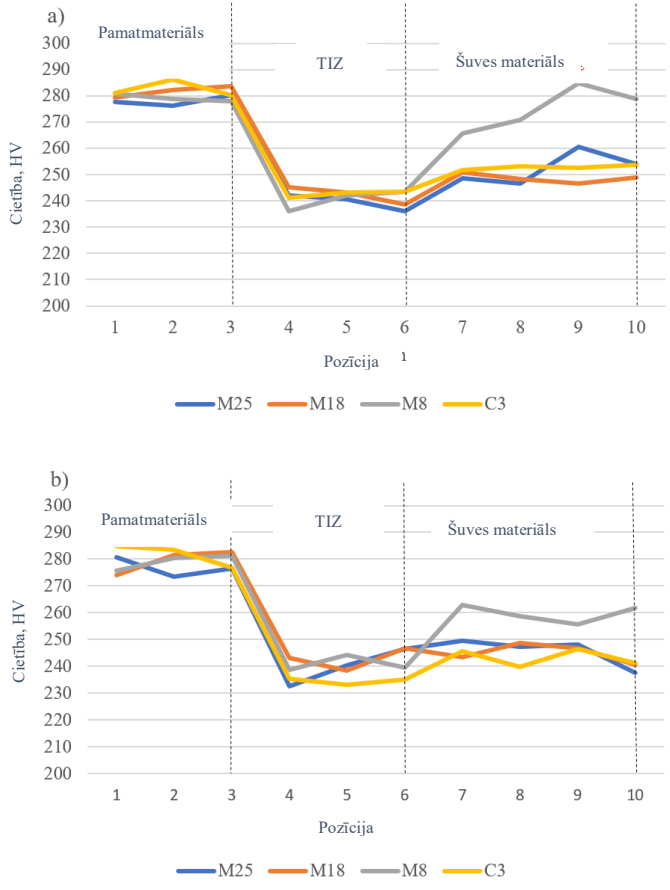
Viena no svarīgākajām īpašībām, kas raksturo augstas izturības tēraudu, ir tā cietība. Neskatoties uz to, ka metināšanas laikā šuvē notiek metalurģiski procesi, sametinātai šuvei ir jābūt pietiekami izturīgai un materiāla cietībai nevajadzētu atšķirties no pamatmateriāla cietības.

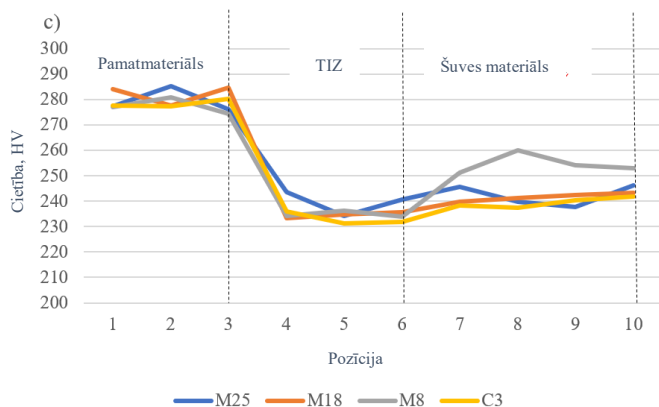
Izmantojot *Mitutoyo Micro Vickers* cietības testeru *HM-210D*, tika noteikta sametināto paraugu šuves metāla cietība (2.17. a) att.).



2.17. att. Paraugu cietības mērīšanas aprīkojums un metodika: a) *Mitutoyo Micro Vickers* cietības testeris *HM-210D*; b) sametinātās šuves cietības mērīšanas tehnoloģija.

Nokļājot gan pamatmateriālu, gan TIZ (termiskās ietekmes zonu), gan metināšanas šuvi (2.17. b) att.), katrā paraugā tika izveidoti 10 dūrieni – trīs pamatmateriālā, trīs TIZ, četri sametinātās šuves materiālā. 2.18. attēla diagrammās redzamas sametinātās šuves materiāla cietības izmaiņas atkarībā no izmantotās aizsarggāzes un izmantotajiem metināšanas parametriem.





2.18. att. Sametinātās šuves cietības mērījumu rezultāti pie dažādiem metināšanas parametriem: a) 280 A; b) 300 A; c) 320 A.

Katra parametru kopa tika atveidota atsevišķā grafikā, kas parāda pārbaudīto paraugu cietību. No šiem grafikiem izriet, ka cietība TIZ ir gandrīz vienāda katram metinātajam paraugam. Atšķirība ir redzama tikai sametinātās šuves materiālā.

Augstāki cietības rādītāji sametinātās šuves materiālā ir novērojami paraugos, kas metināti ar *M8* aizsarggāzi. Paraugos, kas metināti ar pārējiem Ar + CO<sub>2</sub> maisījumiem (*M18* un *M25*), vērojamas mazākas cietības vērtības sametinātajā šuvē. Līdzīgus rezultātus, kur šīs cietības vērtības nav tik augstas, var novērot arī paraugos, kas metināti ar *C3* maisījumu. Tieši ar šo maisījumu var novērot līdzīgas vērtības pie visiem trim izmantotajiem parametriem.

Tikai vienam paraugam sametinātās šuves materiāla cietības vērtības tika sasniegtas līdzīgas pamatmetāla cietības vērtībām. Šis paraugs tika metināts ar *M8* aizsarggāzi pie 280 A parametriem. Cietība, tiesa ar mazāku vērtību, tuva pamatmetālam, tika sasniegta arī režīmā pie 300 A. Parametriem pieaugot, sametinātās šuves paraugu, kas metināti *M8* aizsarggāzes vidē, cietība nesasniedza tādas pašas vērtības kā pamatmateriāls, tomēr to līmenis joprojām bija augstāks, nekā tika sasniegts ar citām aizsarggāzēm pie 320 A režīma.

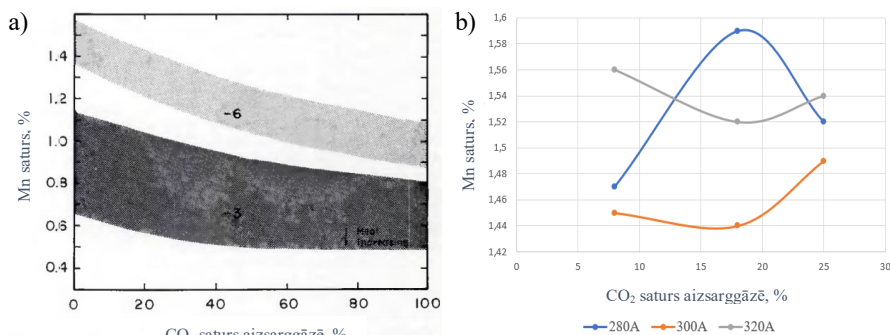
Visiem paraugiem, kas metināti ar gāzu maisījumiem *M18* un *M25*, sametināto šuvju TIZ bija nedaudz platāka nekā paraugiem, kur izmantotas pārējās divas aizsarggāzes. Tā bija aptuveni par 1–1,5 mm platāka, salīdzinot ar citiem paraugiem. Šo parādību var izskaidrot ar to, ka lielāks CO<sub>2</sub> procentuālais sastāvs aizsarggāzē palielina īssavienojuma rašanās iespēju, kas paplašina uzkarstētā, bet neizkausētā materiāla zonu.

### 3. SAMETINĀTĀS ŠUVES MATERIĀLA LEĢĒJOŠO ELEMENTU UN CIETĪBAS PROGNOZĒŠANAS IZSTRĀDĀTAIS MODELIS

Lai veiktu datu apkopojumu un lai atrastu sakarību starp iegūto rezultātu un prognozējamo leģējošo materiālu saturu sametinātajā šuvē un tās cietību, tika apkopoti iegūtie pētījumu rezultāti, attēlojot tos dažādos grafikos (2.15., 2.16. un 2.18. att.). Izmantojot datorprogrammu *Microsoft Excel*, tika izstrādāts datu prognozēšanas matemātiskais modelis (3.1. att.), kā arī tas tika pārbaudīts. Papildu pārbaude un modeļa salīdzinājums tika veikts ar datorprogrammas *SPSS®Statistics* palīdzību. Iegūtie rezultāti apkopoti 3.2. tabulā.

#### 3.1. Aizsarggāzes un metināšanas parametru sakarības ar leģējošo elementu Mn un Ni procentuālā sastāva izmaiņu prognozēšanas modelis

Pēc literatūras analīzes veikšanas tika secināts, ka iepriekšējos pētījumos ir pievērsta uzmanība Mn satura izmaiņām sametinātajā šuvē [36, 38, 42, 46]. R. E. Francis savā darbā arī ir izveidojis diagrammu, kurā atspoguļota Mn atkarība no skābekļa molekulu satura aizsarggāzē [46]. Ņemot vērā šī pētījuma rezultātus (3.1. a) att.), var secināt, ka iegūtie rezultāti šajā pētījumā precīzi nesakrīt ar iepriekš izstrādātās diagrammas izmaiņām pie 280 A un 300 A parametriem, turpretim sakrīt ar 320 A parametriem (3.1. b att.). Līdz ar to var secināt, ka Mn saturu ietekmē ne tikai CO<sub>2</sub> saturs aizsarggāzē, bet arī metināšanas parametri. Šo abu sakarību vienlaicīga ietekme uz Mn saturu nav pētīta.



3.1. att. Diagramma Mn atkarība no CO<sub>2</sub> sastāva aizsarggāzē: a) pētītais modelis [46]; b) šajā pētījumā iegūtie dati.

No iepriekš minēto pētījumu apskata, tika nolemts neveidot atsevišķu matemātisko modeli, ar kura palīdzību varētu prognozēt Mn un Ni procentuālā sastāva izmaiņas atkarībā no aizsarggāzes sastāva un metināšanas parametru izvēles, jo līdzīgi pētījumi ir veikti arī iepriekš.

#### 3.2. Aizsarggāzes procentuālā sastāva un metināšanas parametru sakarības ar sametinātās šuves materiāla cietības izmaiņu prognozēšanas modeli

Prognozēšanas modeļa izstrādei tika izmantoti promocijas darba eksperimentos iegūtie dati, kas atrodami promocijas darba pilnajā versijā. Novērtējot iegūtās sakarības starp metināšanas strāvas ( $I_w$ ), CO<sub>2</sub> un O<sub>2</sub> procentuālo sastāvu, var secināt, ka tās visciešāk raksturo taisnes vienādojums. Regresijas vienādojums tika veidots, ņemot

vērā novērotās tendences. Modelis joprojām tiek uzskatīts par lineāru, lai arī satur nelineāras sakarības neatkarīgajiem mainīgajiem, jo regresijas koeficienti ir lineāri [65]. Daudzfaktoru regresijas modelis veidots šādi:

$$HV_w = a_{CO_2} \cdot CO_2 + a_{O_2} \cdot O_2 + a_I \cdot I_w + b, \quad (3.1.)$$

Kur:

$HV_w$  – sametinātās šuves metāla cietība;

$a_{CO_2}, a_{O_2}, a_I$  – regresijas koeficienti;

$I_w$  – metināšanas strāva (A);

$O_2$  – skābekļa saturs metināšanas aizsarggāzē (%);

$CO_2$  – oglekļa dioksīda saturs metināšanas aizsarggāzē (%);

$b$  – neatkarīgais koeficients.

Promocijas darbā tika izmantota *Microsoft Excel* datorprogramma, ko ir iespējams aizvietot arī ar citām statistikas programmām, piemēram, *MatLab*, *MiniTab* u. c., lai aprēķinātu regresijas koeficientus –  $a_{CO_2}, a_{O_2}, a_I$ . Datorprogrammā koeficienti aprēķināti pēc mazāko kvadrātu metodes [65]. Iegūtie koeficienti ievietoti 3.1. formulā, iegūstot:

$$HV_w = (-1,02) \cdot CO_2 + (-3,74) \cdot O_2 + (-0,32) \cdot I_w + 364,31. \quad (3.2.)$$

Iegūtajam vienādojumam veikta atbilstības pārbaude. Lai to izdarītu, tika analizēta daudzfaktoru regresijas aprēķināto vērtību atbilstība izmērītajām, izmantojot korigēto determinācijas koeficientu, ņemot vērā neatkarīgo mainīgo skaitu un mērījumu skaitu [65]:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1}. \quad (3.4)$$

Rezultātā korigētais determinācijas koeficients  $\bar{R}^2$ , ņemot vērā neatkarīgo mainīgo skaitu un mērījumu skaitu, tika noteikts  $\bar{R}^2 = 0,70$ . Tas parāda diezgan ciešu saistību starp aprēķinātajām vērtībām un mērījumu rezultātiem, proti, 70 % mērījumu var izskaidrot ar izmantoto lineārās regresijas modeli.

Izmantojot iepriekš minēto datorprogrammu ar dispersijas analīzes metodi (*ANOVA (Analysis of Variance)*), tika novērtēts statistiskais nozīmīgums empīriskam prognozēšanas modelim, kas liecina par iegūtā matemātiskā modeļa koeficientu nozīmīgumu. Iegūtie rezultāti apkopoti 3.1. tabulā.

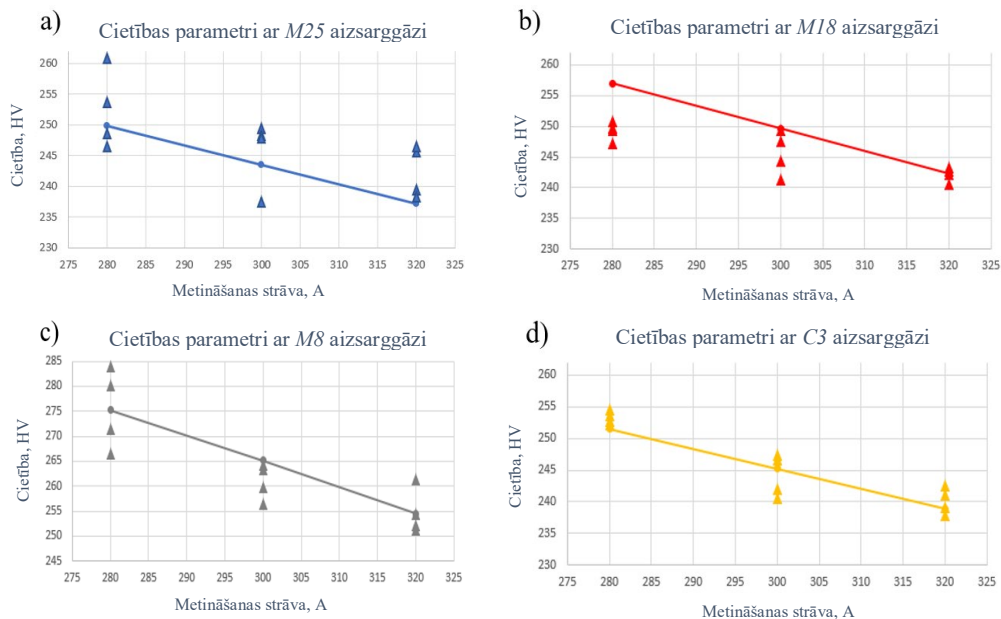
3.1. tabula

Aprēķinātie  $t$  un  $P$  lielumi

	$CO_2$	$O_2$	$I_w$	$b$
$t$	7,25	7,24	6,13	23,09
$P$	4,79E-09	5,02E-09	2,2E-07	3,16E-26

Ja regresijas vienādojumam pēc Fišera kritērija testa  $P$  vērtība nesasniedz 0,05, tad izstrādātais regresijas modelis ir statistiski nozīmīgs jeb dati ir uzticami [65, 66]. Kā redzams 3.1. tabulā, iegūtās  $P$  vērtības daudzfaktoru regresijas modelim ir būtiski mazākas par iepriekš minēto skaitli, no kā var secināt, ka iegūtais matemātiskais modelis ir nozīmīgs un uzticams.

Lai salīdzinātu eksperimentālo mērījumu un iegūtā matemātiskā modeļa vērtības, tika izveidots 3.2. attēls.



3.2. att. Aprēķinātās sametinātās šuves materiāla cietības salīdzinājums ar eksperimentāli nomērīto: a) M25; b) M18; c) M8; d) C3.

Var secināt, ka ģenerētais modelis (3.2. att.) uzrāda diezgan precīzus aprēķinātos rezultātus, kas dod iespēju prognozēt metinātā metāla cietības parametrus, jo modeļa aprēķinātā pielāde bija 6 HV cietības vienības. Tā ir tāda pati pielāde, kāda tika konstatēta paraugiem gan pamatmateriāla, gan sametinātās šuves materiāla mērīšanas procesā.

Iegūtā modeļa papildu pārbaude tika veikta ar datorprogrammu *SPSS®Statistics*. Pēc visu datu apkopošanas un ievietošanas datu apstrādes programmā tika iegūti šādi rezultāti (3.2. tab.).

3.2. tabula

Iegūti dati un koeficienti ar *SPSS®Statistics*

Coefficients <sup>a</sup>													
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		Correlations			Collinearity Statistics		
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF	
1	(Constant)	364.310	15.776			332.517	396.104						
	ampers	-.318	.052	-.508	-.6126	.000	-.422	-.213	-.508	-.678	-.508	1.000	1.000
	co2_perc	-101.781	14.023	-.795	-7.258	.000	-130.042	-73.520	-.277	-.738	-.602	.575	1.740
	o2_perc	-373.885	51.612	-.793	-7.244	.000	-477.902	-269.868	-.275	-.738	-.601	.575	1.740

a. Dependent Variable: cietiba



No pirmajā kolonnā iegūtajiem datiem var secināt, ka tie ir līdzīgi koeficientiem 3.2. formulā. Līdzīgu rezultātu var redzēt tabulas ceturtajā kolonnā, kur attēlotas  $t$  distribūcijas vērtības, kas ir identiskas iepriekš aprēķinātajā modelī.

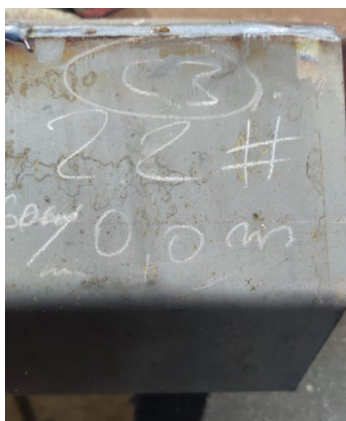
Tā kā izveidotie modeļi izskatās līdzīgi, kā arī izveidotie grafiki uzrāda ļoti tuvus rezultātus eksperimentāli sasniegtajiem, var secināt, ka iegūtais matemātiskais modelis ir pareizs un nozīmīgs.

## 4. PROGNOZĒŠANAS MODEĻA APROBĀCIJA UN TĀLĀKĀS IZPĒTES VIRZIENI

Sadarbībā ar SIA “Speciāls Elektrods” un SIA “GPower” tiek strādāts pie mobilo telekomunikācijas antenu teleskopisko mastu izgatavošanas tehnoloģijas. Viena no būtiskākajām sadaļām šajā projektā ir izstrādāt pārvietojamā moduļa masta salikšanas konstrukciju. Svarīgākā sadaļa ir atvieglot masta konstrukcijas svaru, nesamazinot konstrukcijas stingrību un izturību. Šī iemesla dēļ tika nolemts izmantot augstas izturības tēraudu (650 MPa klases), kā arī kvadrātveida konstrukcijas vietā izmantot heksagonālu. Projekta izmaksu samazināšanas nolūkos tika pieņemts lēmums šo konstrukciju izgatavot ar vienu metināšanas šuvi.

Būtiski šādas konstrukcijas izgatavošanā ir izvairīties no metināšanas rezultātā izraisītām deformācijām. Viens no risinājumiem ir metināšana ar lielāku ātrumu un mazāku termisko ietekmi. Lai to nodrošinātu, ir nepieciešams metināšanas procesu veikt ar paaugstinātiem metināšanas parametriem, t. i., izmantojot strūklveida pārnesi.

Izmantojot izstrādāto modeli un pieejamos izejmateriālus, ir veikti pirmie eksperimenti, kam pateicoties, jau ir iegūti pirmie rezultāti un izdarīti pirmie secinājumi.



4.1. att. Aprobācijas eksperimentu rezultāti, parauga metināšana.

Tā pat kā izstrādātā studiju darba eksperimentu veikšanā, arī metināšanas procesu nodrošināšanai tiek izmantots *Fronius®500i* strāvas avots un *Fronius® FlexTrack 45 Pro* metināšanas traktors. Eksperimentos līdz šim ir izmantotas aizsarggāzes *M18* un *C3*. No šīm kā pirmā gan pēc modelēšanas, gan praktiskajiem rezultātiem tika noraidīta *M18* aizsarggāze tās radīto šļakatu un nepietiekamā sakausējuma (pārāk šaura metināšanas vannīte) dēļ.

Viens no turpmākajiem pētījumu mērķiem varētu būt lāzermetināšanas, kā arī hibrīdmetināšanas pētniecība. Kā interesants šis metināšanas veids jau tika apskatīts iepriekšējā pētījuma literatūras apskatā [36, 37], tomēr pieejamie materiāli un iekārtu nepieejamība šādu pētījumu liedz veikt. Mūsdienās iekārtu pieejamība ir būtiski uzlabojusies, attiecīgi pētījumu iespējamība ir augstāka.

## PĒTĪJUMA BŪTISKĀKIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

1. Strūklveida materiāla pārneses režīmos joprojām ir novērojama ietekme uz šļakatu veidošanos, metinot ar aizsarggāzēm *M18* un *M25*. Neskatoties uz to, ka metināšanas lokā plazmas temperatūra ir augsta, joprojām CO<sub>2</sub> paaugstināts saturs nodrošina īssavienojuma veidošanās potenciālu metināšanas procesā, kā rezultātā atsevišķi pilieni veido šļakatas metināšanas vannītē, ko var redzēt uz materiāla virsmas. Metinot ar maisījumiem *M8* un *C3*, šļakatas neparādās, jo argona saturs ir vismaz 90 %, nodrošinot mazāku CO<sub>2</sub> ietekmi uz metināšanas procesu un īssavienojumu veidošanos.

2. Visos paraugos, kas metināti ar *M18* un *M25* aizsarggāzēm, tika panākts dziļāks caurkausējums. Tas ir iespējams, pateicoties iepriekš minētajām īssavienojuma veidošanās īpatnībām, kas rodas, pateicoties lielākam CO<sub>2</sub> saturam aizsarggāzē. Iespējams, ka, samazinot stieples padeves ātrumu, līdz ar to arī metināšanas strāvu, šļakatu daudzums samazinātos, ja būtu iespējams samazināt arī kustošā elektroda stieples vienmērīgu nonākšanu vannītē, samazinot metināšanas ātrumu. Tā rezultātā palielinās iespēja palielināt siltuma ieguldījumu metinātajā šuvē, kas palielinātu gan deformācijas, gan arī ietekmētu legēto elementu daudzumu un šuves mehāniskās īpašības.

3. Paraugos, kas metināti ar *M8* un *M18* aizsarggāzēm, metināšanas šuvēs ir novērojams mazāks skaits ieslēgumu. Tas ir saistīts ar to, ka O<sub>2</sub> saturs, kas nonāk sametinātajā šuvē, ir mazāks nekā pārējām aizsarggāzēm. Šī iemesla dēļ arī veidojas mazāk oksīdu un citu gāzveida savienojumu, kas nepaspēj izspiesties no sametinātās šuves šķidrās fāzes.

4. Mn saturs bija augstāks paraugu metinātajās šuvēs, kas izgatavotas ar *M8* maisījumu pie augstākiem parametriem (320 A). Neskatoties uz to, netika sasniegtas visaugstākās cietības mērījumu vērtības. To var izskaidrot ar nevienmērīgu izveidoto šuves mikrostruktūru, kā arī samazinātu Ni saturu pie augstākiem parametriem.

5. Mazākas un samērā stabilas Mn satura izmaiņas tika novērotas metinātajos paraugos, kas metināti ar *M25* maisījumu. Tomēr cietības mērījumu vērtības šiem paraugiem netika novērotas augstākas par pārējiem sametinātajiem paraugiem.

6. Mn kā legējošā materiāla daudzums vismazākais tika novērots visos paraugos, kas metināti ar *C3* maisījumu. To var izskaidrot ar O<sub>2</sub> klātbūtni metināšanas procesā, kā rezultātā aktīvi tiek izdedzināti legējošie elementi šuvē. Turpretim O<sub>2</sub> klātbūtne aizsarggāzes sastāvā būtiski neietekmē Ni satura izmaiņas un, palielinoties strāvas stiprumam, tā sastāvs šuvē palielinās. Tomēr šī parādība nenodrošina sametinātās šuves materiāla cietību, kas samazinās, pieaugot metināšanas parametriem. Līdz ar to *C3* maisījumu nav ieteicams izmantot augstas izturības tēraudu metināšanā pie augstiem metināšanas parametriem.

7. Visiem paraugiem, kas izgatavoti ar *M8* maisījumu, tika sasniegtas augstākas cietības vērtības, salīdzinot ar pārējām aizsarggāzēm, pie attiecīgi vienādiem metināšanas parametriem. 280 A paraugam tika sasniegta augstākā cietības vērtība starp visiem paraugiem, kas metināti strūklveida pārneses režīmos. Lai arī Mn zudumi tika novēroti pie zemākiem parametriem, netika novērots Ni satura samazinājums paraugiem, kas metināti ar *M8* maisījumiem. Tas izskaidro samērā stabilus cietības rādītājus metinātajos savienojumos.

8. Labākā metinātās šuves formas, caurkausējuma un cietības parametru kombinācija tika sasniegta ar *M8* maisījumu pie 280 A metināšanas parametriem. Līdz ar to ir apstiprināta hipotēze, ka, metinot ar aizsarggāzi, kuras sastāvā ir mazāks CO<sub>2</sub> procentuālais saturs, tiek sasniegti labāki metināšanas rezultāti elektriskā loka pusautomātiskajā metināšanā aizsarggāzu vidē pie strūklveida pārnese parametriem.

9. Sametinātās šuves metāla prognozētās cietības aprēķināšanai tika izveidots un apstiprināts matemātiskais modelis.

10. Visiem metinātajiem paraugiem sametinātā metāla cietība *HAZ* tika sasniegta zemāka par pamatmateriālu. Tas nozīmē, ka augstu metināšanas parametru ietekme uz neizkusušo metālu metināšanas vannītē ir liela un samazina tā mehāniskās īpašības. Tāpēc, iespējams, nav ieteicams izmantot metināšanu ar strūklveida pārnese mazlēģēta augstas stiprības tērauda metināšanā vai palielināt šos parametrus metināšanas procesā.

## INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Gas Metal Arc Welding [accessed on 10th of January 2022]. Available at: [http://www.itw-welding.com/media/Pdf/Welding\\_Support](http://www.itw-welding.com/media/Pdf/Welding_Support).
2. Grill J., MIG Welding (GMAW) Process Techniques & Tips [accessed on 10th of January 2022]. Available at: <https://weldguru.com/mig-welding/>.
3. MIG vs TIG Welding: The Main Differences [accessed on 2nd of June 2022]. Available at: <https://weldguru.com/mig-vs-tig-welding/>.
4. MAG Welding [accessed on 2nd of June 2022]. Available at: <https://rime.de/en/welding/mag-welding/>.
5. Kah P. & Martikainen J., Influence of shielding gases in the welding of metals (2011).
6. Knovel (Firm), ASM International. Handbook Committee. ASM handbook. Volume 6, Welding, brazing, and soldering (1993).
7. Gertsovich and N. Svanberg, Analysis of MIG welding with aim on quality, M. Sc. Thesis, Dept. Signal Processing, Blekinge Institute, Sweden (Jul. 2008).
8. Karadeniz E., Ozsarac U., and Yildiz C., The effect of process parameters in gas metal arc welding process, *Materials and Design*, vol. 28, 649–656 (Sep. 2005).
9. Kuk J. M., Jang K. C., Lee D. G., Kim I. S., Effects of temperature and shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminum alloy, *J Mater Process Technol* 155(156): 1408–1414, (2004).
10. Chern T.-S., Tseng K.-H., Tsai H.-L., Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds. *Mater Des* 32(1): 255–263 (Available on: doi:10.1016/j.matdes.2010.05.056) (2011).
11. Патон Б. Е., Кирсанов А. В., Подгаецкий В. В. др., а. с. 448106 СССР, в 23 к 35/38. Защитная газовая смесь - приор. 26.06.72. Опубл. 30.10.74; бюл. № 40.
12. *SAGOS 3: Ein schutzgas fuer zwei Werkstoffgruppen*, Stahlmarkt., No. 11: 66 (2001).
13. Pfeiffer G., Zuend- und spritzeruntersuchungen beim MAG-Impulsschweißen, *ZIS-Mitteilungen*, No. 6.: 545–549 (1989).
14. Патон Б. Е., Римский С. Т., Галинич В. И., Применение Защитных Газов в Сварочном Производстве (Обзор) (2014).
15. Рошупкин Н. П., Близнец Н. А., Свецинский В. Г. и др. Опыт производственного применения газовых смеси на основе аргона заводами ВО «Союзстальконструкция», там же. № 3. 51–53 (1984).
16. Свецинский В. Г., Римский С. Т., Галинич В. И. Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины, автомат. сварка. № 4. 41–44 (1994).
17. Свецинский В. Г., Римский С. Т., Кирьян В. И. Оценка вязкости разрушения швов, сваренных в защитных газах и под флюсом, там же. № 8. 16–19 (1982).
18. Римский С. Т. Управление свойствами металла шва путем урегулирования уровня окисленности сварочной ванны при сварке в защитных газах, автомат. сварка. № 12. – с. 20–23 (2011).
19. Римский С. Т., Свецинский В. Г., Шейко П. П. и др. импульсно-дуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом, автомат. сварка. № 2. – с. 38–41 (1993).
20. Ameye M. Einfluss der verschiedenen schutzgase im Zusammenwirken mit schweissverfahren und Werkstoffen, *Der Praktiker*. No. 7, s. 271–273 (2011).
21. Lyttle K., Stapon G. simplifying shielding gas selection, *Practical Welding today*. No. 1. 22–25 (2005).
22. Das schutzgas macht's, *Blech. Rohre Profile*. No. 8/9. 28–30 (2005).
23. Ernst M. Lichtbogen stabil gehalten, *Produktion*. No. 8. 23 (1999).
24. Church J. G., Imaizumi H. Welding characteristics of a new welding TIME-process, *IIW Doc. XII-1199*.
25. Lahnsteiner P. T.I.M.E.-Prozess ein neues MAG-schwei-ßverfahren, *schweißtechnik*. No. 12. 182–186 (1991).
26. Lucas W. Choosing a shielding gas. Pt 2, *Weld. and Metal Fabr*. No. 6. 269–276 (1992).
27. Dixon K. shielding gas selection for GMAW of steels, *Weld. and Metal Fabr*. No. 5. 8–13. (1999).
28. Oeteren K.-A. Neues schutzgas» metal-aktivgasgeschwißt – ein wirtschaftliher Vorteil, *Der Praktiker*. No. 2. 90–94 (1992).
29. Ramy Gadallah, Raouf Fahmy, Tarek Khalifa, Alber Sadek, Influence of Shielding Gas Composition on the Properties of Flux-Cored Arc Welds of Plain Carbon Steel (2012).

30. Moreira, A. F.; Gallego, J.; Tokimatsu, R. C., & Ventrella, V. A. The Effect of Shielding Gas Mixture on Inclusion Distribution for MIG Welding Process.
31. Çevik B., The effect of pure argon and mixed gases on microstructural and mechanical properties of S275 structural steel joined by flux-cored arc welding (2018).
32. Ghazvinlo, H. R., Honarbakhsh Raouf, A.: Journal of Applied Science, p. 658, (10, 2010), (Available on: [doi:10.3923/jas.2010.658.663](https://doi.org/10.3923/jas.2010.658.663) ).
33. Gülenç, B., Develi, K., Kahraman, N., Durgutlu, A.: International Journal of Hydrogen Energy, 30, 2005, p. 1475. (2005) (Available on: [doi:10.1016/j.ijhydene.2004.12.012](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.12.012) ).
34. Aloraier, A., Ibrahim, R., Thomson, P.: International Journal of Pressure Vessels and Piping, 83, 2006, p. 394. (2006), (Available on [doi:10.1016/j.ijpvp.2006.02.028](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.02.028) ).
35. Kiliñer, S., Kahraman, N.: Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24, p. 23 (2009).
36. Boiko I., Avisans D., Study of Shielding Gases for MAG Welding, (2013).
37. Kou S., Welding Metallurgy Handbook, 2nd ed. New York, USA: John Wiley and Sons, 2002.
38. Gouda M., Takahashi M., Ikeuchi K., Microstructures of gas metal arc weld metal of 950 MPa class steel, Institute of Materials, Minerals and Mining (2005).
39. Fleming D. A., Bracarense A. Q., Liu S. and Olson D. L.: Weld. Journal 75 (6), 171–183 (1996).
40. Peng Y., Peng X., Zhang X., Tian Z., Eang T., Microstructure and Mechanical Properties of GMAW Weld Metal of 890 MPa Class Steel, Journal of Iron and Steel Research, International, 21 (5), 539–544 (2014).
41. Zhao Y., Shi H., Yan K., Wang G., Jia Z., He Y., Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel, Journal of Materials Processing Tech., 2018.
42. Tonbang A., Jinshan W., Jiguo S., Zhiling T., Influence of Shielding Gas Composition on Microstructure Characteristics of 1000 MPa Grade Deposited Metals (2018).
43. Keehan E., Karlsson L., Andren H.-O. and Bhadeshia H. K. D. H., New Developments with C-Mn-Ni High-Strength Steel Weld Metals, Part A – Microstructure, (September, 2006).
44. Lord M., Design and modeling of ultrahigh strength steel weld deposits. *Materials Science and Metallurgy*. University of Cambridge: Cambridge, U.K. (1999).
45. Kang, B. Y., Kim, H. J., and Hwang, S. K., Effect of Mn and Ni on the variation of the microstructure and mechanical properties of low-carbon weld metals. *ISIJ International* (Japan) 40(12): 1237–1245 (2000).
46. Francis R. E., Jones J. E. and Olson D. L., Effect of Shielding Gas Oxygen Activity on Weld Metal Microstructure of GMA Welded Microalloyed HSLA Steel, Welding Research Supplement, 408–415 (1990).
47. Kikuta Y., Araki T., Honda K., and Sakahira S., The metallurgical properties of electroslag weld metal using CeF3 addition wire. *Proceedings of International Conference on Welding Research in the 1980s*, Session B, 131–136 (1980).
48. Pērtersons O., Priednieks J., MIG/MAG Metināšana, Part 2, AGA SIA (2010).
49. Product and software range of company Fronius [accessed on 15<sup>th</sup> of March 2022]. Available at: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/innovative-solutions/weldconnect>
50. Product range offer home page of company Zultnermetall [accessed on 15<sup>th</sup> of March 2022]. Available at: <https://www.zultnermetall.com/en/fronius-tps-500i-mig-mag-schweissgeraet-puls-wassergekuehlt.>
51. Sergejevs, D., Tipainis, A., Gavrilovs, P. Restoration of Railway Turnout Elements with Manual Metal Arc Welding and Flux-Cored Arc Welding (2016), *Procedia Engineering*.
52. Sergejevs, D., Tipainis, A., Gavrilovs, P. The restoration of worn surfaces of railway turnout elements by a flux cored arc welding (FCAW) (2014) transport Means, Proceedings of the International Conference (2014-January).
53. Avisans D., Boiko I., In: *Proceedings of 7th International Symposium “Surface Engineering. New Powder Composition Materials. Welding”*, 2nd Part, March 2011 (Minsk, Belarus, 2011).
54. [Daniel H. Herring](#), The Influence of Manganese in Steel, Academy of Digital Learning, April, 2010, Zultnermetall [accessed on 15 March 2022]. Available at: <https://www.industrialheating.com/articles/89322-the-influence-of-manganese-in-steel>.

55. Ebrahimi M, Goodarzi M, Nouri M, Sheikhi M, Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37–2 in gas metal arc welding. *Mater Des* 30 (9): 3891–3895. doi:[10.1016/j.matdes.2009.03.031](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.031), (2009).
56. Sonmez, U., Ceyhan, V.: *Kovove, Materialy-Metallic Materials*, 52, , p. 57. (2014).
57. Rizvi S. A., Tewari S. P., Effect of the Shielding Gas Flow Rate on Mechanical Properties and Microstructure of Structural Steel (IS2062) Welds, (2017).
58. Akay, A. A., Kaya, Y., Kahraman, N., Sakarya University, *Journal of Science*, 17, p. 85, (2013).
59. Schatt W., Worch H., *Werstoffwissenschaft*, Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH (2002).
60. Oettel H., Schaumann H., *Metallografie*, Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH (2005).
61. Schuster J., Hot cracking in welds – Initiation, verification and prevention, *DVS-News*, Volume 233, Düsseldorf; Verlag für Schweißen un verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH (2004).
62. Böse U., Ippendorf F., Base material behaviour during welding – Part 2, Application Düsseldorf; Verlag für Schweißen un verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH (2001).
63. Matsuda F., Fukada Y., Okada H., Shiga C., Ikeuchi K., Horii Y. and Shiwaku T.: *Weld. World*, 37, 134–154 (1996).
64. Pratomo S. B., Oktadinata H. and Widodo T. W., Effect of nickel additions on microstructure evolution and mechanical properties of low-alloy Cr-Mo cast steel, *International Seminar on Metallurgy and Materials*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 541; doi:[10.1088/1757-899X/541/1/012050](https://doi.org/10.1088/1757-899X/541/1/012050) (2019).
65. Navidi W. C.. Statistics for engineers and scientists, [https://mirlyn.lib.umich.edu/Record/014865504-CN - QA 276.4 .N38 2015](https://mirlyn.lib.umich.edu/Record/014865504-CN-QA-276.4-N38-2015) (2015).
66. Mason R. L., Gunst R. F., Hess J. L., *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science*, Second edition, A JOHN WILEY & SONS PUBLICATION, New Jersey, <https://www.abebooks.com/9780471372165/Statistical-Design-Analysis-Experiments-Applications-0471372161/plp> [accessed on 15<sup>th</sup> of July 2022].



**Didzis Avišāns** dzimis 1980. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu mašīnzinātnē (2001) un maģistra grādu mašīnbūves tehnoloģiju specialitātē (2010). Strādājis uzņēmumos SIA "Festo", SIA "AGA", SIA "EMJ Metāls" un SIA "Tecnopali North Europe". Kopš 2020. gada strādā RTU, ieņemot lektora, pētnieka, darba drošības speciālista un laboratorijas vadītāja pienākumu izpildītāja amatus. Šobrīd ir RTU Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes Metināšanas un termisko procesu laboratorijas vadītājs un lektors. Zinātniskās intereses saistītas ražošanas tehnoloģiju un procesu optimizācijas jomām.