Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80

Jurica, Maja

Doctoral thesis / Disertacija

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:299899

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Maja Jurica

UTJECAJ ZAŠTITNOGA PLINA I NAČINA PRIJENOSA METALA NA SVOJSTVA ZAVARENOGA SPOJA ČELIKA X80

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2015.



UNIVERSITY OF ZAGREB

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

AND NAVAL ARCHITECTURE

Maja Jurica

INFLUENCE OF THE SHIELDING GAS AND METAL TRANSFER ON THE X80 WELD JOINT PROPERTIES

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Maja Jurica

UTJECAJ ZAŠTITNOGA PLINA I NAČINA PRIJENOSA METALA NA SVOJSTVA ZAVARENOGA SPOJA ČELIKA X80

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Zagreb, 2015.

UNIVERSITY OF ZAGREB

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

AND NAVAL ARCHITECTURE

Maja Jurica

INFLUENCE OF THE SHIELDING GAS AND METAL TRANSFER ON THE X80 WELD JOINT PROPERTIES

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Zagreb, 2015.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:	621.791.754: 669.14
Ključne riječi:	TMCP čelici, X80, CBT MAG zavarivanje, acikularni ferit, kisik
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
Mentor rada:	Prof. dr.sc. Zoran Kožuh
Broj stranica:	175
Broj tablica:	35
Broj slika:	105
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	116
Datum obrane:	2015.
Povjerenstvo:	Prof.dr.sc. Zdravko Schauperl, predsjednik Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, mentor Doc.dr.sc. Ivica Garašić Prof.dr.sc. Biserka Runje Prof. dr. sc. Ivan Samardžić
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

mojoj obitelji...

ZAHVALA

Veliko hvala mojem mentoru prof.dr.sc Zoranu Kožuhu na podršci, vođenju i korisnim sugestijama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se ostalim članovima Povjerenstva prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu, doc.dr.sc. Ivici Garašiću, prof.dr.sc. Biserki Runje i prof.dr.sc. Ivanu Samardžiću na savjetima i konzultacijama tijekom provođenja istraživanja i eksperimentalnog rada te strpljenju prilikom čitanja i recenzije rada.

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Slobodanu Kralju na svim stručnim savjetima i podršci tijekom izrade doktorskog rada.

Posebno hvala Zdenku Batiniću, Krešimiru Sukobljeviću i Mati Šokičiću na velikoj pomoći u izradi eksperimentalnog dijela rada te korisnim savjetima i sugestijama kao i moralnoj podršci.

Doc.dr.sc. Suzani Jakovljević, prof.dr.sc. Lidiji Čurković, gospođi Ani Bezmalinović i gospođi Dubravki Ulagi zahvaljujem se za pomoć pri analizi uzoraka na SEM mikroskopu, mjerenju kemijskog sastava uzoraka te korisnim savjetima.

Dr.sc. Hrvoju Cajneru se zahvaljujem na nesebičnoj pomoći i sugestijama pri izradi plana pokusa i analizi dobivenih rezultata.

Mr.sc. Šimunu Andriću se zahvaljujem na pomoći oko uređivanja teksta i ostalim korisnim savjetima.

Za pomoć pri izradi ispitnih uzoraka zahvaljujem se kolegi g. Ivanu Vovku.

Zahvaljujem se tvrtki Daihen Varstroj welding, cutting and robotics d.d. na donaciji izvora struje za zavarivanje Welbee P 500 L zbog kojeg mi je bilo osigurano izvođenje eksperimenta te također tvrtki Servus na tehničkoj podršci tijekom izrade eksperimentalnog rada.

Hvala kolegici dr.sc. Tanji Tomić na moralnoj podršci tijekom cijelokupne izrade rada te pomoći prilikom nesebičnog preuzimanja dijela mojih radnih obaveza pred kraj izrade doktorskog rada čime je uvelike pomogla i olakšala njegovu izradu.

Također se zahvaljujem kolegicama i kolegama s Katedre za nerazorna ispitivanja, Katedre za ljevarstvo, Katedre za mjerenje i kontrolu, Katedre za površinsku zaštitu i Katedre za zavarene konstrukcije koji su bili moralna i tehnička podrška tijekom izrade rada.

Hrvatskom društvu za tehniku zavarivanja zahvaljujem na pruženim materijalima te ostaloj pomoći.

Hvala svim mojim prijateljicama i prijateljima koji su bili velika podrška tijekom cijelokupne izrade rada, koji su strpljivo i uvjerljivo prihvaćali moje isprike oko odgađanja ili nemogućnosti dolaska na druženja.

Veliko hvala mojim roditeljima i bratu koji su me uvijek podržavali i nesebično pomagali koliko god da je bilo potrebno bez da sam išta morala tražiti. Hvala im na tome jer bez toga danas ne bih bila tu gdje jesam.

I još jedno veliko hvala mom suprugu, na njegovoj beskonačnoj strpljivosti, razumijevanju i ogromnoj potpori koju mi pruža još od samog početka mog studiranja.

SADRŽAJ

PREDGOVOR I

SAŽETAK RADA III

SUMMARY IV

KLJUČNE RIJEČI V

KEY WORDS V

POPIS OZNAKA VI

POPIS KRATICA VIII

POPIS SLIKA X

POPIS TABLICA XVI

1. UVOD 1

1.1. Motivacija i obrazloženje istraživanja 1

1.2. Hipoteza rada 4

1.3. Sustav i organizacija provedenog istraživanja 4

2. SVOJSTVA I RAZVOJ VISOKOČVRSTIH ČELIKA 7

2.1. TMCP postupak izrade čelika 9

2.2. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva visokočvrstih čelika 12

2.3. Mikrostruktura zavarenog spoja visokočvrstih čelika 20

2.4. Acikularni ferit 25

2.4.1. Faktori koji utječu na formiranje acikularnog ferita 26

2.4.2. Mehanizam rasta acikularnog ferita 29

3. MIG / MAG ZAVARIVANJE 31

3.1. Općenito o MIG/MAG postupku zavarivanja 31

3.2. Sile koje djeluju na prijenos metala tijekom zavarivanja 34

3.3. Prijenos metala u električnom luku 38

3.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima 40

3.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom (krupnokapljičasti prijenos) 42

3.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom 42

3.3.4. Prijenos metala impulsnim lukom 43

3.3.5. CBT način prijenosa metala 44
3.3.5.1. CBT – EX način prijenosa metala 47
3.3.5.2. Izvori struje za CBT MIG/MAG postupak zavarivanja 49
3.4. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja 51
3.4.1. Utjecaj zaštitnih plinova argona i ugljičnog dioksida na proces zavarivanja 53
3.4.2. Utjecaj udjela kisika u plinskoj mješavini na svojstva zavarenog spoja 56
4. EKSPERIMENTALNI RAD 60
4.1. Opis eksperimenta 60
4.2. Oprema za zavarivanje 61
4.3. Osnovni materijal 64
4.4. Dodatni materijal 66
4.5. Zaštitni plin 66
4.6. Oblikovanje eksperimenta i plan pokusa 67
4.7. Parametri zavarivanja 70
4.8. Priprema i izrada ispitnih uzoraka 74
4.9. Provedba ispitivanja svojstava zavarenih spojeva 75
4.10. Metodologija vrednovanja prihvatljivosti matematičkih modela 80
4.11. Proračun mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja MCS metodom 83
5. DOBIVENI REZULTATI MJERENJA I NJIHOVA ANALIZA 85
5.1. Analiza dinamičke karakteristike izvora struje WB500L 85
5.2. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki zavarenog spoja 103
5.3. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki zavarenog spoja 109
5.4. Prikaz rezultata dobivenih analizom mikrostrukture 112
5.5. Analiza rezultata dobivenih analizom mikrostrukture – udio acikularnog ferita 118
5.6. Prikaz rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja 128
5.7. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja – udio silicija 129
5.8. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja – udio mangana 139
5.9. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja 147
5.10. Prikaz rezultata dobivenih kemijskom analizom uključaka u metalu zavara 149
5.11. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom uključaka u metalu zavara 151
5.12. Prikaz rezultata mjerenja mikrotvrdoće HV 0,2 zavarenog spoja 154
5.13. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem mikrotvrdoće HV 0,2 zavarenog spoja 156
6. ZAKLJUČAK 160

7. LITERATURA 165

KRATKI ŽIVOTOPIS 175

SHORT BIOGRAPHY 175

PREDGOVOR

Zbog sve strožih zahtjeva industrije i krajnjih potrošača koji nameću sve veću učinkovitost transporta plina i nafte, proizvođači čeličnih cijevi kontinuirano razvijaju nove čelike. Ti čelici su sve boljih mehaničkih svojstava kako bi se proizveli proizvodi postojani u teškim eksploatacijskim uvjetima. Ranije spomenutu veću učinkovitost moguće je postići većim operativnim tlakom, što podrazumijeva korištenje visokočvrstih čelika. Korištenje visokočvrstih čelika u izradi cjevovoda ima za rezultat znatno smanjenje težine i ukupnih troškova izrade zbog smanjenja debljina stijenki cijevi.

Materijal često korišten u izradi cjevovoda je API 5L X80 – visokočvrsti čelik dobiven kontroliranim termomehaničkim postupkom valjanja (eng. TMCP – *Thermomechanical Controlled Process*). Postupak je to kojim se ubrzanim hlađenjem (eng. AcC – *Accelerated Cooling*) postiže tražena sitnozrnata struktura koja osigurava dobru kombinaciju visoke čvrstoće i različitih mikrostrukturnih konstituenata, kao što su na primjer acikularni ferit, bainit i martenzit/austenit. Prvenstveno je acikularni ferit taj koji svojim oblikom i orijentacijom poboljšava mehanička svojstva (tvrdoće i čvrstoće) te se zbog toga teži što većem njegovom udjelu u zavarenom spoju. Provedena istraživanja su potvrdila da su najvažniji faktori koji utječu na stvaranje acikularnog ferita kemijski sastav i brzina hlađenja zavarenog spoja. Faktor koji još nije u potpunosti razjašnjen je utjecaj (nemetalnih/oksidnih) uključaka na nukleaciju acikularnog ferita. Točnije, nije definirano koji tipovi i karakteristike uključaka su poželjni za formiranje i rast acikularnog ferita. Kao jedan od mogućih izvora kisika u metalu zavara spominje se zaštitni plin koji se koristi pri zavarivanju.

Ukoliko se prilikom zavarivanja kao zaštitni plin koristi aktivna mješavina plinova, zaštitni plin reagira s metalom zavara pri tome uzrokujući proces oksidacije koji rezultira gubitkom legirnih elemenata i formiranjem uključaka u metalu zavara. Općenito gledajući, pojava uključaka u zavarenom spoju smatra se vrlo nepovoljnom i štetnom po pitanju narušavanja mehaničkih svojstava. No, u određenim uvjetima i količinama spomenuti uključci potiču stvaranje acikularnog ferita. Zbog svega navedenog, moguće je uočiti da kvaliteta i učinkovitost postupka zavarivanja uvelike ovise o korištenom zaštitnom plinu jer on ne samo da definira profil zavara i njegova mehanička svojstva, već utječe i na sadržaj plinova (vodika, kisika i dušika) u metalu zavara te na način prijenosa metala.

Cilj ovog rada je eksperimentalnim putem odrediti utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na mikrostrukturu i svojstva zavara čelika API 5L X80. Dobivena saznanja poslužiti će i za unaprijeđenje primjene CBT MAG postupka zavarivanja u praksi.

SAŽETAK RADA

U ovom doktorskom radu obrađena je i analizirana problematika utjecaja zaštitnog plina i novorazvijenog načina prijenosa metala (eng. CBT – Controlled Bridge Transfer) na svojstva zavarenog spoja visokočvrstog čelika API 5L X80.

U uvodnom dijelu rada iznesen je pregled dosadašnjih spoznaja i istraživanja na području proizvodnje TMCP (eng. *Thermo Mechanical Controlled Process*) čelika, MAG zavarivanja visokočvrstih čelika (eng. *Metal Active Gas*) s posebnim naglaskom na CBT način prijenosa metala te utjecaja zaštitnih plinova na mikrostrukturu zavarenog spoja. Također su postavljene hipoteze i definirani ciljevi rada.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je plan provedbe zavarivanja, ispitivanja i analize rezultata. Zavarivanje uzoraka u eksperimentalnom dijelu rada izvedeno je prema plošno centriranom centralno kompozitnom planu pokusa (eng. CCF – *Face Centered Composite Design*), te je prema tome definirano 22 stanja pokusa, s 3 ponavljanja u centru. Prema planu pokusa definirane su 3 varijable koje su bile varirane na 2 i 3 razine. Od spomenute 3 varijable, dvije su numeričke (brzina dodavanja žice, m/min i udio CO_2 u zaštitnom plinu, %) i jedna je kategorijska (način prijenosa metala). Za svako stanje pokusa su iz sučeljeno zavarenih ploča izrađeni uzorci za kemijsku i mikrostrukturnu analizu. Karakterizacijom su definirani kemijski sastavi zavarenih spojeva, uključci u zavarenim spojevima i osnovni materijal, mikrostrukturni sastav tj. udio konstituenata u zavarenim spojevima kao i mikrotvrdoće pojedinih prolaza i faza. Cijeli eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje, Laboratoriju za tribologiju, Laboratoriju za analizu materijala i Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.

Dobiveni rezultati i podaci o kemijskom i mikrostrukturnom sastavu zavarenog spoja statistički su analizirani pomoću programskog paketa Design Expert. Izrađeni su matematički modeli iz kojih je vidljiva značajnost utjecaja variranih faktora i njihovih interakcija na ispitivana svojstva zavarenog spoja. Također su Monte Carlo simulacijom procijenjeni utjecaji varijacija ulaznih veličina na kvalitetu rezultata mjerenja kemijskog sastava i analize mikrostrukture zavarenog spoja.

SUMMARY

This doctoral thesis focuses on the influence of the shielding gas and newly developed metal transfer mode (CBT – Controlled Bridge Transfer) on the HSLA API 5L X80 weld characteristic.

The introduction includes detailed literature overview on the subject of the TMCP steel production, MAG welding process (with emphasis on the newly developed CBT welding process) and effect of the shielding gas on the welded joint characteristics. Goals and hypothesis are also defined in the introductory part of the thesis.

Experimental part of thesis specifies the complete welding procedure of the workpieces, conduction of the samples testing and finally the analysis of the obtained results. The entire welding was conducted according to the central composite experiment design, face centered (CCF), which resulted in 22 runs with 3 replicates in the center. The design consisted of 3 factors varied over 2 and 3 levels. Out of the 3 varied factors, 2 of them are numeric (wire feed speed, m/min and CO_2 content in the shielding gas, %) and the third one (metal transfer mode) is categorical. For each run from the experiment design a sample from the butt welded joints were prepared in order to conduct chemical and microstructural characterization. Analysis of the chemical characterisation provided information on the exact chemical composition of the weld metal, heat affected zone and base metal as well as of inclusions. Also, microstructure of the welded joint was analysed in order to get information of the portion of different constituents. In the end micro hardness of the each individual phase and weld pass was measured. Entire experimental work was conducted in Laboratories of the Faculty of mechanical engineering and naval architecture, University of Zagreb.

All of the gathered data on the chemical and microstructural composition of the weld metal were statistically analyzed with the Design Expert software program. As of the result of the analysis, mathematical models were defined from which the influences of the varied parameters were defined and their interactions on the weld metal characteristics were observed. Also, Monte Carlo Simulation was used in order to estimate the influence of the input values variations on the properties of the microstructural and chemical analysis results.

KLJUČNE RIJEČI:TMCP čelici, X80, CBT MAG zavarivanje, acikularni ferit, uključci

KEY WORDS:TMCP steel, X80, CBT MAG welding, acicular ferrite, inclusions

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
C_{ekv}	Ekvivalent ugljika	%
A_P	Površina granice zrna	μm
A_{GB}	Površina čestica uključaka	μm
A_P / A_{GB}	Omjer površine granica zrna i površine čestica uključaka	
F_g	Sila gravitacije	N
F_{em}	Sila	N
F_{ema}	Aksijalna komponenta elektromagnetske sile	N
F_{emr}	Radijalna komponenta elektromagnetske sile	N
F_{pn}	Sila površinske napetosti	N
F_{pl}	Sila plazme električnog luka	N
F_e	Sila zbog eksplozije u kapljici	N
F_r	Sila reaktivnog djelovanja	N
F	Rezultantna sila	N
r_k	Polumjer kapljice	m
g	Ubrzanje sile teže	m/s^2
I	Jakost struje	A
U	Napon	V
r_s	Polumjer stupa električnog luka	m
$r_ž$	Polumjer elektrodne žice	m
r_v	Polumjer vrata kapljice	m
I_{kr}	Kritična jakost struje	A
T_1	Vrijeme trajanja kratkog spoja prije porasta napona	ms

O_{eq}	Ekvivalent kisika	
M	Broj simulacija	
AF_{max}	Izlazna veličina – udio acikularnog ferita	%
δCO_i	Udio CO_2 u zaštitnom plinu	%
δBZ_i	Brzina dodavanja žice	m/min
δAS_i	Analiza slike	
R^2_{adj}	Prilagođeni koeficijent determinacije	
R^2	Koeficijent determinacije	
R^2_{pre}	Predviđeni koeficijent determinacije	
Si_{max}	Izlazna veličina – udio silicija	%
Mn_{max}	Izlazna veličina – udio mangana	%
RS232	Kabel za povezivanje osciloskopa i osobnog računala	

Grčke oznake

Oznaka	**Opis**	**Jedinica**
α	Feritna faza	
γ	Austenitna faza	
ρ	Gustoća	kg/m^3
μ_0	Permeabilnost zraka	H/m
π	Ludolfov broj	

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
TMCP	Thermo Mechanical Controlled Process
AcC	Accelerated Cooling
CBT	Controlled Bridge Transfer
MIG/MAG	Zavarivanje kontinuiranom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi
CCF	Face Centered
MA	Martensite – Austenite
AF	Acicular Ferrite
ZUT	Zona Utjecaja Topline
CCC	Circumscribed
ppm	Parts per million
MCS	Monte Carlo Simulation
GDOES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscope
EDS	Energy – Dispersive X-ray Spectroscopy
IACS	International Association of Classification Societies
TTT	Time Temperature Transformation (Isothermal transformation diagram)
LB	Lower Bainite
TLM	Tempered Lath Martensite
DP	Dual Phase
B	Bainit
LS	Linija Staljivanja
OM	Osnovni Materijal
MZ	Metal Zavara

CGHAZ	Coarse Grained Heat Affected Zone
FGHAZ	Fine Grained Heat Affected Zone
ICCGHAZ	Intercritically Reheated Coarse Grained Heat Affected Zone
GBF	Grain Boundary Ferrite
PF	Polygonal Ferrite
WF	Widmanstätten Ferrite
CV	Constant Voltage
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama
PIT	Pinch Instability Theory
SFBT	Static Force Balance Theory
STT	Surface Tension Transfer
CMT	Cold Metal Transfer
CBT-EX	Controlled Bridge Transfer – Expanded
Welbee	Welding Best Electronic Engine
FPGA	Field Programmable Gate Array
CPU	Central Processing Unit
ASIC	Application – Specific Integrated Circuit
FCAW	Flux Cored Arc Welding
ppm	Parts per million
CCT	Continuous Cooling Transformation
ksi	kilopound per square inch
RSM	Response Surface Method
CCD	Charge – Coupled device
SZZUT	Sitnozrnata zona utjecaja topline
GZZUT	Grubozrnata zona utjecaja topline

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Zahtjevi za povećanje produktivnosti transportnih kapaciteta 7

Slika 2.2 Razvoj visokočvrstih mikrolegiranih čelika [5] 8

Slika 2.3 Usporedni shematski prikaz konvencionalnog i TMCP valjanja [42] 10

Slika 2.4 Promjena mikrostrukture tijekom TMCP postupka [43] 11

Slika 2.5 TTT dijagram za konstrukcijski čelik s različitim brzinama hlađenja [40] 12

Slika 2.6 Odnos ekvivalenta ugljika i vlačne čvrstoće [40] 12

Slika 2.7 Utjecaj legirnih elemenata niobija, titana i vanadija na: a) veličinu zrna ferita; b) granicu razvlačenja [167] 16

Slika 2.8 Pregled kemijskog sastava različitih API 5L čelika [5] 19

Slika 2.9 Mikrostruktura osnovnog materijala čelika API 5L X80 20

Slika 2.10 Karakteristična područja zavarenog spoja 20

Slika 2.11 Raspon temperatura u osnovnom metalu tijekom zavarivanja i mikrostrukturne zone ZUT-a [50] 21

Slika 2.12 Shematski prikaz gornjeg i donjeg bainita 23

Slika 2.13 Shematski prikaz nukleacije i rasta bainita i acikularnog ferita [60] 24

Slika 2.14 Prikaz acikularnog ferita dobiven SEM analizom[66] 25

Slika 2.15 Shematski prikaz propagacije pukotine u čelicima s različitim mikrostrukturama [64] 26

Slika 2.16 Utjecaj veličine austenitnog zrna na volumni udio acikularnog ferita [71] 28

Slika 2.17 Promjene u mikrostrukturi unutar ZUT-a (ovisno o unosu topline i postojanju uključaka); AF – acikularni ferit, B – bainit, WF – Wiedmanstättenov ferit [65] 30

Slika 3.1 Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [76] 31

Slika 3.2 Oprema za MIG/MAG zavarivanje [76] 32

Slika 3.3 Djelovanje sila na kapljicu metala u električnom luku; $d_ž$ – promjer elektrodne žice, d_k – promjer kapljice, d_s – promjer stupa električnog luka, d_v – promjer vrata kapljice, F_g – sila gravitacije, F_{em} – elektromagnetska sila, F_{emr} – radijalna komponenta elektromagnetske sile, F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, F_{pn} – sila površinske napetosti, F_r – sila reaktivnog djelovanja [77] 35

Slika 3.4 Shematski prikaz prijenosa metala prirodnim načinom: a) kratkim spojevima; b) prijelaznim lukom; c) štrcajućim lukom [83] 39

Slika 3.5 Osnovna podjela načina prijenosa metala prema vrsti transfera kapljice od elektrode do taline 40

Slika 3.6 Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [76] 41

Slika 3.7 Princip CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [20] 45

Slika 3.8 Princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja [86] 46

Slika 3.9 Faze CBT prijenosa metala ovisno o vremenu [30] 47

Slika 3.10 Princip CBT-EX MIG/MAG postupka zavarivanja [26] 48

Slika 3.11 Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT – EX MAG i konvencionalnom MAG zavarivanju [26] 49

Slika 3.12 Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti argona [94] 54

Slika 3.13 Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti ugljičnog dioksida (CO_2) [94] 55

Slika 3.14 Kemijski sastav uključaka unutar metala zavara pri EPP zavarivanju čelika s različitim udjelima aluminija [53] 56

Slika 3.15 Ovisnost promjera uključaka i njihove gustoće unutar metala zavara pri EPP zavarivanju čelika s različitim udjelima aluminija [53] 56

Slika 3.16 Ovisnost gubitka dezoksidanata o udjelu kisika u zaštitnom plinu [53] 57

Slika 3.17 CCT dijagrami s različitim režimima: a) nizak; b) srednji; c) visoki; M – martenzit, B – bainit, AF – acikularni ferit, P – perlit, WF – Wiedmanstättenov ferit, GBF – alotriomorfni ferit [97] 59

Slika 4.1 Grafički prikaz stanice za robotizirano zavarivanje 61

Slika 4.2 Pozicioniranje ploča 62

Slika 4.3 Zavarivanje korijenskog prolaza 62

Slika 4.4 Automat BUG-O Systems MDS 1002 63

Slika 4.5 Sastavni dijelovi automata BUG-O Systems MDS 1002 [100] 63

Slika 4.6 Izvor struje WB – 500L (a) i boce korištenih zaštitinih plinova (b) 63

Slika 4.7 Korisničko sučelje izvora struje WB – 500L 64

Slika 4.8 Grafički prikaz plošno centriranog centralnog kompozitnog plana pokusa s odgovarajućom odzivnom površinom [106] 68

Slika 4.9 Položaji pištolja kod zavarivanja uzoraka 73

Slika 4.10 Pripremljeni uzorci za ispitivanja 75

Slika 4.11 Radno mjesto s opremom za snimanje dinamičkih karakteristika 76

Slika 4.12 Shema spajanja mjerne opreme [20] 76

Slika 4.13 Raspored mjernih točaka mikrotvrdoće 77

Slika 4.14 Skenirajući elektronski mikroskop korišten za analizu nemetalnih uključaka 77

Slika 4.15 Optički emisijski spektrometar GDS 850, LECO 79

Slika 4.16 Mikroskop Olympus GX51F-5 s ugrađenom CCD kamerom i računalni program AnalySIS 79

Slika 4.17 Monte Carlo simulacija mjernog sustava [114] 83

Slika 5.1 Promjena jakosti struje u ovisnosti o zaštitnom plinu pri CBT načinu prijenosa metala 93

Slika 5.2 Promjena napona u ovisnosti o zaštitnom plinu pri CBT načinu prijenosa metala .. 93

Slika 5.3 Promjena jakosti struje u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konvencionalnom načinu prijenosa metala 94

Slika 5.4 Promjena napona u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konvencionalnom načinu prijenosa metala 94

Slika 5.5 Promjena jakosti struje ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2 95

Slika 5.6 Promjena napona ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2 95

Slika 5.7 Promjena jakosti struje ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2 96

Slika 5.8 Promjena napona ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2 96

Slika 5.9 Promjena jakosti struje ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2 97

Slika 5.10 Promjena napona ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2 97

Slika 5.11 Označeni karakteristični ciklusi na oscilogramu *u, i = f (t)* 98

Slika 5.12 Grafički prikaz promjene trajanja impulsa u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2 99

Slika 5.13 Grafički prikaz promjene trajanja impulsa u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2 100

Slika 5.14 Grafički prikaz promjene trajanja impulsa u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2 .. 101

Slika 5.15 Konvencionalno MAG zavarivanje 108

Slika 5.16 CBT MAG zavarivanje 108

Slika 5.17 Količina kapljica u žlijebu zavara kao posljedica štrcanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja – lijevo i CBT MAG zavarivanja – desno 108

Slika 5.18 Grafički prikaz promjene širine metala zavara ovisno o variranim parametrima za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje 109

Slika 5.19 Grafički prikaz promjene nadvišenja metala zavara ovisno o variranim parametrima za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje 110

Slika 5.20 Grafički prikaz promjene širine ZUT-a ovisno o variranim parametrima za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje 111

Slika 5.21 Mikrostruktura uzorka 2 – minimalni udio acikularnog ferita 117

Slika 5.22 Mikrostruktura uzorka 21 – maksimalni udio acikularnog ferita 117

Slika 5.23 Normalizirani papir ostataka za model za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara 120

Slika 5.24 Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za model za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara 121

Slika 5.25 Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati za model za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara 121

Slika 5.26 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna acikularnog ferita u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju 122

Slika 5.27 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju 123

Slika 5.28 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela acikularnog ferita u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju 124

Slika 5.29 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju 125

Slika 5.30 Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(AF_{max})$ 127

Slika 5.31 Normalizirani papir ostataka za model za izračun udjela silicija u metalu zavara 132

Slika 5.32 Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za model za izračun udjela silicija u metalu zavara 132

Slika 5.33 Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati za model za izračun udjela silicija u metalu zavara 133

Slika 5.34 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela silicija u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju 134

Slika 5.35 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju 134

Slika 5.36 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela silicija u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju 136

Slika 5.37 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju 136

Slika 5.38 Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(Si_{max})$ 138

Slika 5.39 Normalizirani papir ostataka za model za izračun udjela mangana u metalu zavara 141

Slika 5.40 Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za model za izračun udjela mangana u metalu zavara 142

Slika 5.41 Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati za model za izračun udjela mangana u metalu zavara 142

Slika 5.42 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela mangana u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju 143

Slika 5.43 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela mangana u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju 144

Slika 5.44 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela mangana u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju 145

Slika 5.45 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela mangana u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju..... 145

Slika 5.46 Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(Mn_{max})$ 147

Slika 5.47 Mikrostruktura uzorka broj 16 snimljena na SEM mikroskopu 151

Slika 5.48 Mikrotvrdoća HV 0,2 u području sitnozrnatog ZUT-a 156

Slika 5.49 Mikrotvrdoća HV 0,2 u području grubozrnatog ZUT-a..... 156

Slika 5.50 Mikrotvrdoća HV 0,2 u području metala zavara..... 157

Slika 5.51 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoća za sva stanja pokusa i sva područja mjerenja 157

Slika 5.52 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za različite zaštitne plinove 158

Slika 5.53 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za različite načine prijenosa metala. 158

Slika 5.54 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za različite brzine dodavanja žice ... 158

+

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Glavni učinci legirnih elemenata u visokočvrstim čelicima [5] 13

Tablica 3.1 Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [30] 46

Tablica 3.2 Klasifikacija digitalnih invertera [26] 50

Tablica 3.3 Vrijednosti najvažnijih fizikalnih svojstava argona i ugljičnog dioksida [40],[77]-[91] 51

Tablica 3.4 Udjeli kisika u zavarenom spoju ovisno o postupku zavarivanja i dodatnom materijalu [15] 58

Tablica 4.1 Karakteristike izvora struje Varstroj VPS 4000 [99] 62

Tablica 4.2 Karakteristike izvora struje WB – 500L [101] 64

Tablica 4.3 Mehanička svojstva čelika API 5L X80 [102][103] 65

Tablica 4.4 Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima [103] 65

Tablica 4.5 Kemijski sastav dodatnog materijala LNM MoNi [103] 66

Tablica 4.6 Mehanička svojstva dodatnog materijala LNM MoNi [104] 66

Tablica 4.7 Generirana stanja pokusa i pridružene oznake uzoraka 69

Tablica 4.8 Parametri zavarivanja uzoraka prema odgovarajućim stanjima pokusa 70

Tablica 5.1 Očitani parametri pri snimanju dinamičkih karakteristika 85

Tablica 5.2 Dinamičke karakteristike *u, i = f (t)* procesa zavarivanja pri 18 % CO_2/82 % Ar 86

Tablica 5.3 Dinamičke karakteristike *u, i = f (t)* procesa zavarivanja pri 59 % CO_2/82 % Ar 88

Tablica 5.4 Dinamičke karakteristike *u, i = f (t)* procesa zavarivanja pri 100 % CO_2 90

Tablica 5.5 Očitane vrijednosti s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 18 % 99

Tablica 5.6 Očitane vrijednosti s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 59 % 100

Tablica 5.7 Očitane vrijednosti s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 100 % 101

Tablica 5.8 Geometrijska analiza makroizbrusaka 103

Tablica 5.9 Rezultati analize mikrostrukture 112

Tablica 5.10 Mikrostrukture svih zavarenih uzoraka 113

Tablica 5.11 Analiza varijance matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio acikularnog ferita 118

Tablica 5.12 Vrijednosti koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela za izračun udjela acikularnog ferita 119

Tablica 5.13 Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine AF_{max} 126

Tablica 5.14 Kemijska analiza metala zavara za sva stanja pokusa 128

Tablica 5.15 Analiza varijance matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio silicija u metalu zavara 130

Tablica 5.16 Vrijednosti koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara 131

Tablica 5.17 Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine Si_{max} 137

Tablica 5.18 Analiza varijance matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio mangana u metalu zavara 139

Tablica 5.19 Vrijednosti koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela za izračun udjela mangana u metalu zavara 140

Tablica 5.20 Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine Mn_{max} 146

Tablica 5.21 Kemijska analiza uključaka u metalu zavara 149

Tablica 5.22 Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za sve mjerne točke 154

1. UVOD

1.1. Motivacija i obrazloženje istraživanja

Thermo Mechanical Control Process (TMCP) relativno je nov postupak proizvodnje čeličnih proizvoda prvotno razvijen u Japanu krajem 70-ih i početkom 80-ih godina prošlog stoljeća [1],[2]. Zbog kombinacije ubrzanog hlađenja i termomehaničkog procesa valjanja postižu se homogene i sitnozrnate strukture koje uz niži udio ugljika rezultiraju poboljšanom čvrstoćom, tvrdoćom i otpornošću na pojavu pukotina (spram konvencionalno dobivenih čelika), te dobrim mehaničkim svojstvima čak i na vrlo niskim temperaturama što je bitno zbog eksploatacijskih uvjeta u kojima se ti čelici vrlo često primjenjuju (područja ekstremno niskih temperatura, dna oceana i slično) [2],[4] - [6]. Osim TMCP postupka, na svojstva čelika X80 uvelike utječe i kemijski sastav (vrlo niski udio ugljika te mikrolegiranje s elementima kao Mn, Nb, V, Ti, Cu) te mikrostruktura [4] - [8]. Odgovarajućom kombinacijom kemijskog sastava, termomehaničkog procesa valjanja i ubrzanog hlađenja moguće je u niskougljičnim čelicima postići multifazne mikrostrukture koje se sastoje od ferita, perlita, bainita i martenzita. Postupkom ubrzanog hlađenja nakon kontroliranog procesa valjanja postiže se konačna mikrostruktura koja pogoduje nastanku mikrostrukturnih elemenata karakterističnih za nastanak na nižim temperaturama kao što su to bainit i martenzit-austenit (MA). Interes za poticanje stvaranja faza acikularnog (igličastog) ferita (AF) javio se tek naknadno sa saznanjem da čelici s pretežno AF+MA strukturom posjeduju bitno bolja mehanička svojstva (kombinacija čvrstoće i tvrdoće) u odnosu na čelike s pretežno bainitno i MA strukturom [9] - [12]. AF posjeduje bolja mehanička svojstva zbog svoje mikrostrukture koja je rezultat intragranularne nukleacije na nemetalnim uključcima unutar velikih zrna austenita te rasta u raznim smjerovima. Zbog opisane specifične orijentacije acikularnog ferita, ukoliko dođe do nastanka pukotine, ona mora pratiti zamršeniju putanju kroz mikrostrukturu AF-a što rezultira boljom pukotinskom žilavošću. S obzirom na osjetljivost čelika povišenih čvrstoća na unos topline, posvećuje se dodatna pozornost i zoni utjecaja topline (ZUT) gdje je uočen pad tvrdoće zbog utjecaja procesa zavarivanja te je predložena optimalna kombinacija mikrostrukturnih konstituenata u kojoj dominira AF s jednoliko raspoređenim MA konstituentima [4], [13].

Budući da je primjena visokočvrstih čelika primarno u izradi cjevovoda koji svojim dimenzijama i brojem zavarenih spojeva upućuju na odabir MIG/MAG postupka zavarivanja, potrebno je kao važan parametar zavarivanja uzeti u obzir korišteni zaštitni plin i količinu

unesene topline. Uloga zaštitnog plina je prvenstveno u tome da stvori atmosferu oko taline metala zavara koja onemogućava djelovanje (negativnih) atmosferskih utjecaja. Osim toga, zaštitni plin utječe i na stabilnost električnog luka i prijenos metala od elektrode do osnovnog materijala. Kvaliteta, učinkovitost i opća stabilnost procesa uvelike zavise od vrste zaštitnog plina jer on također utječe i na načine prijenosa metala te na sadržaj kisika, dušika i vodika u zavarenom spoju [14], [16]. Tijekom zavarivanja, ukoliko se koristi aktivni zaštitni plin (npr. mješavina Ar + CO_2), dolazi do interakcije zaštitnog plina s talinom metala zavara uzrokujući oksidaciju, koja kasnije ima za posljedicu gubitak legirnih elemenata i stvaranje uključaka u zavaru [14] - [18]. Općenito gledajući, pojava uključaka ima negativan utjecaj na mehanička svojstva zavara. No, pod određenim uvjetima, moguće je da neki oksidni uključci povoljno djeluju na pojavu i formiranje faze acikularnog ferita koja povećava tvrdoću zavara [18].

Količina kisika u čelicima tijekom njihove izrade varira između 70 ppm i 100 ppm dok se ta brojka bitno mijenja tijekom zavarivanja. U zavarenim spojevima tijekom zavarivanja dolazi do povećanja sadržaja kisika i do nekoliko stotina ppm, no procesom dezoksidacije taj se broj smanjuje te dolazi do formiranja oksidnih uključaka. Odabirom postupka zavarivanja moguće je znatno utjecati na količinu kisika u metalu zavara i to u rasponima od 110 ppm pri korištenju postupka zavarivanja praškom punjenom žicom bez plinske zaštite pa sve do 650 ppm pri korištenju MAG zavarivanja sa 100 % zaštitom CO_2 [15]. Kao što je ranije navedeno, uz zaštitni plin, na mehanička svojstva zavara velik utjecaj ima količina unesene topline koja se može regulirati načinom prijenosa metala, odnosno definiranjem parametara zavarivanja (jakosti struje, napona i brzine zavarivanja). Smanjenjem parametara (ispod 200 A i 23 V, za žicu promjera 1,2 mm) dolazi se u područje prijenosa metala kratkim spojevima koje karakterizira velika pojava prskanja kapljica [19]. Prskanje kapljica je veliki problem koji se nastoji što više smanjiti kako bi se postigle veće financijske i vremenske uštede (smanjenje vremena potrebnog za uklanjanje kapljica s konstrukcije, bolja iskoristivost dodatnog materijala u smislu da su manji gubici prilikom prskanja, manje je vremena potrebno za čišćenje sapnice...). Zavarivanje kratkim spojevima je „klasičan“ način prijenosa metala no razvojem tehnologije došlo je do razvoja nekoliko inačica MIG/MAG zavarivanja i to prvenstveno u području parametara koji definiraju kratke spojeve baš zbog pojave prskanja kapljica. Kao trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu smanjenja količine prskanja kapljica, koristi se impulsno MIG/MAG zavarivanje [20]. Kod ovog postupka izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem

impulsa (frekvencijom). Ovim načinom zavarivanja se osigurava stabilan i miran električni luk, praktički bez prskanja kapljica metala. Impulsni se luk postiže u zaštiti argona ili mješavinama bogatim argonom [21] - [24]. U svrhu još većeg smanjenja prskanja kapljica i postizanja stabilnog procesa u području kratkih spojeva, u Japanu je razvijen još jedan novi način prijenosa metala – prijenos metala kontroliranim premošćivanjem (CBT - *Controlled Bridge Transfer*)[25], [26]. Ovaj način prijenosa metala zasniva se na principu da je potrebno precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. U skladu s padom napona, u istom trenutku dolazi i do pada vrijednosti jakosti struje. Kao rezultat regulacije dinamičke karakteristike izvora, prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši se isključivo pomoću površinske napetosti. Trenutak u kojem se odvija odvajanje kapljice može zbog različitih nepravilnosti (duljina slobodnog kraja žice; brzina zavarivanja; položaj zavarivanja; veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala; ponašanje taline) varirati. Kako bi se premostile navedene prepreke, jakost struje podešava se optimalno prema varijabilnom parametru naponu električnog luka. Na taj način je moguće upravljati prijenosom metala za vrijeme kratkog spoja i stabilizirati električni luk. Opisani način prijenosa metala ima za rezultat smanjenje ili u potpunosti eliminaciju pojave prskanja kapljica, mogućnost zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima te mogućnost zavarivanja ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala (što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije) [25] - [30]. S obzirom da je u ovom doktorskom radu obrađivano zavarivanje mikrolegiranog čelika od velike je važnosti bilo definirati da li novi modificirani način prijenosa metala (CBT) utječe na odgaranje kemijskih elemenata tijekom procesa zavarivanja. Budući da je riječ o novorazvijenom načinu prijenosa metala, isti nije dovoljno istražen na području zavarivanja čelika API 5L X80.

1.2. Hipoteza rada

Cilj ovog doktorskog rada je istražiti i kvantificirati utjecaje načina prijenosa metala (konvencionalni način prijenos metala – kratki spojevi i prijelazni luk te modificirani način prijenosa metala – CBT) i zaštitnih plinova (udio CO_2 u argonu – 18 %, 59 % i 100 %) pri MAG zavarivanju visokočvrstih čelika oznake API 5L X80 na strukturu i svojstva zavarenog spoja.

Postavljene hipoteze u radu su:

1. Variranjem parametara zavarivanja kod CBT načina prijenosa metala pri MAG zavarivanju moguće je utjecati na gubitak legirnih elemenata i vrstu mikrokonstituenata u zavarenom spoju.

2. Primjenom faktorskog plana pokusa moguće je izraditi matematički model koji opisuje utjecaj variranih parametara na kemijski sastav i mikrostrukturu zavarenog spoja čelika API 5L X80.

3. Monte Carlo simulacijom izrađenog modela moguće je procijeniti utjecaj varijacije ulaznih veličina na kvalitetu rezultata mjerenja kemijskog sastava i mikrostrukture zavarenog spoja.

1.3. Sustav i organizacija provedenog istraživanja

U teoretskom dijelu rada opisana je problematika izrade i zavarivanja visokočvrstog čelika oznake API 5L X80. Posebna pozornost posvećena je utjecaju zaštitnih plinova na svojstva zavarenih spojeva te na princip rada novorazvijenog CBT MAG postupka zavarivanja. Prvi dio eksperimentalnog dijela rada sastoji se od planiranja pokusa, pripreme i zavarivanja radnih komada od čelika API 5L X80, izrade uzoraka iz zavarenih spojeva te podvrgavanja uzoraka laboratorijskim ispitivanjima. Završetak eksperimentalnog dijela rada posvećen je analizi dobivenih rezultata te diskusiji. Varirani parametri (brzina dodavanja žice, udio CO_2 u argonu, način prijenosa metala) odabrani su na temelju prijašnjih istraživanja na području zavarivanja konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja konstrukcijskih i visokočvrstih čelika kao parametri koji u velikoj mjeri utječu na kemijski sastav i mikrostrukturu zavarenog spoja. Brzina dodavanja žice varirana je na tri razine od najniže koja predstavlja stabilan proces prijenosa metala konvencionalnim načinom (prijenos metala

kratkim spojevima) do najviše koja predstavlja stabilan proces prijenosa metala modificiranim prijenosom metala (CBT MAG zavarivanje). Razine faktora brzina dodavanja žice definirane su preliminarnim ispitivanjima koja su uključivala praćenje dinamičke karakteristike. Na taj način je bilo moguće odrediti pri kojim parametrima se odvijaju stabilni procesi odvajanja kapljice dodatnog materijala. Drugi varirani parametar, udio CO_2 u argonu, definiran je kao raspon između mješavine od 18 % CO_2 (ostatak od 82 % Ar) do 100 % CO_2. Riječ je o aktivnim mješavinama što znači da tijekom zavarivanja aktivno sudjeluju u reakcijama s talinom metala zavara te na taj način utječu na kemijski i mikrostrukturni sastav zavarenog spoja. Treći varirani parametar je način prijenosa metala i to od konvencionalnog načina prijenosa kratkim spojevima i prijelaznim lukom do novorazvijenog CBT prijenosa. Promjenom načina prijenosa metala s kratkih spojeva na modificirani CBT način prijenos metala postiže se, za istu brzinu dodavanja žice kao i u slučaju zavarivanja kratkim spojevima, manji unos topline s obzirom da zbog drukčije dinamičke karakteristike parametri jakosti struje i napona poprimaju niže vrijednosti.

Za statističku analizu odabrana je metoda odzivne površine, centralno kompozitni plan pokusa, a sama analiza izvedena je pomoću programskog paketa Design Expert. Za plan pokusa odabran je centralno kompozitni ali plošno centrirani (eng. CCF – eng. *Face Centered Composite Design*), a ne češće korišteni centralno kompozitni (eng. CCC – eng. *Circumscribed Composite design*) plan pokusa. Razlog tome je činjenica da CCC plan pokusa zahtijeva 5 razina za svaki varirani numerički faktor s time da su krajnje razine na određenoj udaljenosti α od centra. Krajnje udaljenosti bi u slučaju ovog eksperimenta zahtijevale udio CO_2 veći od 100 % što nije moguće pa se iz tog razloga odabire plošno centrirani (CCF) plan pokusa. Odabirom 2 numerička (brzina dodavanja žice i udio CO_2) i 1 kategorijskog (način prijenosa metala) faktora dolazi se do 22 stanja pokusa koji uključuje 3 ponavljanja centralnih točaka plana pokusa. Za svako stanje pokusa potrebno je izraditi uzorke za kemijsku i mikrostrukturnu analizu. Uz statističku analizu se je osim programskog paketa Design Expert koristila i Monte Carlo simulacija (eng. MCS – *Monte Carlo Simulation*) koja predstavlja statističku simulaciju povezanu sa slučajnim događajima. U radu je primijenjena metoda MCS u postupku procjenjivanja utjecaja varijacije ulaznih veličina na kvalitetu rezultata mjerenja kemijskog sastava i određivanja mikrostrukture zavarenog spoja. MCS metoda provedena je primjenom računalnog programa MathCad. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlaznih veličina dobivene su konvolucijom razdioba ulaznih veličina uz M = 100000 simulacija.

Sučeljeno zavarivanje ploča dimenzija 350 mm × 150 mm × 10 mm provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. Korijenski prolaz i popune zavarenog spoja zavarene su pomoću robotske stanice OTC Almega AX V6 i automata za zavarivanje BUG-O MDS 1002. Na taj način eliminiran je utjecaj ljudskog faktora te su pruženi jednaki uvjeti zavarivanja za izradu svakog uzorka. Nakon završenog zavarivanja ploča, izrađeni su i pripremljeni uzorci za daljnju karakterizaciju. U tu svrhu provedena su sljedeća ispitivanja:

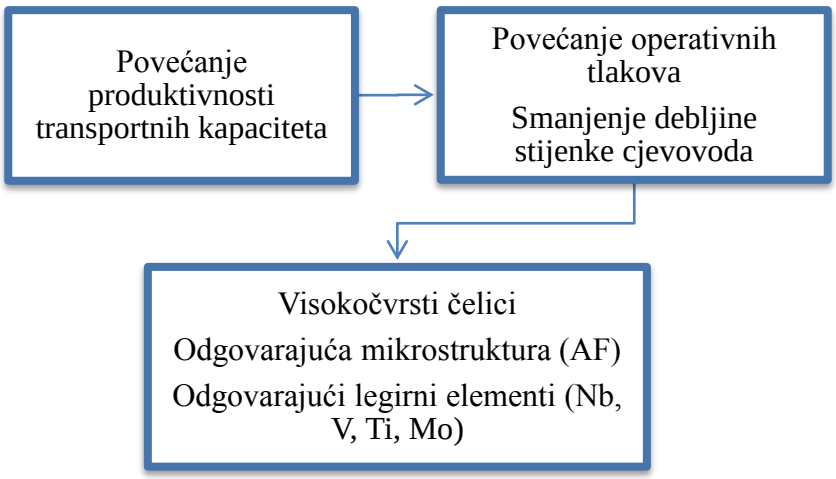
- Pomoću optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem (eng. GDOES – *Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy*) određen je kemijski sastav osnovnog metala i metala zavara.
- Svjetlosnim mikroskopom analizirane su geometrijske karakteristike profila zavara (širina, penetracija i nadvišenje) i mikrostrukturne razlike između osnovnog metala i metala zavara.
- Skenirajućom elektronskom mikroskopijom uz energijski razlučujuću rendgensku spektrometriju analizirana je mikrostruktura (udio acikularnog ferita) i elementni sastav uključaka unutar metala zavara.
- Mikrotvrdoća pojedinih prolaza popune i osnovnog materijala mjerena je prema Vickers metodi (HV 0,2).

Sva navedena ispitivanja u potpunosti su izvedena u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Nakon svih izvedenih ispitivanja, prikupljeni rezultati i podaci o kemijskom i mikrostrukturnom sastavu zavarenog spoja detaljno su statistički analizirani pomoću programskog paketa Design Expert. Kao rezultat analize, izrađeni su matematički modeli iz kojih je vidljiva značajnost utjecaja variranih faktora i njihovih interakcija na ispitivana svojstva zavarenog spoja. Također je pomoću računalnog programa MathCad procijenjen utjecaj varijacije ulaznih veličina na kvalitetu dobivenih rezultata.

2. SVOJSTVA I RAZVOJ VISOKOČVRSTIH ČELIKA

Masovna industrijska proizvodnja cijevi započela je još u prvoj polovici 19.-tog stoljeća razvojem tehnologije valjanja. Valjane ploče tada su se oblikovale u cijevi i spajale sučeljenim ili preklopnim zavarenim spojevima. Daljnjim razvojem proizvodnih tehnologija, krajem 19.-tog stoljeća proizvodnja bešavnih cijevi doživjela je veliki procvat. Zbog svojih izvrsnih operativnih karakteristika bešavne cijevi su sve do II Svjetskog rata sačinjavale veliku većinu tržišta. Nakon tog razdoblja, dolazi do brzog i velikog napretka na području tehnologije zavarivanja što rezultira ponovnom sve većom potražnjom za zavarenim šavnim cijevima. Tijekom druge polovice 20.-tog stoljeća postavljaju se sve stroži zahtjevi na materijale i to s naglaskom na povećanje kapaciteta cjevovoda (Slika 2.1). Trenutno se u svijetu 2/3 proizvedenog čelika odnosi na proizvodnju zavarenih cijevi i 1/4 od te količine otpada na takozvane cijevi za cjevovode velikih promjera [31]. Kako bi se omogućilo povećanje kapaciteta, potrebno je bilo povećati tlakove u cijevima, a s time se povećava i debljina stijenke cjevovoda. Da bi se ispunili navedeni zahtjevi za povećanjem kapaciteta ali bez povećanja debljine stijenki potrebno je bilo razviti materijale s većom čvrstoćom koji bi podnosili operativne tlakove od 70 bara (70 × 100 kPa) s tendencijom porasta i preko 100 bara (100 × 100 kPa) [4], [7], [8], [31] - [33], [35].

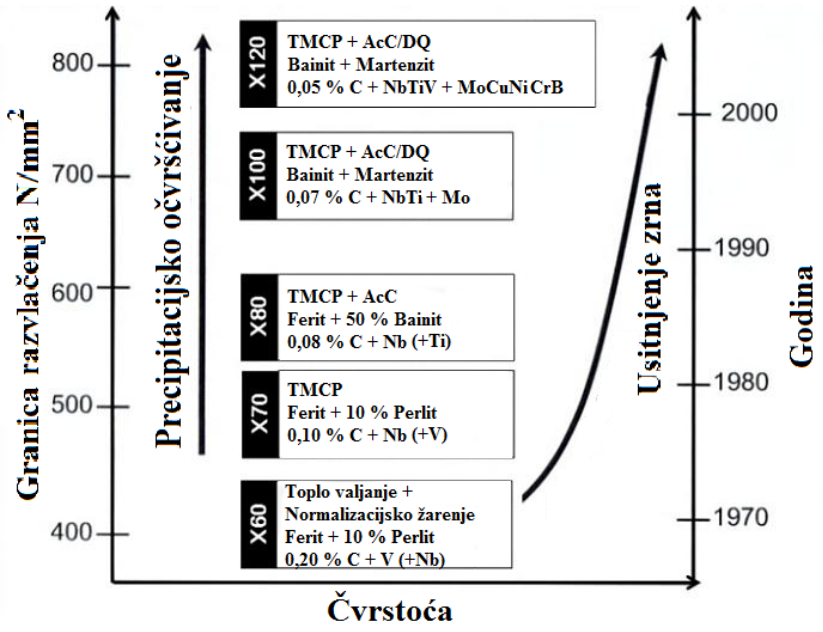


Slika 2.1 Zahtjevi za povećanje produktivnosti transportnih kapaciteta

Tijekom 60.-tih godina prošlog stoljeća korišteni su visokočvrsti čelici feritno-perlitne strukture koji su posjedovali mehanička svojstva potrebna za zahtjevne konstrukcije, no zahtjevi na konstrukcije od visokočvrstih čelika postajali su sve stroži. Zbog potrebnog smanjivanja debljina stijenki, neophodno je bilo razviti/koristiti čelike sa sve većom granicom razvlačenja (kako bi mogli podnijeti sve veća opterećenja), zbog korištenja čelika u okolišnim uvjetima pri niskim temperaturama, potrebno je bilo razviti, odnosno koristiti čelike sa što nižom temperaturom prelaska iz žilavog u krhki lom, te je konačno radi njihova spajanja bilo potrebno poboljšati im zavarljivost.

Zbog navedenih zahtjeva početkom 70.-tih godina prošlog stoljeća dolazi do razvoja čelika s niskim udjelom ugljika, odgovarajućim udjelima legirnih elemenata i mikrostrukturnih konstituenata. Visokočvrsti čelici u pravilu sadrže nizak udio ugljika i isto tako nizak udio legirnih elemenata kao što su npr. Nb, V, Ti i Mo [5], [36], [37]. Najučinkovitiji način za poboljšanje mehaničkih svojstava preko kontrole mikrostrukturnih konstituenata predstavlja TMCP postupak izrade čelika. Proces se bazira na poboljšanju mehaničkih svojstava preko optimizacije mikrostrukture tijekom toplinsko mehaničkog valjanja (eng. *Thermo Mechanical Rolling*) i kasnijeg ubrzanog hlađenja (eng. *Accelerated cooling*) [1].

Slika 2.2 prikazuje pregled razvoja visokočvrstih mikrolegiranih čelika tijekom proteklih desetljeća.



Slika 2.2 Razvoj visokočvrstih mikrolegiranih čelika [5]

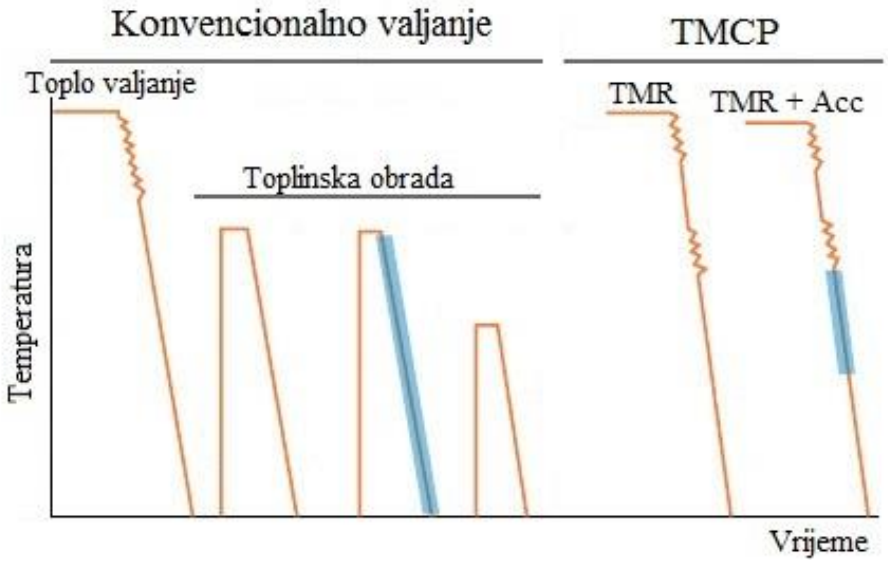
Razvojem ranije spomenute tehnologije izrade čeličnih proizvoda uslijedio je i razvoj čelika oznake API X70 i više. Visokočvrsti čelici oznake X70 i više posjeduju vrlo sitnu mikrostrukturu i dobru čistoću, a karakterizira ih vrlo nizak sadržaj sumpora i smanjena količina sekundarnih faza kao što su to oksidi, uključci i perlit [5].

Sa slike 2.2 je moguće uočiti da se razvojem novih čelika djelovalo na smanjenje udjela ugljika i povećanje broja legirnih elemenata što je rezultiralo usitnjavanjem zrna te povećanjem granice razvlačenja i čvrstoće.

2.1. TMCP postupak izrade čelika

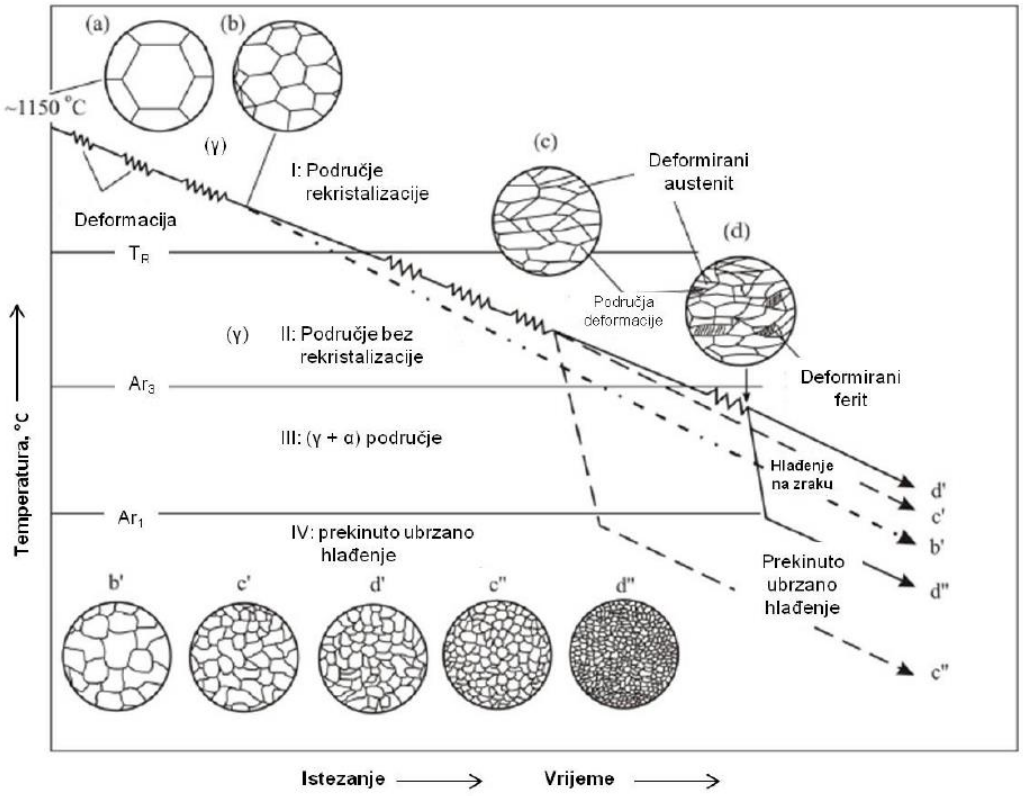
Kako bi se postigla sitnozrnata struktura te na taj način dobila bolja mehanička svojstva čelika (čvrstoća, tvrdoća, otpornost na širenje pukotina), u postojeći proces izrade termomehanički obrađenih čelika, dodaje se postupak ubrzanog hlađenja. Postupak je prvi put predstavljen u Japanu krajem 70-ih i početkom 80-ih godina prošlog stoljeća i od tada predstavlja najveći napredak u proizvodnji čelika i metalurgiji općenito [1], [2], [5].

Prije nastanka TMCP postupka, valjanje se koristilo samo za postizanje konačnih dimenzija čeličnih ploča (debljine, širine i visine). Ukoliko su postojali dodatni zahtjevi za kvalitetom, nakon postupka valjanja na čelične proizvode primijenile su se naknadne toplinske obrade kaljenja, popuštanja ili normalizacijskog žarenja [40]. Daljnjim podizanjem zahtjeva za povećanjem mehaničkih svojstava, potrebno je bilo ipak razviti novi proces valjanja koji bi rezultirao čeličnim proizvodima tražene kvalitete, te je tako došlo do razvoja TMCP postupka. Prema IACS-u (*International Association of Clasification Societies*) TMCP postupak se sastoji od toplinsko-mehaničkog procesa valjanja i ubrzanog hlađenja. Slika 2.3 prikazuje shematski prikaz TMCP postupka. Ono što daje veliku prednost TMCP postupku u smislu energetske učinkovitosti procesa je činjenica da se tražena mehanička svojstva postižu odmah nakon toplinsko-mehaničkog procesa valjanja bez potrebe za naknadnom toplinskom obradom kao što je to potrebno kod konvencionalnog valjanja [41].



Slika 2.3 Usporedni shematski prikaz konvencionalnog i TMCP valjanja [42]

Kao što je i ranije navedeno, TMCP postupak se koristi kako bi se postigla tražena mikrostruktura. Slika 2.4 prikazuje promjene u mikrostrukturi tijekom TMCP procesa valjanja. Krajnja svrha toplinsko mehaničkog procesa valjanja je postizanje sitnozrnate mikrostrukture sačinjene od ferita (α) u čelicima s niskim udjelom ugljika. Tijekom valjanja na visokim temperaturama u austenitnom području (γ), austenitna rekristalizacija odvija se velikom brzinom nakon plastične deformacije (valjanja). S obzirom da granice zrna austenita predstavljaju područja nukleacije ferita, usitnjenje zrna austenita putem mehanizma rekristalizacije predstavlja vrlo učinkovit način kasnijeg razvoja sitnozrnatog ferita. No, bitno je napomenuti da je usitnjenje zrna putem rekristalizacije ograničeno budući da se veličina zrna povećava s porastom temperature. U slučaju kada se deformiranje (valjanje) odvija na nižim temperaturama, ono predstavlja puno bolje rješenje jer rezultira strukturom sačinjenom od nerekristaliziranog austenita. Nerekristalizirani austenit zajedno s dislokacijama daje bolje uvjete za razvoj sitnozrnatog ferita od rekristaliziranog austenita budući da dislokacije predstavljaju nukleacijske točke razvoja ferita. Tijekom TMCP valjanja (u literaturi se često naziva i kontrolirano valjanje), legirni elementi (Nb i Ti) dodaju se kako bi se raspršili nastali karbidi i nitridi u austenitnoj matrici. Spomenuti legirni elementi koriste se kako bi usporili proces rekristalizacije austenita te na taj način osigurali nepotpuno rekristalizirane austenitne strukture dok ne završi faza pretvorbe austenita u ferit.

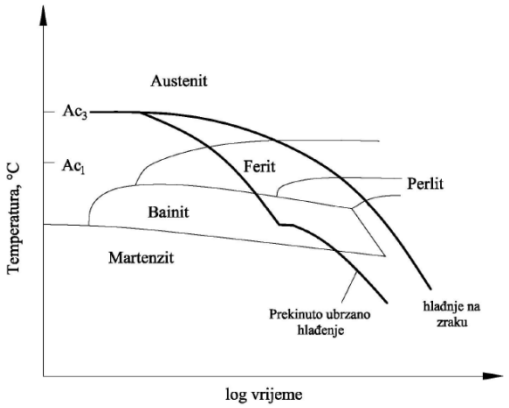


Slika 2.4 Promjena mikrostrukture tijekom TMCP postupka [43]

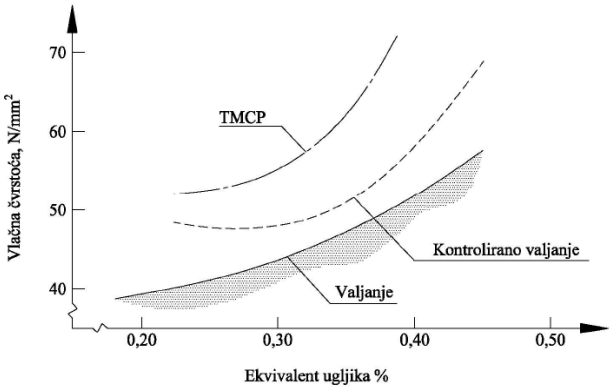
Ubrzano hlađenje predstavlja još jedan čimbenik koji pozitivno utječe na nastanak sitnozrnatog ferita budući da se zbog velike brzine hlađenja javlja velika sila koja djeluje na transformaciju faza i na taj način povećava učestalost nukleacije. I u ovom slučaju nitridi i karbidi imaju ulogu sprečavanja rasta austenitnih zrna. Tijekom konvencionalnog procesa valjanja promjeri zrna austenita kreću se oko 5μm dok se primjenom TMCP postupka, veličina austenitnog zrna smanjuje i do promjera od 1μm [44],[45].

Nakon izvršenog kontroliranog procesa valjanja u području ne-rekristalizacije dobije se mikrostruktura austenita koji se dalje transformira u acikularni ferit ili gornji bainit tijekom procesa ubrzanog hlađenja (Slika 2.5) [2]. Na taj način, putem TMCP postupka dobiva se čelik mikrostrukture koja se sastoji od igličastog ferita umjesto feritno perlitne strukture karakteristične za konvencionalne čelike. Čelici s mikrostrukturom igličastog ferita imaju veću čvrstoću uz dobru žilavost [46]. Slika 2.6 prikazuje odnos ekvivalenta ugljika (C_{ekv}) i vlačne čvrstoće za različite čelike. Sa slike je moguće vidjeti koliki utjecaj ima način

proizvodnje na mehanička svojstva čelika – TMCP čelici imaju za isti ekvivalent ugljika veću čvrstoću od konstrukcijskih čelika u prosjeku za cca 20 %, a u nekim slučajevima i više.



Slika 2.5 TTT dijagram za konstrukcijski čelik s različitim brzinama hlađenja [40]



Slika 2.6 Odnos ekvivalenta ugljika i vlačne čvrstoće [40]

Ukratko, TMCP postupak je već uvelike prihvaćen proizvodni proces kojim je moguće postići visoku čvrstoću s relativno malim udjelima legirnih elemenata. Rezultat je to mikrostrukture postignute toplinsko-mehaničkim procesom valjanja i ubrzanim hlađenjem. No, bitno je naglasiti da je ove rezultate teško postići kod debljih ploča jer kod njih nije moguće postići tako velike brzine hlađenja kao što je to moguće kod tanjih ploča. Također je kod debljih ploča problem u nekonzistentnosti mehaničkih svojstava po presjeku koje su uzrokovane strukturnom nehomogenošću nastalom pri plastičnom deformiranju i nejednakim brzinama hlađenja (gledano po presjeku) [47].

2.2. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva visokočvrstih čelika

Kemijski sastav visokočvrstih čelika može uvelike varirati ovisno o debljini konačnog proizvoda kako bi se osigurala tražena mehanička svojstva. Uobičajeno je da sadrže do 2 % mangana u kombinaciji s vrlo malim udjelom ugljika (< 0,10 %) te uz dodatak ostalih legirnih elemenata kao na primjer niobij, vanadij, titan, molibden i bor [5]. Glavni zadatak legirnih elemenata je očvršćivanje feritne faze putem raznih mehanizama: usitnjavanje zrna, čvrstom otopinom ili precipitacijski. Očvršćivanje čvrstom topivošću se povezuje s udjelom legirnih elemenata dok se druga dva mehanizma temelje na interakciji kemijskog sastava i TMCP postupka. Iz toga proizlazi da određena kombinacija legirnog elementa i brzine hlađenja

diktira određeni tip i udio faze koji će nastati u proizvodnji odabranog čelika u odabranim uvjetima [48], [49].

Legirni elementi koji se koriste pri izradi visokočvrstih čelika (Cr, W, Mo, V, B, Ti, Nb, Ta, Zr, Ni, Mn i Al) imaju različite utjecaje na njihova svojstva. Oni formiraju uključke i precipitate kao što su to npr. nitridi, karbidi, karbonitridi i razni drugi te na taj način sprječavaju rast zrna. Kako bi se spriječio rast zrna austenita, ne smije se prekoračiti maksimalna temperatura (koja zavisi od legirnih elemenata) na kojoj karbidi i nitridi prelaze u austenit. Titan, niobij, cirkonij i vanadij predstavljaju elemente koji također imaju pozitivno djelovanje u sprečavanju rasta zrna, no kod TMCP čelika oni mogu imati negativan utjecaj na čvrstoću jer njihovi karbidi su stabilni i teško prelaze u austenit prije ubrzanog hlađenja [50]. Kratki pregled učinaka glavnih legirnih elemenata dan je u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Glavni učinci legirnih elemenata u visokočvrstim čelicima [5]

Element, maseni udio, %	**Učinak i razlog dodavanju**
C – ugljik (0,03 – 0,10)	✓ Očvrsnuće matrice (preciptacijom)
Mn – mangan (1,6 – 2,0)	✓ Odgađa razlaganje austenita prilikom ubrzanog hlađenja ✓ Snižavanje temperature prelaska u krhki lom ✓ Obavezan u svrhu postizanja sitnozrnate strukture donjeg bainita
Si – silicij (< 0,6)	✓ Poboljšanje čvrstoće (kroz čvrstu topivost)
Nb – niobij (0,03 – 0,06)	✓ Smanjuje temperaturno područje u kojem je moguća rekristalizacija tijekom procesa valjanja ✓ Usporavanje rekristalizacije i onemogućavanja rasta zrna austenita (poboljšava čvrstoću i tvrdoću putem usitnjavanja zrna)
Ti – titan (0,005 – 0,03)	✓ Usitnjavanje zrna onemogućavanjem rasta zrna austenita (formiranje TiN) ✓ Jako djelovanje na očvršćivanje ferita

Nastavak tablice 2.1.

Element, maseni udio, %	Učinak i razlog dodavanju
Ni – nikal (0,2 – 1,0)	✓ Poboljšava svojstva niskougljičnih čelika bez negativnog utjecaja na zavarljivost i tvrdoću na niskim temperaturama ✓ Za razliku od Mg i Mo, Ni potiče formiranje manje tvrdih mikrostrukturnih konstituenata koji imaju negativan utjecaj na tvrdoću na niskim temperaturama (poboljšava lomnu čvrstoću)
V – vanadij (0,03 – 0,08)	✓ Tijekom procesa temperiranja pospješuje precipitacijsko očvršćivanje ✓ Jako djelovanje na očvršćivanje ferita
Mo – molibden (0,2 – 0,6)	✓ Poboljšava povećanje tvrdoće i na taj način potiče razvoj donjeg bainita

Ugljik

Povećanjem udjela ugljika u sastavu čelika, povećava se i udio perlita, a samim time se utječe na porast vlačne čvrstoće. Utjecaj na povećanje granice elastičnosti je nešto manji s obzirom da gibanje dislokacija počinje u mekanim zrnima ferita. Povećanje vlačne čvrstoće i granice elastičnosti moguće je postići legiranjem samo ugljikom te ukoliko bi se dodao i fosfor moguće je postići razne omjere spomenutih svojstava. No, to u praksi nije izvedivo jer ugljik i fosfor u istom trenu (nepovoljno) utječu na zavarljivost i sklonost pojavi krhkog loma. Posljednjih godina je udio ugljika u čelicima s feritno-perlitnom strukturom smanjen s 0,28 % na 0,12 %. Smanjenje udjela ugljika kompenziralo se legiranjem s drugim legirnim elementima. Međutim, ugljik ostaje najvažniji legirni element (uz niobij) kada je riječ o reguliranju utjecaja na čvrstoću i tvrdoću, zavarljivost, sklonost pojave pukotina u ZUT-u, vodikovu krhkost i napetosnu koroziju [31].

Aluminij

Aluminij se najčešće primjenjuje kao element za dezoksidaciju i bio je prvi element korišten u kontroli rasta austenitnog zrna tijekom ponovnog zagrijavanja čelika. Veže na sebe

dušik i time smanjuje opasnost od pojave starenja, te jako sužava austenitno područje [51]. U reakciji aluminija i silicija s kisikom formiraju se oksidi koji za razliku od TiO precipitata ne stvaraju mjesta inicijacije pukotina. Iako se aluminij dugi niz godina koristi kao dezoksidant, kod visokočvrstih čelika se pokazalo da bolji doprinos usitnjenju zrna imaju elementi niobij i titan. Visoki udio aluminija utječe na pad tvrdoće zbog poticanja formiranja usmjerene orijentacije ferita i gornjeg bainita. Slobodni aluminij potiče formiranje MA otoka koji su bogati ugljikom što onemogućava difuziju ugljika i stvaranje karbida [50].

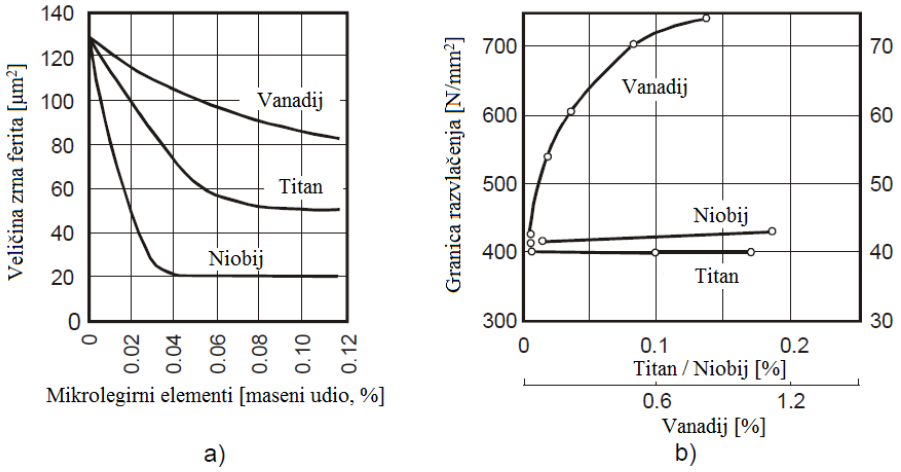
Silicij

Silicij je također dobar dezoksidant pa se kao takav koristi pri proizvodnji čelika. Povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje. Naročito jako djeluje na povišenje granice elastičnosti, a povisuje dinamičku izdržljivost. Pri toplinskoj obradi čelici legirani sa silicijem pokazuju sklonost razugljičenju površine, a pri cementiranju silicij otežava difuziju ugljika u čelik. Blago povećava prokaljivost čelika [51]. Silicij u čeliku formira spoj Fe_2SiO_4 (željezni silikat fajalit) koji onemogućuje razvoj pora. Uspoređujući dezoksidaciju putem silicija i aluminija, bitno je napomenuti da se uporabom silicija postižu niži udjeli dušika u čeliku. Vezivanjem silicija s ugljikom moguće je izbjeći pojavu toplih pukotina. Povećanjem udjela silicija potiče se razvoj ferita i istovremeno smanjenje udjela perlita što rezultira padom čvrstoće. Putem mehanizma precipitacijskog očvršćavanja, silicij (kao i mangan) djeluje na povećanje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Negativni utjecaji silicija očituju se u formiranju silikatnih uključaka koji utječu na rad udarne radnje loma. Kao i ugljik i fosfor, silicij također utječe i na zavarljivost čelika [31].

Niobij, titan, vanadij

Legirni elementi niobij, titan i vanadij elementi su koji osim što potiču stvaranje nitrida utječu i na vlačnu čvrstoću čelika i to zbog utjecaja na proces rekristalizacije i transformacije i to već s legiranjem u vrlo malim količinama. Zbog činjenice da je vanadij potpuno topiv na temperaturi austenitizacije (vanadijev nitrid je najnestabilniji na temperaturama između 1090 °C i 1120 °C), on utječe na transformaciju austenita u ferit kao element u kristalima mješancima. Za razliku od vanadija, niobij i titan imaju isti utjecaj kao sami elementi ali i kao precipitati (njihovi nitridi i karbidi su topivi na višim temperaturama i to od 1220 °C do 1350 °C). Dakle, legirni elementi niobij, titan i vanadij koriste se za normalizaciju kao i termomehaničku obradu čelika primarno u svrhu regulacije veličine zrna austenita. Postizanjem sitne austenitne strukture postiže se također nakon transformacija i

sitna feritna struktura (Slika 2.7). Iako niobij, titan i vanadij pozitivno utječu na čvrstoću, također postoji i negativan utjecaj na tvrdoću. Na djelovanje spomenutih legirnih elemenata moguće je utjecati drugim legirnim elementima kao što su npr. mangan, krom bakar i nikal [31].



Slika 2.7 Utjecaj legirnih elemenata niobija, titana i vanadija na:
a) veličinu zrna ferita; b) granicu razvlačenja [167]

Niobij kao legirni element u visokočvrstim čelicima igra vrlo važnu ulogu. No, bitno je napomenuti da utjecaj niobija na svojstva ZUT-a nije samostalan nego se utjecaj očituje u kombinaciji niobija s vanadijem i titanom i njihovim precipitatima. Utjecaj niobija na svojstva zavarenog spoja uvelike ovisi o količini unesene topline. Ukoliko se zavarivanje izvodi s nižim unosom topline, niobij će djelovati pozitivno na udarnu radnju loma, dok će, ukoliko se zavaruje s većim unosom topline, djelovati negativno. U određenim količinama (0,02 % – 0,05 % masenog udjela) niobij povećava temperaturu na kojoj dolazi do rekristalizacije austenita i omogućava povećanje tvrdoće formirajući toplinski stabilne Nb(C,N) i Nb, Ti(C,N) precipitate. Ti precipitati ograničavaju rast austenitnih zrna u zoni utjecaja topline tijekom procesa zavarivanja i na taj način poboljšavaju zavarljivost. Prekomjerno legiranje s niobijem (> 0,5 % masenog udjela) može rezultirati narušavanjem tvrdoće kod zavara zavarenih s velikim unosom topline [50].

Gledajući sa stanovišta zavarivanja čelika, titan predstavlja najbitniji legirni element i to iz razloga što titanovi nitridi koji nastaju na visokim temperaturama ograničavaju rast zrna u zoni utjecaja topline. Ono što ga izdvaja kao legirni element je i činjenica da pozitivno utječe i na precipitacijsko očvršćivanje kao i na oblik sulfida. Male količine titana (< 0,025 %

masenog udjela) se kod visokočvrstih čelika koriste i u svrhu kontrole rasta austenitnih zrna ali samo u slučaju smirenih (aluminijem dezoksidiranih) čelika jer ima vrlo velik dezoksidirajući potencijal [50]. Zbog svog djelovanja na usitnjavanje zrna ali i precipitacije titanovih karbida i/ili nitrida titan ima povoljno djelovanje na rast čvrstoće uz gotovo nikakav utjecaj na sklonost pojavi krhkog loma. Ukoliko je titan prisutan u čeliku u dovoljnim količinama on veže na sebe sumpor i kao rezultat toga čelik postaje vrlo dobro hladno oblikovljiv te mu mehanička svojstva postanu gotovo neovisna o smjeru valjanja [31].

Vanadij kao legirni element utječe na povišenje temperature rekristalizacije austenita. Omogućava očvršćivanje na sobnoj temperaturi zahvaljujući formiranju VN, V(C,N) i (V, Ti)N precipitata u feritu. Vanadij djeluje povoljno na čvrstoću pomoću dva mehanizma; precipitacijsko očvršćivanje ferita i usitnjavanje zrna ferita pomoću nastalih precipitata. Precipitacija vanadij karbonitrida u feritu može rezultirati značajnim porastom tvrdoće koji ne samo da je rezultat valjanja već i kemijskog sastava osnovnog materijala. Udio ugljika u materijalu u rasponu od 0,13 % do 0,15 % zajedno s udjelom mangana od 1 % potiče proces precipitacijskog očvršćivanja, pogotovo ako uz to postoji i udio dušika od najmanje 0,01 %. Usitnjavanje zrna zavisi od parametara toplog valjanja kao i udjela vanadija [50]. Veći udjeli ovog legirnog elementa mogu uzrokovati povećanu sklonost krhkom lomu. Zbog toga se preporuča izbjegavati veće udjele vanadija koristeći druge legirne elemente kao npr. nikal [31].

Molibden

Molibden se primarno koristi zbog svog utjecaja na transformacijske procese prilikom kontinuiranog hlađenja. Ima snažno djelovanje na usporavanje formiranja ferita i nešto manje djelovanje na usporavanje formiranja bainita. Kao zasebni element ili u kombinaciji s manganom i niobijem potiče formiranje sitnozrnate mikrostrukture. Sitna zrna, velika gustoća uključaka i sitni niobij-molibden-karbonitridi unutar strukture rezultiraju čelicima s višom vlačnom čvrstoćom. Opisana struktura također se može postići ukoliko se molibden u potpunosti zamijeni s bakrom, kromom i niklom [50]. U pravilu se kombinira s drugim elementima. Utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, kao i granice puzanja [51].

Mangan

Mangan snižava temperaturu transformacije austenita tako da se do kraja procesa valjanja mikrostruktura sastoji od sitnog austenita koji se tijekom hlađenja nakon valjanja transformira u ferit. Na isti način nastaju i sitni karbidi. Postignutom mikrostrukturom dolazi do povećanja tvrdoće kao i čvrstoće. Povećanjem udjela mangana preko 1 % čelik postaje osjetljiv na pojavu pukotina uzrokovanih vodikom. Razlog tome je nastanak nehomogene strukture s velikim područjima perlita koja predstavljaju mjesta nastanka pukotina. Mangan kao legirni element utječe i na djelovanje titana vežući na sebe sumpor i ometajući nastanak titanovih sulfida i titanovih karbosulfida. Osim spomenutog sumpora, mangan veže na sebe i kisik te na taj način sprečava pojavu toplih pukotina [31]. Legiranjem manganom također se utječe i na temperaturu prelaska materijala u krhki lom [5].

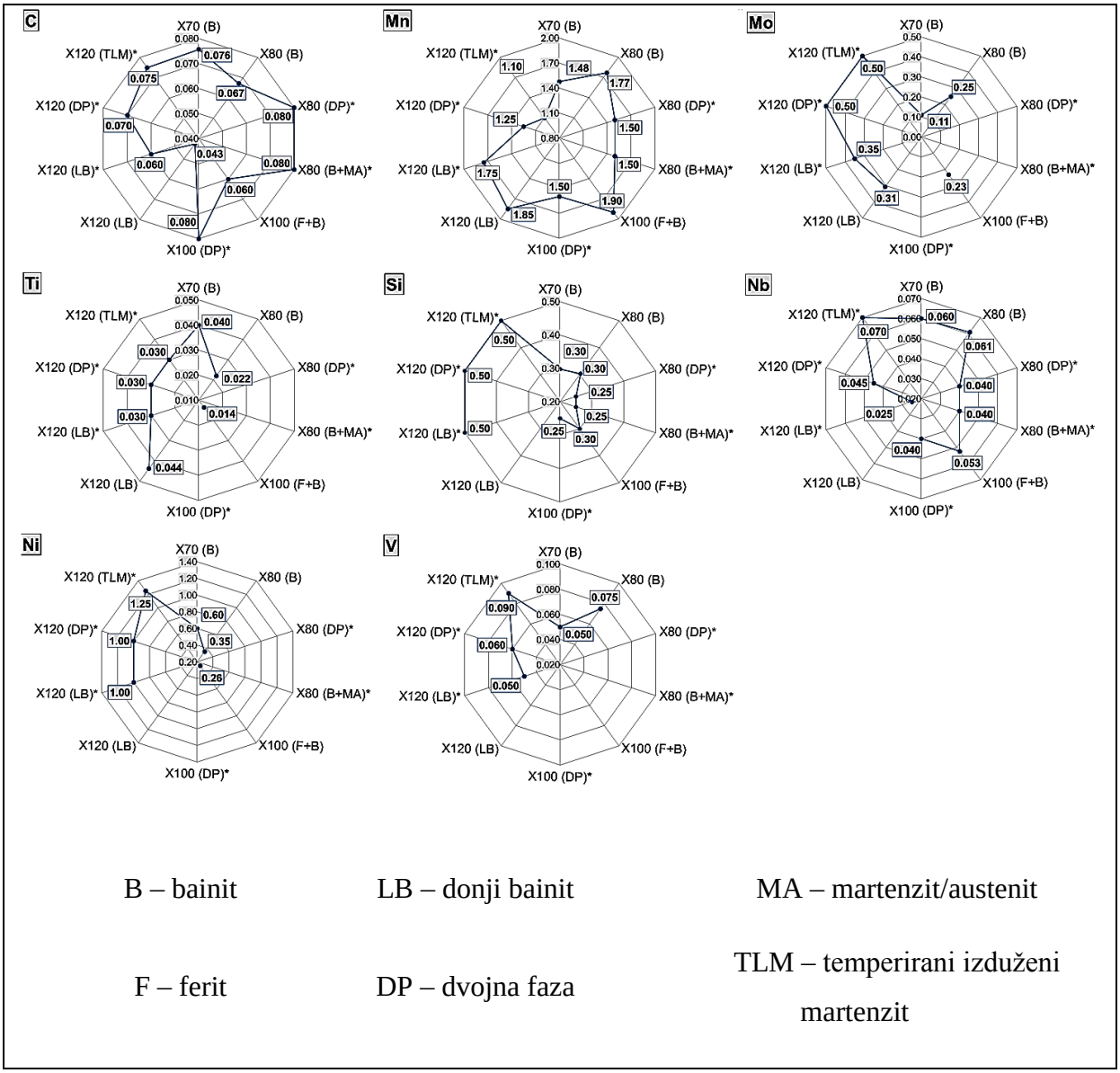
Bakar, krom i nikal

Legirni elementi bakar, krom i nikal utječu na povećanje vlačne čvrstoće, usitnjavanje zrna i snižavanje temperature transformacije austenita. Navedeni učinci još dodatno pojačavaju djelovanje niobija i vanadija u području precipitacijskog očvrsnuća. Za poticanje razvoja sitnozrnate mikrostrukture se umjesto bakra, nikla i kroma može koristiti i molibden. Zbog veće tvrdoće kromovih karbida od željeznih karbida, krom se koristi u svrhu postizanja tražene tvrdoće. Nikal kao legirni element pojačava djelovanje titana [52].

Fosfor

Legiranjem fosforom može se djelovati na povećanje vlačne čvrstoće i granice razvlačenja ali u istom trenu je moguće i povećati sklonost krhkom lomu i imati negativan utjecaj na zavarljivost [31].

Pregled kemijskog sastava različitih čelika za proizvodnju cijevi dan je na slici 2.8. Na slici su navedeni „konvencionalni“ i „modificirani“ (označeni s *) čelici.



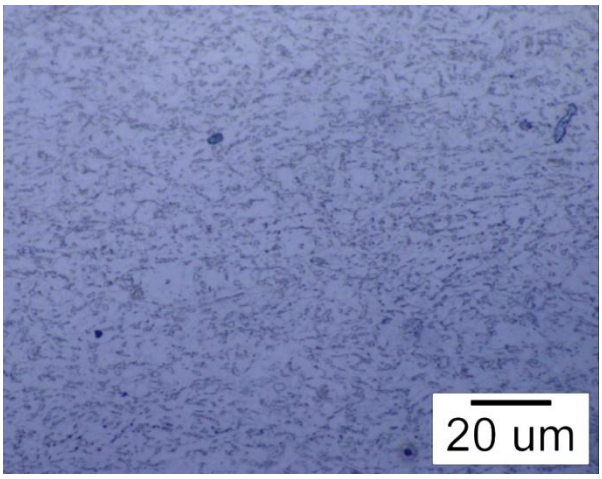
B – bainit LB – donji bainit MA – martenzit/austenit

F – ferit DP – dvojna faza TLM – temperirani izduženi martenzit

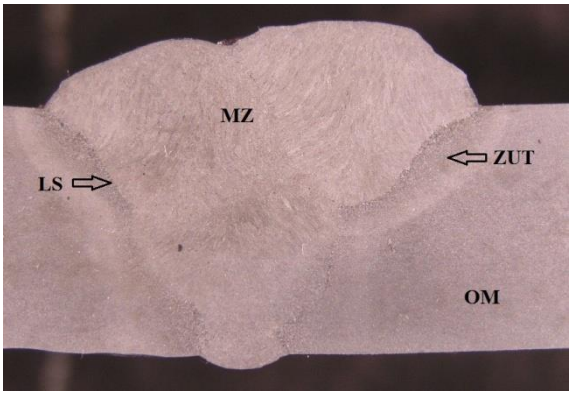
Slika 2.8 Pregled kemijskog sastava različitih API 5L čelika [5]

2.3. Mikrostruktura zavarenog spoja visokočvrstih čelika

Mikrostruktura osnovnog materijala kod visokočvrstih čelika homogena je i veličina zrna je ujednačena i pravilna (Slika 2.9). No zbog unosa topline tijekom zavarivanja ta ujednačena mikrostruktura se u metalu zavara, liniji staljivanja i zoni utjecaja topline mijenja. Nakon izvršenog zavarivanja, zavareni spoj se sastoji od 4 različita mikrostrukturna područja: osnovni materijal (OM), zona utjecaja topline (ZUT), linija staljivanja (LS) i metal zavara (MZ) (Slika 2.10).



Slika 2.9 Mikrostruktura osnovnog materijala čelika API 5L X80

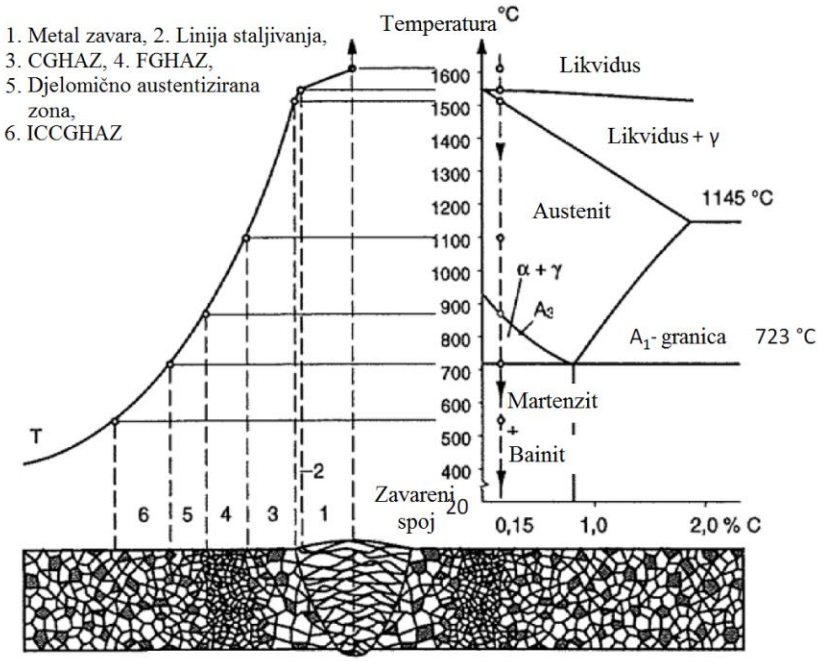


Slika 2.10 Karakteristična područja zavarenog spoja

Linija staljivanja predstavlja usko područje u kojem dolazi do djelomičnog staljivanja, a nalazi se s vanjske strane metala zavara i odijeljuje zonu utjecaja topline od metala zavara [53].

Zona utjecaja topline obuhvaća područje osnovnog materijala u kojem nije došlo do taljenja osnovnog materijala, a nastaje djelovanjem unosa topline tijekom procesa zavarivanja. Unos topline ne doseže vrijednosti temperature taljenja osnovnog materijala no ipak dolazi do strukturnih promjena. Područje ZUT-a se smatra nepoželjnim zbog grube mikrostrukture koja omogućava jednostavnu propagaciju pukotina te je najčešće područje pojave grešaka [54]. Zbog naglog pada temperature s odmakom od metala zavara rast zrna se usporava u istom smjeru. Na temelju toga moguće je razlikovati područje grubozrnate (eng. CGHAZ – *Coarse Grained Heat Affected Zone*) i sitnozrnate (eng. FGHAZ – *Fine Grained Heat Affected Zone*) zone utjecaja topline kao što je vidljivo na slici 2.11. Grubozrnata zona

utjecaja topline se nalazi odmah do linije staljivanja i rezultat je većeg unosa topline. Kao rezultat spomenute nepovoljne mikrostrukture, grubozrnata zona utjecaja topline predstavlja područje u kojem je zapažena povećana krhkost i to posebice u kritičnoj grubozrnatoj zoni utjecaja topline uzrokovanom višeslojnim zavarivanjem (eng. ICCGHAZ – *Intercritically Reheated Coarse Grained Heat Affected Zone*) tijekom višeprolaznog zavarivanja [4]. Sitnozrnata zona utjecaja topline se nalazi do osnovnog metala i označava područje manjeg unosa topline i minimalnog pogrubljivanja zrna [54]. Širina zone utjecaja topline uvelike ovisi o unosu topline i vremenu hlađenja s 800°C na 500°C ($t_{8/5}$) [50]. Što je veći unos topline ili manja brzina zavarivanja, to će brzina hlađenja biti manja. Obrnuti uvjeti rezultiraju većim brzinama hlađenja. Općenito govoreći, ZUT predstavlja kritično područje zavarenog spoja s obzirom na poznatu promjenu mehaničkih svojstava u tom području nakon procesa zavarivanja [4], [55].



Slika 2.11 Raspon temperatura u osnovnom metalu tijekom zavarivanja i mikrostrukturne zone ZUT-a [50]

Područje osnovnog materijala sadrži istu mikrostrukturu kao i ostatak materijala u dostavljenom stanju. Zrna osnovnog materijala u blizini sitnozrnate zone utjecaja topline mogu zbog utjecaja unosa topline izgubiti svoju orijentaciju dobivenu procesom valjanja i na

taj način se formira djelomično austenitizirana zona. U djelomično austenitiziranoj zoni maksimalna dosegnuta temperatura tijekom zavarivanja nije dovoljna da se u potpunosti odvije austenitizacija što za posljedicu ima djelomično izvršenu austenitizaciju i mogućnost pojave zaostalih naprezanja uzrokovanih skrućivanjem ili transformacijom [54].

Metal zavara nastaje procesom taljenja i skrućivanja, a sastoji se od osnovnog i dodatnog materijala. Formiranje različitih faza unutar zavarenog spoja (ferit – perlit, acikularni ferit, bainitni ferit, martenzit i martenzit-austenit) zavise od mehanizma transformacijske kinetike austenita. Konačna mikrostruktura metala zavara podložna je utjecaju raznih faktora kao što su utjecaj toplinskih procesa (unos topline i brzina hlađenja), kemijski sastav (osnovnog i dodatnog materijala), veličina zrna osnovnog materijala te broj prolaza u zavarenom spoju [56].

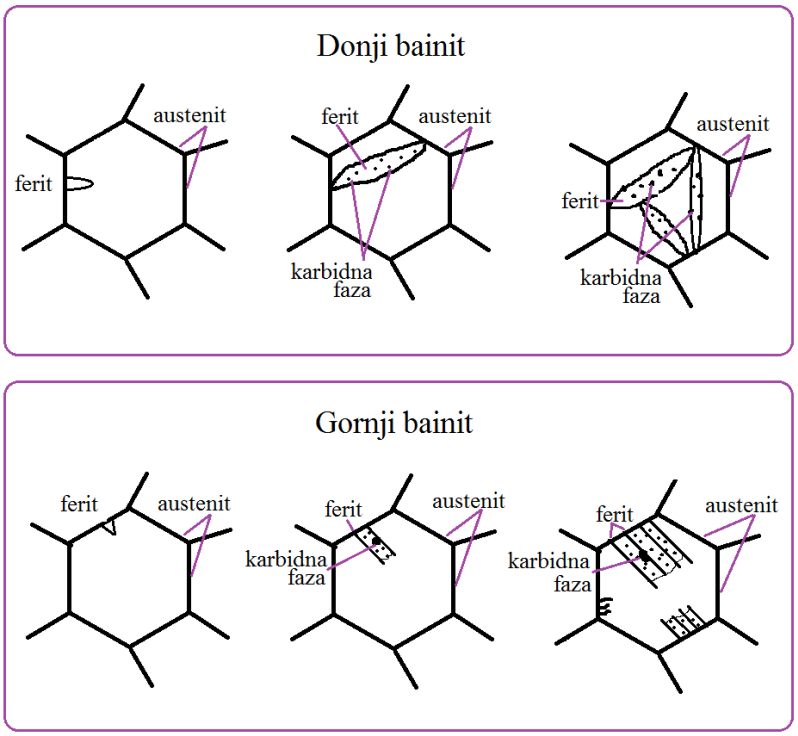
Formiranje acikularnog ferita

Formiranje acikularnog ferita se odvija tijekom kontinuiranog hlađenja u temperaturnom rasponu nešto višem nego kod formiranja bainita. Mikrostrukturno gledano, acikularni ferit se sastoji od nepravilno oblikovanog ferita s manjom količinom dispergiranih karbida koji rezultira dobrom kombinacijom mehaničkih svojstava tvrdoće i čvrstoće [4]. Razlog tome leži u činjenici da acikularni ferit raste intragranularno na nemetalnim uključcima unutar velikih austenitnih zrna i to u različitim smjerovima od uključaka. Kao rezultat rasta acikularnog ferita u različitim smjerovima, struktura je manje organizirana nego što je to u slučaju bainita ili Widmanstättenovog ferita (koji formiraju uredne paralelne i usmjerene pločaste tvorevine) zbog čega pukotina tijekom svoje propagacije mora slijediti zamršeniju putanju, a to ima za posljedicu povećanje čvrstoće bez kompromitiranja tvrdoće [4], [57]. Prisustvo nemetalnih uključaka u metalu zavara snažno utječe na formiranje acikularnog ferita [18], [53] -[58].

Formiranje bainita

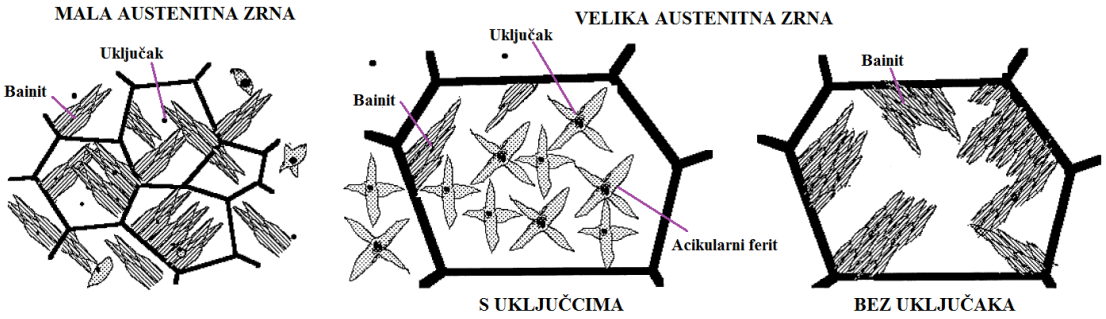
Bainit započinje svoju transformaciju na brzinama hlađenja koje su prebrze za nastanak perlita, a prespore za nastanak martenzita. Tijekom transformacije, moguć je nastanak dva oblika bainita – gornji i donji. Gornji bainit se sastoji od sitnih feritnih pločastih tvorevina koje su otprilike 0,2 μm visoke i 10 μm duge i formiraju se u klastere, a formira se na temperaturama između 350 °C i 500 °C. Donji bainit se formira na nešto nižim temperaturama od gornjeg bainita (između 200 °C i 350 °C) [4]. Mikrostruktura i

kristalografska struktura donjeg bainita vrlo je slična onoj gornjeg bainita. Glavna razlika između gornjeg i donjeg bainita leži u karbidnim precipitatima koji kod donjeg bainita precipitiraju i u unutrašnjosti feritnih pločastih tvorevina (Slika 2.12).



Slika 2.12 Shematski prikaz gornjeg i donjeg bainita

Iako imaju sličan mehanizam nastajanja, acikularni ferit i bainit se razlikuju u nukleaciji i mehanizmu rasta kao što je prikazano na slici 2.13. Kod bainita, feritni konstituenti na rubu austenitnog zrna iniciraju rast paralelnih pločastih tvorevina približno istih kristalografskih orijentacija. Kod acikularnog ferita intergranularna nukleacija se odvija na nemetalnim uključcima unutar granica velikih austentinih zrna i to u raznim kristalografskim orijentacijama [4], [59] - [60].



Slika 2.13 Shematski prikaz nukleacije i rasta bainita i acikularnog ferita [60]

Formiranje martenzita

Pri brzom hlađenju austenita na sobnu temperaturu moguće je potaknuti formiranje martenzitne faze koju karakterizira velika tvrdoća. Za razliku od ferita ili perlita, martenzit se formira deformiranjem austenitne rešetke ali bez difuzije atoma jer su austenit i martenzit istog kemijskog sastava. Martenzitna pretvorba je smična jer je proces nastajanja martenzita povezan sa smicanjem kristalne rešetke te povećanjem volumena. Displacivna priroda martenzitne pretvorbe tijekom reakcije stvara određena naprezanja. Ukoliko tijekom martenzitne pretvorbe postoji prostorno ograničenje, martenzit se oblikuje u tanke igličaste kristale kako bi se smanjilo napetosno naprezanje zbog deformiranja [61].

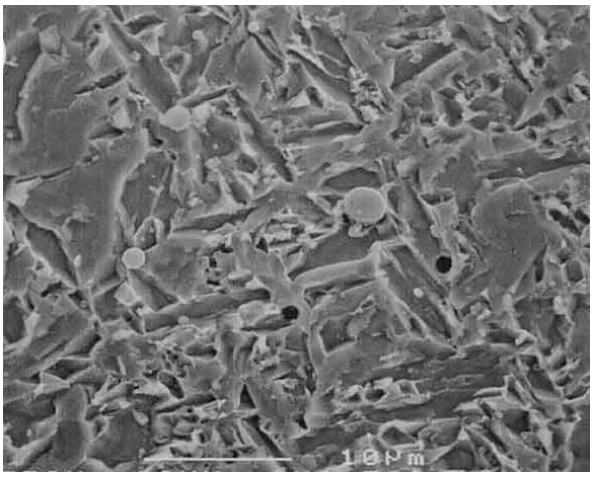
Formiranje martenzitno – austenitnih (MA) konstituenata

Martenzitno – austenitni konstituenti formiraju se u području kritične grubozrnate zone utjecaja topline uzrokovane višeslojnim zavarivanjem. Zbog zagrijavanja na spomenutu temperaturu dolazi do transformacija u austenit koji raste na granicama prijašnjih austenitnih zrna i lamela bainita [62]. Nastala austenitna područja postaju obogaćena ugljikom zbog njegove dobre topivosti u austenitu i svojstva difuznosti u ferit te se tijekom faze hlađenja pretvaraju u MA konstituente. Udio MA konstituenata povećava se s povećanjem udjela ugljika i legirnih elemenata (bor, dušik, niobij, aluminij i vanadij) koji potiču njihovu formaciju [63]. Maksimalna dosegnuta temperatura u grubozrnatoj zoni utjecaja topline kao i veličina prijašnjih austenitnih zrna nemaju značajan utjecaj na količinu MA konstituenata, no prema dosadašnjim saznanjima imaju veći utjecaj na njihovu raspodjelu [4], [63].

2.4. Acikularni ferit

Poznato je da je moguć nastanak različitih mikrostrukturnih faza u metalu zavara niskougljičnih i mikrolegiranih čelika tijekom procesa hlađenja i austenitno-feritne transformacije te da je njihov nastanak uvelike pod utjecajem brzine hlađenja i kemijskog sastava. Unutar svakog zrna austenita nakon fazne transformacije austenit-ferit nalazi se po dva ili više različita mikrostrukturna konstituenta. Najčešći oblici koji se javljaju su: alotriomorfni ferit (GBF), poligonalni ferit (PF), Wiedmanstättenov ferit (WF), acikularni ferit (AF), gornji i donji bainit (GB i DB) te martenzit (M). Acikularni ferit nastaje pri brzom hlađenju iz austenitnog područja niskougljičnih čelika i na taj način onemogućava nastanak alotriomorfnog i Wiedmanstättenovog ferita. Brzina transformacije u acikularni ferit brža je od one u Wiedmanstättenov i alotriomorfni ferit ali ipak sporija od martenzitne pretvorbe [64].

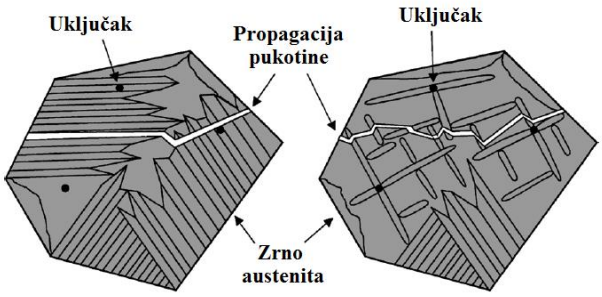
Naziv acikularni ferit zapravo znači da je riječ o igličastom i usmjerenom obliku no to nije u potpunosti točno budući da je pravi oblik acikularnog ferita više u obliku izdužene leće (Slika 2.14). Ne postoji točna izmjera acikularnog ferita budući da nisu uniformni oblikom (kao i nijedan drugi mikrostrukturni konstituent) no okvirne mjere kristala su oko 10 μm dužine i otprilike 1 μm širine što rezultira omjerom širine i visine od 0,1 [65].



Slika 2.14 Prikaz acikularnog ferita dobiven SEM analizom[66]

Acikularni ferit je jedan od mikrostrukturnih konstituenata koji se najčešće uočava u metalu zavara TMCP čelika te se zbog svojeg karakterističnog oblika jednostavno razlikuje i ističe od ostalih konstituenata. Karakterističan oblik se očituje u zamršenoj strukturi za koju je

poznato da omogućuje dobra mehanička svojstva u vidu dobre čvrstoće i tvrdoće [66] - [70]. Shematski prikaz propagacije pukotine u čelicima s različitim mikrostrukturama prikazan je na slici 2.15. Sa slike 2.15 je vidljiva propagacija pukotine kao funkcija prostorne orijentacije feritnih konstituenata (Wiedmanstättenov ferit i bainit – lijevo; acikularni ferit –desno). Moguće je uočiti da se propagacija pukotine prostire nesmetano kroz strukturu načinjenu od Wiedmanstättenovog ferita ili gornjeg bainita što rezultira padom čvrstoće s porastom udjela ovih faza. Razlog tome leži u orijentaciji spomenutih konstituenata koja je usmjerena i nalazi se na rubovima austenitnog zrna. Kod acikularnog ferita kristalografska orijentacija nije usmjerena već kaotična te se nukleacija odvija na površini uključaka unutar austenitnog zrna zbog čega dolazi do usporavanja propagacije pukotine. Stoga se može zaključiti da porastom udjela faze acikularnog ferita dolazi i do povećanja čvrstoće.



Slika 2.15 Shematski prikaz propagacije pukotine u čelicima s različitim mikrostrukturama [64]

2.4.1. Faktori koji utječu na formiranje acikularnog ferita

U brojnim istraživanjima spominje se nekoliko faktora koji utječu na formiranje acikularnog ferita: kemijski sastav čelika, vrijeme hlađenja u temperaturnom rasponu između 800 °C i 500 °C ($\Delta\ t_{8/5}$), veličina austenitnog zrna te svojstva uključaka. Vrlo je teško definirati njihov zasebni utjecaj.

Kemijski sastav – udio rastvorljivih legirnih elemenata

Kemijski sastav čelika igra veliku ulogu u stvaranju konačne mikrostrukture zavarenog spoja, a samim time i mehaničkih svojstava. Prema literaturi rastvorljivi elementi s najvećim utjecajem na formiranje acikularnog ferita su ugljik, mangan i silicij. Udio ugljika u čeliku ima značajan utjecaj na regulaciju temperature na kojoj se vrše pretvorbe i na krajnje

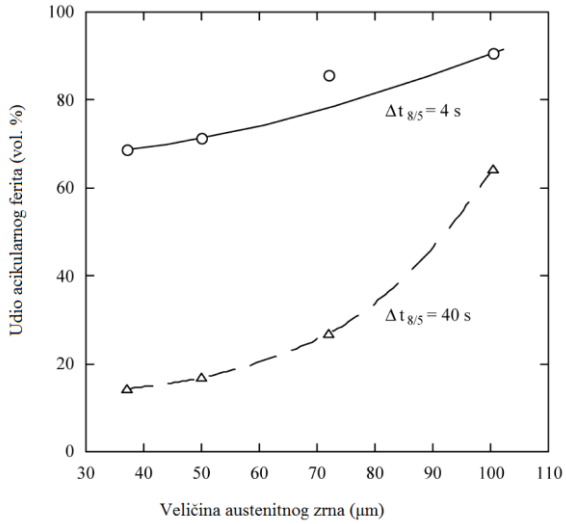
morfološke oblike ferita. Da bi proces solidifikacije i formiranje karbida bili pod nadzorom, udio ugljika treba biti u granicama između 0,05 % i 0,15 % [64]. Optimalni udio aluminija, niobija, molibdena i nikla također može imati pozitivno djelovanje na nukleaciju acikularnog ferita i kasnije na njegov konačni udio u zavarenom spoju. Općenito govoreći, vrlo je bitno pratiti i kontrolirati kemijski sastav zavarenog spoja definirajući optimalne udjele rastvorljivih legirnih elemenata u odnosu na mikrostrukturni sastav.

Brzina hlađenja

Brzina hlađenja čelika iz austenitnog stanja također predstavlja bitan faktor u formiranju acikularnog ferita. Kada je riječ o zavarivanju, u razmatranje se uzima temperaturni raspon između 800°C i 500°C u kojem dolazi do transformacije austenita u ferit, te se u tom rasponu temperatura definira brzina hlađenja kao gradijent pada temperature po sekundi. Nastala mikrostruktura u potpunosti ovisi o vremenu hlađenja s 800°C na 500°C ($\Delta t_{8/5}$). Pri manjim $\Delta t_{8/5}$ dolazi do formiranja martenzita i/ili bainita. Povećanjem $\Delta t_{8/5}$ formiraju se alotriomorfni ferit i/ili acikularni ferit. Još većim povećanjem $\Delta t_{8/5}$ potiče se nastanak poligonalnog ferita i perlita. Bitno je naglasiti da optimalna brzina hlađenja koja rezultira formiranjem acikularnog ferita zavisi od kemijskog sastava. Na primjer, maksimalni udio acikularnog ferita se kod čelika sa srednjim sadržajem ugljika postiže brzinom hlađenja od 10 °C/s, dok se kod niskougljičnih čelika isto postiže brzinom od 5 °C/s te kod čelika sa srednjim sadržajem ugljika i vanadija pri brzini hlađenja od 0,1 °C/s [64].

Veličina austenitnog zrna

Odgovarajući omjer površina potreban je da bi se pokrenula heterogena nukleacija novih faza tijekom austenitno feritne transformacije. To znači da vjerojatnost nastanka alotriomorfnog i Wiedmanstättenovog ferita na granici zrna i acikularnog ferita na uključcima zavisi direktno od veličine površine granice zrna (A_{GB}) i površine čestica uključaka (A_P). Prema tome, može se zaključiti da vjerojatnost nukleacije acikularnog ferita na uključcima (samim time i volumni udio acikularnog ferita u materijalu) raste s porastom omjera površine uključaka i granice zrna (A_P / A_{GB}) [71]. Kako bi se dobio što povoljniji omjer za nukleaciju acikularnog ferita, potrebno je stoga povećati površinu uključaka i smanjiti površinu granice zrna. Slika 2.16 prikazuje zavisnost volumnog udjela acikularng ferita i veličine austenitnog zrna te je vidljivo da se udio acikularnog ferita povećava s povećanjem veličine austenitnog zrna.



Slika 2.16 Utjecaj veličine austenitnog zrna na volumni udio acikularnog ferita [71]

Bitno je naglasiti da je rast austenitnog zrna ograničen količinom uključaka koja se nalazi u metalu i da optimalna veličina austenitnog zrna za nukleaciju acikularnog ferita uvelike ovisi o vrsti korištenog čelika [64], [72]. Iz svega navedenog zaključuje se da se formiranje acikularnog ferita ne može u potpunosti objasniti samo sa stanovišta veličine austenitnog zrna nego da se u obzir obavezno mora uzeti i kemijski sastav čelika kao i svojstva uključaka.

Nemetalni uključci

Nemetalni uključci prvenstveno su se smatrali nepovoljnim po mehanička svojstva jer je u dijelu istraživanja zaključeno da duktilnost, tvrdoća, korozijska postojanost i dinamička izdržljivost postižu niže vrijednosti ovisno o količini nemetalnih uključaka [64], [73]. No, zahvaljujući intenzivnim istraživanjima i ispitivanjima zavarenih spojeva u svrhu povećanja čvrstoće, dobivena su značajna saznanja o povoljnom utjecaju uključaka na smanjenje veličine zrna mikrokonstituenata unutar zavarenog spoja i to prvenstveno metala zavara [66] - [74]. Unutar metala zavara obično se nalazi oko 10^{18} uključaka po m^3 većih od 0,05 μm u promjeru s prosječnim promjerom od oko 0,4 μm. Spomenuti uključci nastaju u talini zbog reakcije kisika i snažnih dezoksidanata (silicij, aluminij, titan) [65]. Iako postoji saznanje da nemetalni uključci povoljno djeluju na formiranje acikularnog ferita, nije u potpunosti razjašnjeno koja je točno vrsta uključaka potrebna i kakva svojstva ti uključci trebaju posjedovati kako bi se potaknula nukleacija acikularnog ferita.

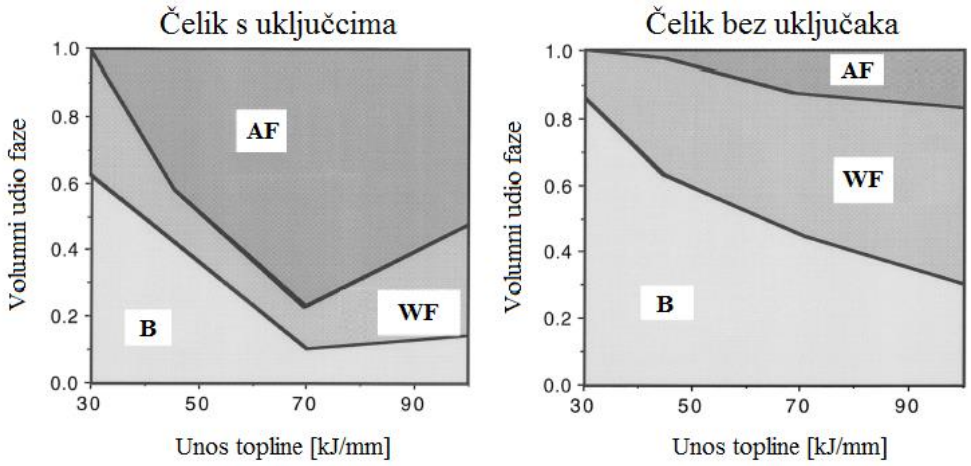
Ono što se može zaključiti da je zajedničko svim uključcima na kojima dolazi do nukleacije acikularnog ferita je njihova veličina. Prema literaturnim podacima kritični promjer uključaka je otprilike 1 μm. Iznad te veličine uključaka uočeno je da ne postoji više utjecaj veličine na povećanje udjela acikularnog ferita. Još jedno svojstvo uključaka koje se pokazalo da utječe na udio acikularnog ferita je njihova količina [64]. Prema provedenim istraživanjima [66] pokazalo se da uključci promjera između 0,5 μm i 0,8 μm imaju najveći učinak na formiranje acikularnog ferita te iako se smatra da je broj uključaka jedan od značajnijih utjecajnih čimbenika na formiranje acikularnog ferita, dobiveni su podaci da samo 10 % – 36 % uključaka sudjeluje u nukleaciji AF-a. Iako je to relativno mali postotak udjela uključaka, on je rezultirao udjelom acikularnog ferita od 80 % [66]. Kemijski sastav aktivnih oksidnih uključaka (uključci na kojima dolazi do nukleacije acikularnog ferita) nije točno određen, pa tako sve vrste uključaka kao što su npr. TiO_2, Al_2O_3, SiO_2, $MnO\text{-}SiO_2$, TiO mogu ujezgriti acikularni ferit u početnoj fazi nukleacije [40].

2.4.2. Mehanizam rasta acikularnog ferita

Mehanizam rasta acikularnog ferita je u velikoj mjeri sličan onom rasta bainita pa stoga vrlo često dolazi do karakterizacije acikularnog ferita kao bainita [65]. Bainitnu strukturu je moguće zamijeniti acikularnim feritom ukoliko se poveća udio kisika, a samim time i udio nemetalnih uključaka. Strukturno gledano, oblik acikularnog ferita se razlikuje od oblika bainita po tome što acikularni ferit raste bez ujednačene kristalografske orijentacije na površini većeg broja nemetalnih uključaka. Orijentacija je neujednačena iz razloga što to sprečavaju kolizije s drugim igličastim tvorevinama koje rastu u blizini već postojećih. Iako do formiranja bainita i acikularnog ferita dolazi u sličnom temperaturnom području te sličnoj količini uključaka u metalu, ono što prevagne u smjeru pojedine faze je veličina austenitnog zrna. Bainit nastaje u slučajevima kada je površina granica austenitnog zrna manja te se većina nukleacija odvija na granicama zrna. Rastom bainitne strukture na granicama zrna popunjava se prostor unutar austenitnog zrna i na taj način onemogućuje formiranje acikularnog ferita. Ukoliko je riječ o velikom zrnu austenita, povećava se omjer površine uključaka i granice zrna (A_P / A_{GB}) potičući nastanak acikularnog ferita unutar austenitnog zrna nauštrb bainita.

Opisana teorija rasta acikularnog ferita objašnjava uočene promjene u mikrostrukturi zavarenih spojeva i to posebice u području zone utjecaja topline gdje dolazi do promjene veličine austenitnog zrna od najvećeg (blizu metala zavara) do najmanjeg (najudaljenije od

metala zavara). Promjene koje se uočavaju u zavarenim spojevima s odgovarajućom količinom uključaka odnose se na omjer acikularnog ferita i bainita koji je najveći u području najbližem liniji staljivanja (gdje je zrno austenita najveće). Ukoliko ne postoje odgovarajući uključci, udio acikularnog ferita je uvijek malen (Slika 2.17).



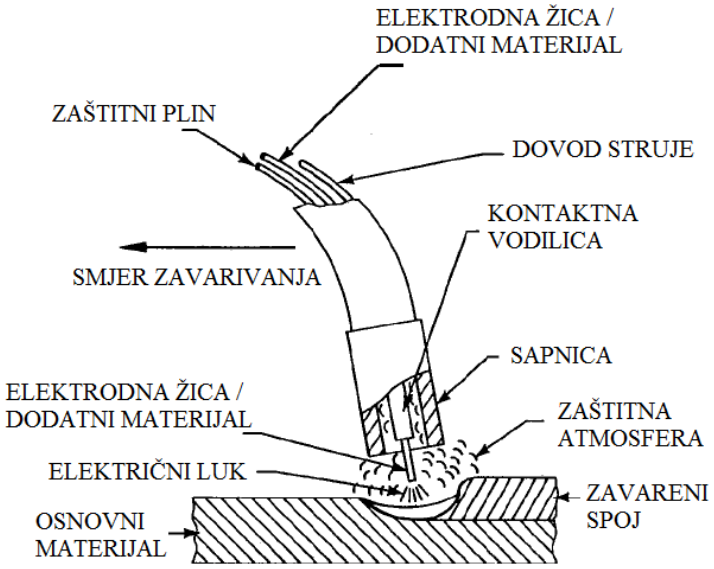
Slika 2.17 Promjene u mikrostrukturi unutar ZUT-a (ovisno o unosu topline i postojanju uključaka); AF – acikularni ferit, B – bainit, WF – Wiedmanstättenov ferit [65]

Sa slike 2.17 se također može uočiti da u slučajevima većeg unosa topline dolazi do formiranja veće količine Wiedmanstättenovog ferita smanjujući zbog toga volumni udio acikularnog ferita. Wiedmanstättenov ferit također može intragranularno rasti no on se, za razliku od sitne strukture acikularnog ferita, oblikuje u grublju strukturu koju je moguće uočiti analizom na optičkom mikroskopu.

3. MIG / MAG ZAVARIVANJE

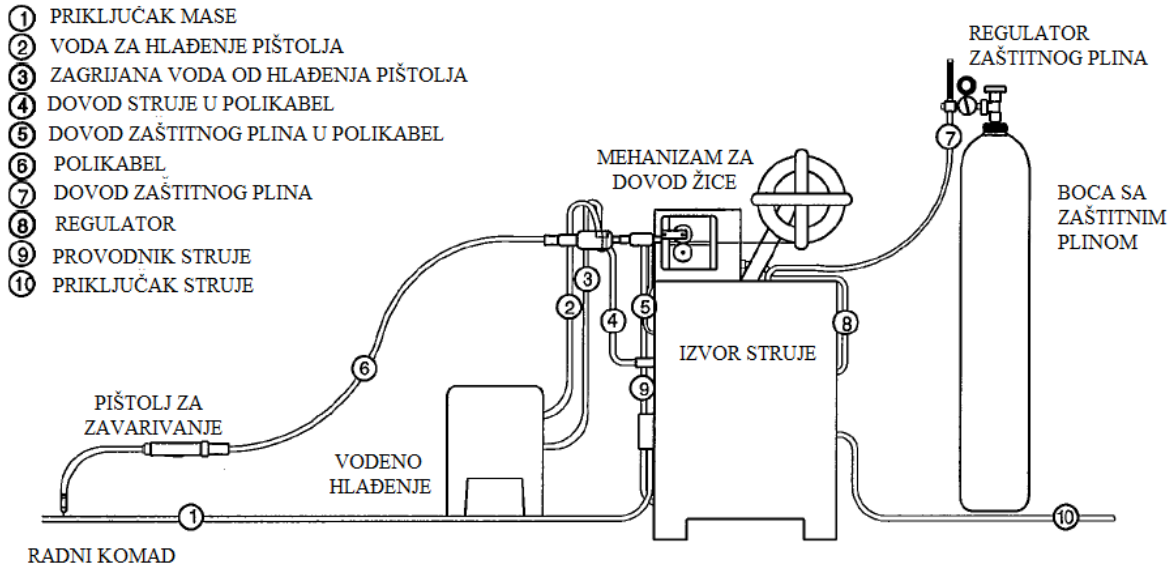
3.1. Općenito o MIG/MAG postupku zavarivanja

MIG / MAG zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja koji kao izvor topline za taljenje osnovnog i dodatnog materijala koristi električni luk uspostavljen između metalne elektrodne žice i radnog komada. Cijelokupni proces se odvija u zaštiti inertnog (Ar, He) ili aktivnog (CO_2 i mješavine) plina. Ovisno o vrsti upotrijebljenog zaštitnog plina postupak nosi oznaku MIG (zaštita inertnim plinom) ili MAG (zaštita aktivnim plinom). Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni pol istosmjernog izvora i radnog komada [75]. Elektrodna žica je ujedno i dodatni materijal, to jest njenim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb. Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi odgovarajućeg zaštitnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku (boci), pod tlakom. Sam izvor struje za zavarivanje je isti u oba slučaja zavarivanja (MIG ili MAG). Postupak MIG / MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran. Slika 3.1 prikazuje detalj MIG/MAG procesa zavarivanja.



Slika 3.1 Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [76]

Osnovnu opremu za MIG/MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – eng. *Constant Voltage*), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina (Slika 3.2). Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, koji je priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu, te sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se lako može mijenjati. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti).



Slika 3.2 Oprema za MIG/MAG zavarivanje [76]

MIG/MAG postupak zavarivanja ima široku primjenu koja je omogućena brojnim prednostima od kojih su najbitnije:

- ✓ MIG/MAG zavarivanje je jedini postupak zavarivanja taljivom elektrodom koji se koristi za zavarivanje svih komercijalnih materijala,
- ✓ Zavarivanje se može izvoditi u svim položajima,
- ✓ Učinak taljenja i brzina zavarivanja daleko su veći nego kod REL zavarivanja,
- ✓ Zbog kontinuiranog dovođenja elektrode, moguće je proizvesti zavare većih duljina bez prekida,
- ✓ Pri zavarivanju štrcajućim lukom, postiže se veća penetracija nego kod REL zavarivanja,
- ✓ Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- ✓ Širok raspon debljina materijala koji se zavaruje,
- ✓ Velika učinkovitost i proizvodnost,
- ✓ Automatska regulacija visine električnog luka.

Zbog navedenih prednosti, MIG/MAG zavarivanje predstavlja dobar izbor kada je riječ o automatiziranim i robotiziranim proizvodnim procesima. Kao i svaki drugi proces zavarivanja, MIG/MAG zavarivanje ima određena ograničenja u primjeni:

- ✓ Oprema je složena, skuplja u odnosu na REL postupak zavarivanja i nije jednostavna za transport,
- ✓ Zbog oblika pištolja za zavarivanje, postoji određene poteškoće pri zavarivanju teško dostupnih zavarenih spojeva,
- ✓ Kod rada na terenu moguće su greške zbog loše zaštite mjesta zavarivanja (vjetar otpuhuje zaštitni plin),
- ✓ Mogući problemi kod dovođenja žice (zastoj žice u polikabelu),
- ✓ Štrcanje kod nekih vrsta prijenosa metala (kratki spojevi, prijelazni luk).

Kako bi zavareni spojevi izvedeni MIG/MAG postupkom bili zadovoljavajuće kvalitete potrebno je podesiti parametre zavarivanja na odgovarajući način. Parametri koje je potrebno podesiti su:

- Jakost struje,
- Napon električnog luka,
- Veličina induktiviteta (uspona struje),
- Promjer žice,
- Brzina zavarivanja,
- Protočna količina i vrsta zaštitnog plina,
- Dužina slobodnog kraja žice.

3.2. Sile koje djeluju na prijenos metala tijekom zavarivanja

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja taljivom elektrodom, rastaljeni dodatni materijal (elektrodna žica) prenosi se isključivo u kapljicama na željeno mjesto (talina metala zavara) formirajući na taj način zavareni spoj. Prijenos kapljica se odvija kroz uspostavljeni električni luk između elektrode i radnog komada i to uz pomoć sila koje se javljaju u tom ioniziranom području. Između svih sila koje utječu na transfer kapljica, neke imaju pozitivno, a neke negativno djelovanje. Poznavanje nastanka i djelovanja tih sila i pojava, omogućuje upravljanje prijenosom i otklanjanje i smanjivanje nepovoljnih utjecaja. Najvažnije sile koje se javljaju tijekom transfera kapljica prema talini su [75]:

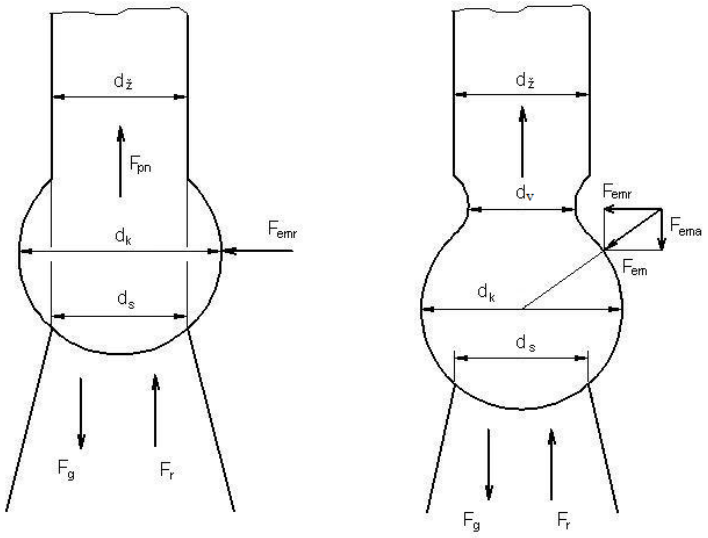
- Sila gravitacije, F_g
- Elektromagnetska sila, F_{em}
- Sila površinske napetosti, F_{pn}
- Sila reaktivnog djelovanja, F_r
- Sila plazme električnog luka, F_{pl}
- Sila zbog eksplozija u kapljicama metala, F_e

Kao što je i ranije navedeno, neke djeluju pozitivno i neke djeluju negativno, odnosno, neke pomažu prijenosu kapljica dodatnog materijala, a neke djeluju u suprotnom smjeru od

smjera prijenosa. U svakom trenutku procesa zavarivanja na kapljicu dodatnog materijala djeluje rezultantna sila prema izrazu:

$$F = F_g + F_{em} + F_{pn} + F_r + F_{pl} + F_e \quad (1)$$

Smjerovi i djelovanje navedenih sila prikazani su na slici 3.3.



Slika 3.3 Djelovanje sila na kapljicu metala u električnom luku; $d_ž$ – promjer elektrodne žice, d_k – promjer kapljice, d_s – promjer stupa električnog luka, d_v – promjer vrata kapljice, F_g – sila gravitacije, F_{em} – elektromagnetska sila, F_{emr} – radijalna komponenta elektromagnetske sile, F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, F_{pn} – sila površinske napetosti, F_r – sila reaktivnog djelovanja [77]

Sila gravitacije uvijek djeluje kod prijenosa materijala i njeno djelovanje se ne može izbjeći. Budući da je njeno djelovanje uvijek usmjereno prema dolje, tijekom zavarivanja u vodoravnom položaju (kada se prijenos metala odvija u pravcu sile teže) ono je pozitivno dok u svim ostalim (prisilnim) položajima zavarivanja je njeno djelovanje negativno. U slučaju zavarivanja u nadglavnom položaju, kada je masa kapljice velika, a ostale sile koje djeluju preslabe, uopće nije moguće ostvariti prijenos kapljice u zavareni spoj. Iznos djelovanja sile gravitacije za kapljicu kuglastog oblika računa se prema izrazu [77]:

$$F_g = \frac{4}{3}\pi r_k^3 \rho g \quad (2)$$

pri čemu je: F_g – sila gravitacije, N; r_k – polumjer kapljice, m; ρ – gustoća, kg/m^3; g – ubrzanje sile teže, m/s^2.

Elektromagnetske sile koja se javljaju u električnom luku tijekom zavarivanja sa žičanom elektrodom i u plinskoj zaštiti najvažnije su za prijenos metala [75]. Poznato je da se oko vodiča koji provodi električnu struju javlja magnetsko polje čije su silnice koncentrično raspoređene oko vodiča. Kada je riječ o krutom vodiču, djelovanje tih silnica nije u tolikoj mjeri značajno kao u slučaju kada je riječ o električnom luku, tj. plazmenom stupu unutar njega. Elektromagnetska sila (Lorentzova sila) djeluje okomito na površinu vodiča i u slučaju kapljice ima radijalnu (F_{emr}) i aksijalnu (F_{ema}) komponentu. Radijalna komponenta svojim djelovanjem uzrokuje lokalno suženje presjeka na rastaljenom vrhu elektrode uzrokujući tzv. „pinch efect“. Djelovanje radijalne komponente elektromagnetske sile opisuje izraz [77]:

$$F_{\text{emr}} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \tag{3}$$

pri čemu je: F_{emr} – radijalna komponenta elektromagnetske sile, N; μ_0 – permeabilnost zraka, H/m; I – jakost struje, A.

U izrazu (2) μ_0 predstavlja permeabilnost zraka i iznosi $4\pi\ 10^{-7}$ H/m. Ta komponenta sužava vrat kapljice sve dok se kapljica ne odvoji s vrha elektrode. F_{emr} ne utječe na odbacivanje kapljice s vrha elektrode prema talini na radnom komadu. Aksijalna komponenta elektromagnetske sile je ta koja usmjeruje i daje pogon otkinutoj kapljici prema radnom komadu. F_{ema} se javlja s početkom oblikovanja vrata kapljice,a moguće ju je izračunati prema izrazu [78]:

$$F_{\text{ema}} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} ln \frac{r_s}{r_{ž}} \tag{4}$$

gdje je: F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, N; μ_0 – permeabilnost zraka, H/m; r_s – polumjer stupa električnog luka, m; $r_{ž}$ – polumjer elektrodne žice, m

Ukoliko se oblikuje vrat kapljice koji ima manji promjer od promjera žice, F_{ema} se računa prema izrazu [77]:

$$F_{\text{ema}} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{r_s}{r_v} \tag{5}$$

pri čemu je: F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, N; μ_0 – permeabilnost zraka, H/m; r_s – polumjer stupa električnog luka, m; r_v – polumjer vrata kapljice, m.

Na osnovi izraza (3) – (5) može se zaključiti da aksijalna komponenta sile može biti veća, manje ili jednaka nuli. Ukoliko je veća od nule, postiže se veći promjer stupa električnog luka na površini kapljice koji ovisi o jakosti i polaritetu struje te vrsti zaštitnog plina. Jača struja i pozitivni polaritet elektrode utječu na povećanje promjera stupa električnog luka, a također i argon kao zaštitni plin daje veći promjer stupa luka od promjera stupa luka kada se kao zaštitni plin upotrebljava ugljični dioksid što pridonosi većoj sili u pozitivnom smjeru i smanjenju promjera kapljice. Uzrok ovome nije u potpunosti razjašnjen, no pretpostavka leži u tome da različita toplinska vodljivost plinova kod raznih temperatura u električnom luku ima značajan utjecaj. Iznos struje u kojem je $F_{ema} = 0$ naziva se kritična struja zavarivanja, I_{kr}. U slučaju kada je struja zavarivanja veća od kritične struje zavarivanja, aksijalna komponenta elektromagnetske sile je pozitivna i djeluje u smjeru prijenosa metala.

Sila površinske napetosti javlja se kada se rastaljena kapljica nalazi na vrhu elektrodne žice i djeluje suprotno smjeru prijenosa. Uz elektromagnetsku silu, igra vrlo veliku ulogu u prijenosu kapljice prema talini. Kada je riječ o prijenosu kapljica slobodnim letom, ona djeluje na način da sprječava otkidanje kapljice, no kada je riječ o prijenosu premošćivanjem, sila površinske napetosti je glavna sila koja povlači kapljicu prema talini [78]. Iznos sile površinske napetosti moguće je izračunati prema izrazu [77]:

$$F_{pn}=2\pi\sigma\frac{r_{ž}^2}{r_k} \tag{6}$$

Gdje je: F_{pn} – sila površinske napetosti, N; σ – koeficijent površinske napetosti, N/m; $r_ž$ – polumjer elektrodne žice, m; r_k – polumjer kapljice, m.

Koeficijent površinske napetosti σ ovisi o vrsti dodatnog materijala, temperaturi kapljice te plinskoj atmosferi u kojoj se odvija proces zavarivanja. Kisik smanjuje, a dušik povećava silu površinske napetosti. Iz tog razloga dolazi do lakšeg odvajanja kapljice s vrha elektrode u struji kisika.

Sila reaktivnog djelovanja nastaje zbog isparavanja metala na elektrodama (elektrodna žica i radni komad – talina) koje se javlja zbog visokih temperatura na kojima se odvija proces zavarivanja. Isparavanje je najveće u aktivnim točkama elektroda i proporcionalno

kvadratu struje zavarivanja. Sile reaktivnog djelovanja nastale zbog gibanja metalnih para u smjeru suprotnom od prijenosa metala uzrokuju otežano odvajanje kapljice od elektrodne žice.

Sila plazme električnog luka ne djeluje na odvajanje kapljice s vrha elektrode već na gibanje i usmjeravanje kapljice dodatnog materijala i to samo kada se kapljica giba u električnom luku od vrha elektrode do taline. U plazmenom stupu električnog luka (u blizini vrha elektrode) vlada određeni tlak. Budući da se isti volumen plina plazme širi uslijed promjene dimenzija električnog luka u blizini radnog komada, u tom dijelu vlada niži tlak. Zbog strujanja plazme z područja višeg u područje nižeg tlaka ostvaruje se pritisak na kapljicu koja prolazi kroz električni luk te se tako podržava i usmjerava njeno gibanje olakšavajući na taj način prijenos metala.

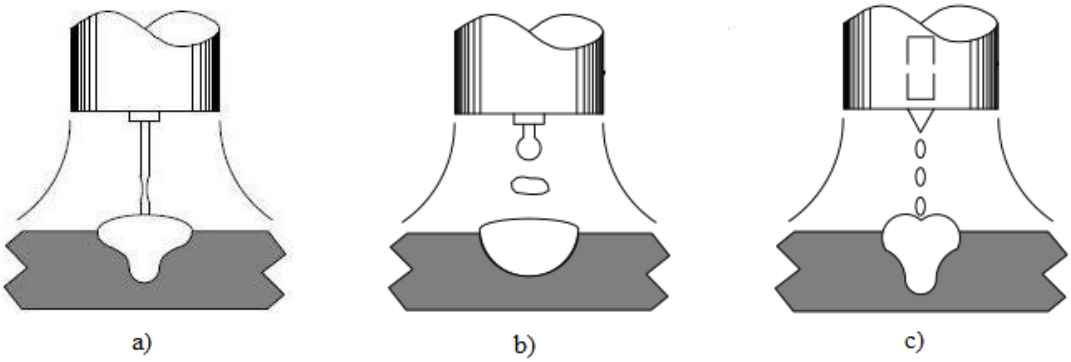
Sila zbog eksplozija u kapljicama metala nastaje zbog reakcija koje se javljaju uslijed djelovanja plinova u kapljici prilikom prijenosa u talinu metala zavara. Naime, u kapljici metala mogu postojati plinovi koji tijekom procesa zavarivanja ekspandiraju i dovode do prsnuća kapljice. Mjesto na kapljici gdje dolazi do prsnuća kapljice se najčešće nalazi na suprotnoj strani od smjera prijenosa kapljice kroz električni luk jer na toj strani je kapljica toplija, a talina ima veću viskoznost. Sila zbog eksplozija u kapljicama nema jedinstven smjer djelovanja zbog stohastičke naravi.

3.3. Prijenos metala u električnom luku

Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Kod MIG/MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer je odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajući prijenos metala koji za odabranu primjenu predstavlja optimalan odabir. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja. Formiranje kapljice teoretski je vrlo teško opisati zbog dinamike rasta kapljice rastaljenog metala, toplinskih promjena u elektrodi te prijenosa toplinske energije putem električnog luka. Zbog navedene kompleksnosti, u literaturi se modeli za predviđanje prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja temelje na pojednostavljenim opisima utjecajnih čimbenika na formiranje kapljice rastaljenog metala. Dvije najpoznatije teorije modela prijenosa metala su teorija ravnoteže statičkih sila (eng. SFBT – *Static Force Balance Theory*) i teorija

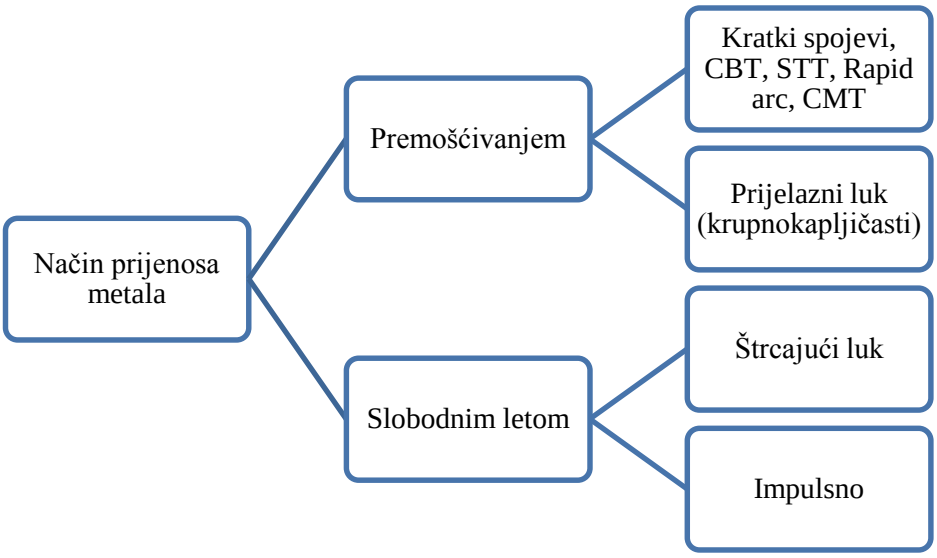
nestabilnosti magnetskog štipanja (eng. PIT – *Pinch Instability Theory*) [79]. SFBT teorija se temelji na ravnoteži između sila gravitacije, elektromagnetskih sila, sila plazme električnog luka i sila zbog površinske napetosti. Prema SFBT teoriji, do otkinuća kapljice dolazi u trenutku kada statičke sile koje djeluju na otkidanje kapljice postignu veću ukupnu vrijednost od onih statičkih sila koje djeluju na zadržavanje kapljice na elektrodi [80]. PIT teorija uzima u obzir nepravilnosti koje se javljaju tijekom djelovanja radijalne komponente elektromagnetske sile na beskonačan cilindričan stup tekućeg metala. Prema toj teoriji do otkinuća kapljice dolazi zbog djelovanja elektromagnetske sile (njene radijalne komponente) koja prekida mlaz tekućeg metala u kapljice – dolazi do „pinch“ efekta [81].

Parametri koji utječu na promjenu u načinu prijenosa metala su: kemijski sastav i promjer dodatnog materijala, sastav zaštitnog plina, jakost struje i njen polaritet te duljina električnog luka (napon električnog luka) [82]. Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom postoje dva načina prijenosa dodatnog materijala od elektrode do radnog komada tj. taline. Materijal se može prenositi slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem. Zbog specifičnosti pojava i duljine električnog luka kod prijenosa premošćivanjem razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom (krupnokapljičasti prijenos), a kod prijenosa slobodnim letom kapljica štrcajući i impulsni luk [75]. Prijenos metala kratkim spojevima, mješovitim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose, dok impulsni prijenos kapljica spada u kontrolirani prijenos metala. Shematski prikaz prijenosa metala prirodnim načinom prijenosa metala prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4 Shematski prikaz prijenosa metala prirodnim načinom: a) kratkim spojevima; b) prijelaznim lukom; c) štrcajućim lukom [83]

Osim impulsnog, kao trenutno najraširenijeg kontroliranog načina prijenosa metala, postoje još i razne vrste modificiranih načina prijenosa metala: CBT – eng. Controlled Bridge Transfer, STT – eng. *Surface Tension Transfer*, CMT – eng. *Cold Metal Transfer, Rapid Arc Transfer*, itd.. Zbog sve većeg broja i primjene novorazvijenih kontroliranih načina prijenosa metala, sve se više pažnje posvećuje modificiranju postojećih klasifikacija koje uključuju samo prirodne načine prijenosa metala [84]. Slika 3.5 prikazuje podjelu načina prijenosa metala prema vrsti transfera kapljice od elektrode do taline.

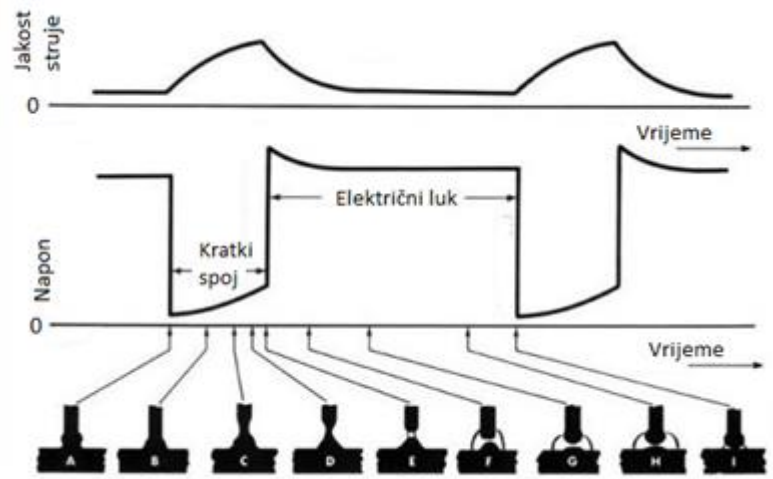


Slika 3.5 Osnovna podjela načina prijenosa metala prema vrsti transfera kapljice od elektrode do taline

3.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenosom metala kratkim spojevima dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću električnih kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Kod prijenosa kratkim spojevima, ovisno o promjeru žice, koriste se male struje zavarivanja (od 50 A do 170 A), niski naponi (od 13 V do 21 V) te zaštitni plin CO_2 ili mješavine (CO_2+Ar, CO_2+Ar+O_2). Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizičkom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spajanja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće

kapljicu taline i vrška žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja (Slika 3.6).



Slika 3.6 Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [76]

Sa slike 3.6 vidljive su sve faze tijekom prijenosa metala kratkim spojevima. A faza prikazuje stanje kada žičana elektroda dotakne radni komad te u električnom krugu nastane kratki spoj. U tom trenutku napon pada na nulu, a struja počinje eksponencijalno rasti (brzina rasta je ograničena induktivnim otporima kruga). Faze B, C, D opisuju rast napona zbog povećanja otpora do kojeg dolazi jer povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice i povećava se pinch – efekt koji dovodi do smanjenja presjeka žice (povećani otpor) i otkidanja zagrijanog vrha žice. U fazi E dolazi do prekida kratkog spoja i ponovne uspostave električnog luka, a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Faze F, G, H prikazuju skok napona koji je opet nešto veći od prosječnog i s vremenom se smanjuje na prosječnu vrijednost (G, H). Faza I predstavlja trenutak neposredno prije nego žica dotakne radni komad i ponovno dođe do kratkog spoja nakon čega se cijeli proces opet ponavlja.

Sve gore opisane faze se zbivaju dok se žičana elektroda jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica premosti razmak nastao otkidanjem vrha, ponavlja se ciklus od faze A. Broj ciklusa po sekundi varira u ovisnosti o promjeru žice i pri stabilnim parametrima ima 100 ÷ 200 kratkih spojeva u sekundi. Mali unos topline omogućuje kratkim spojevima svestranu primjenu, od zavarivanja tankih i debelih materijala te zavarivanja u svim položajima. Izrazito je pogodan za zavarivanje korijena kod zavarivanja cjevovoda te kod zavarivanja tankih limova u svim položajima. Prijenos kratkim spojevima se lako zvučno

prepozna po karakterističnom pucketanju ako se radi s pravilnim parametrima. Glavni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učin taljenja ali i velika vjerojatnost pojave naljepljivanja [76].

3.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom (krupnokapljičasti prijenos)

Prijenos metala prijelaznim lukom je kombinacija prijenosa slobodnim letom kapljica i u manjoj mjeri kratkim spojevima. Odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkog spoja. Pojedine kapljice, ovisno o duljini električnog luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj.

Za postizanje prijenosa metala krupnokapljičastim prijenosom prikladne su veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i naponi (od 22 V do 25 V), ovisno o promjeru žice. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Posljedica toga je više prskanja, neregularnost prijenosa (pojava kratkih spojeva je slučajna i izaziva nepredvidivo štrcanje materijala), teško se kontrolira, položaj zavarivanja je ograničen na horizontalne položaje, lošije je kvašenje taline, što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina, a zavar je izbrazdan i nepravilan. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem. Zbog svih nabrojanih nedostataka prijenos metala prijelaznim lukom se izbjegava te se pokušava minimalizirati u praksi.

3.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira prijenos puno malih kapljica koji se vrši slobodnim letom kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (radijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Koristi se relativno visok napon (od 24 V do 40 V), struja (od 200 V do 600 A). Broj kapljica metala otkinutih u sekundi može biti i više od nekoliko stotina. Promjer kapljice je manji od promjera

žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu, pa se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona.

Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su veliki depozit, velika penetracija, mogućnost korištenja većih promjera žice te malo nepoželjnog prskanja. Nedostatci ovakvog prijenosa su opasnost od progaranja kod tanjih materijala (koristi se kod materijala od 3 mm i debljih) i opasnost od slijevanja velike količine rastaljenog materijala u prisilnim položajima zbog djelovanja gravitacijske sile [83].

3.3.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom po načinu prijenosa kapljica u talinu spada u kontrolirani način prijenosa metala, slobodnim letom kapljica, što je slično prijenosu metala štrcajućim lukom. U oba dva prijenosa metal se prenosi slobodnim letom kapljica, bez kratkih spojeva. Kod impulsnog zavarivanja izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa.

Impulsnim načinom prijenosa kapljica osigurava se stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Daljnje mogućnosti razvoja i primjene postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori, kojima je moguće stvarati impulse proizvoljnog oblika što znači da je moguće utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice [85]. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa kod zavarivanja, mogu se koristiti sinusoidni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja.

Prosječna struja zavarivanja kod impulsnog zavarivanja manja je od kritične struje koja rezultira nepravilnim i neprihvatljivim prijenosom metala u grubim kapima. Jakost struje zavarivanja modulira se tako da varira između minimalne (osnovna struja impulsa) i maksimalne struje (vršna struja impulsa). Osnovna struja održava električni luk, dok je duljina

trajanja i visina impulsa vršne struje prilagođena tako da premaši kritičnu struju i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu.

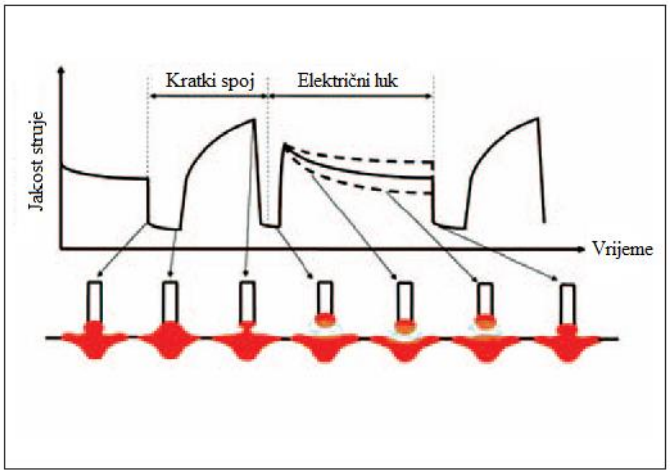
Kod impulsnog načina zavarivanja podešavanje parametara je nešto složenije budući da treba uskladiti 5 osnovnih parametara zavarivanja (jakost vršne i osnovne struje, širinu impulsa, frekvenciju impulsa i brzinu dodavanja žice) koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk. Zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala zadržava prednosti, a otklanja poteškoće koje se javljaju kod štrcajućeg luka tako da se može primijeniti u svim položajima, te za materijale koji su osjetljivi na količinu unosa topline. Također je primjenjiv u cijelokupnom rasponu od niskih do visokih struja zavarivanja.

3.3.5. CBT način prijenosa metala

MIG/MAG postupak prikladan je za zavarivanje tankih limova ali je u području minimalnog unosa topline tj. kratkom luku osjetljiv na štrcanje rastaljenih kapljica kao posljedica nestabilnog procesa. Potrebno je naglasiti da prvenstveno automobilska industrija (zbog primjene tankih limova) kontinuirano zahtijeva od proizvođača opreme za zavarivanje razvoj u smjeru produktivnosti ali i smanjenja naknadne obrade kako bi se smanjila količina industrijskog otpada i dodatni troškovi nastalih uklanjanjem posljedica štrcanja [29]. Kao trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine štrcanja, koristi se impulsno MIG/MAG zavarivanje ali se bilježi i uporaba modificiranih MIG/MAG postupaka zavarivanja. Konvencionalno MIG/MAG zavarivanje kratkim spojevima, pomoću kojeg je moguće smanjiti unos topline u radni komad, koristi se kako bi se eliminiralo protaljivanje tanjih radnih komada. No, pri korištenju konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja dolazi do veće količine štrcanja i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka odmah nakon prekida kratkog spoja. Opisana problematika rezultirala je razvojem novog načina prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja – CBT načina prijenosa materijala [30].

Kritični trenutak pojave štrcanja pri MIG/MAG zavarivanju kratkim spojevima je odmah nakon prekida kratkog spoja, odnosno u trenutku ponovne uspostave električnog luka [28]. Kako bi se smanjila pojava štrcanja kada na rastaljeni metal djeluje sila pinch efekta, potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. U skladu s padom napona, u istom trenutku dolazi i do pada

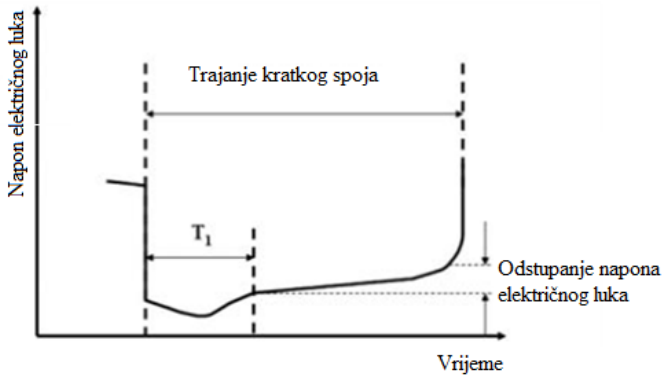
vrijednosti jakosti struje kao što je prikazano na slici 3.7. Kao rezultat toga, prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši se isključivo pomoću površinske napetosti.



Slika 3.7 Princip CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [20]

Trenutak u kojem se odvija odvajanje kapljice može zbog utjecaja različitih čimbenika (duljina slobodnog kraja žice; brzina zavarivanja; položaj zavarivanja; veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala; ponašanje taline) varirati. Kako bi se izbjegao utjecaj navedenih čimbenika, jakost struje zavarivanja podešava se optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka. Na taj način moguće je upravljati prijenosom metala za vrijeme kratkog spoja i stabilizirati električni luk.

Princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja prikazan je na slici 3.8. Uspoređujući slike 3.7 i 3.8 vidljivo je da nakon pojave kratkog spoja vrijednost napona pada u ovisnosti s padom jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava štrcanja. Period kratkog spoja u kojem napon još nije počeo rasti označen je s T_1 i napon u tom području se smatra referentnim naponom. Daljnje odstupanje od referentnog napona učestalo se mjeri te kada odstupanje dosegne definiranu graničnu vrijednost, dolazi do ponovnog uspostavljanja električnog luka.



Slika 3.8 Princip preciznog predviđanja trenutka ponovnog uspostavljanja električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja [86]

Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80 % Ar + 20 % CO_2 optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1,2 V do 2,0 V. Preciznim predviđanjem uspostave električnog luka i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnog luka, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti i štrcanje se uspijeva kontrolirati [86].

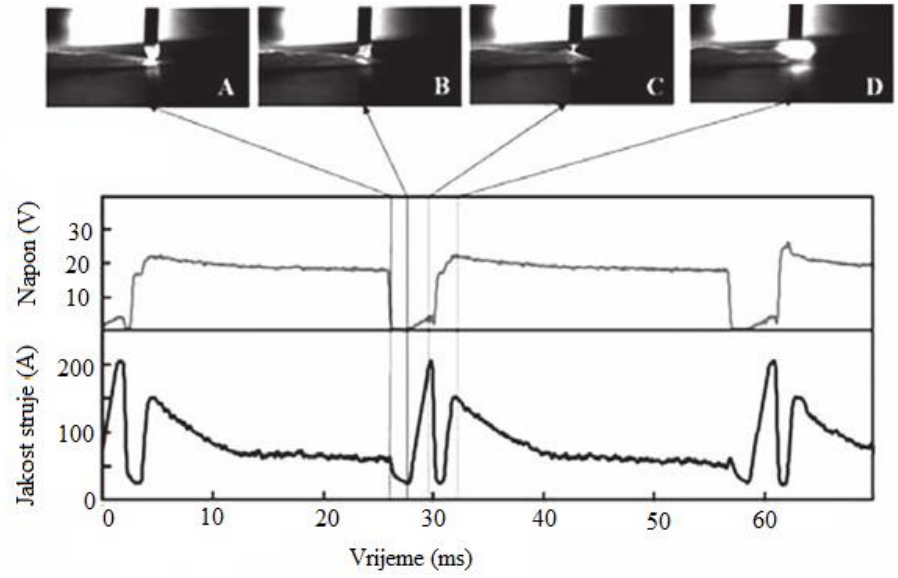
Prikaz prijenosa rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni materijal (pri CBT načinu prijenosa metala) pomoću visokobrzinske kamere u korelaciji s promjenom struje i napona dan je na slici 3.9. Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju navedeni su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Parametri korišteni pri snimanom CBT MAG zavarivanju [30]

Zaštitni plin	80 % Ar + 20 % CO_2
Jakost struje, A	80
Napon, V	16,2
Promjer žice, mm	1
Brzina zavarivanja, cm/min	50

Kadar A na slici 3.9 prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkog spoja. Prolaskom vremena na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavara, te njen stisnuti oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne

uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, kadar D, ne dolazi do pojave štrcanja.



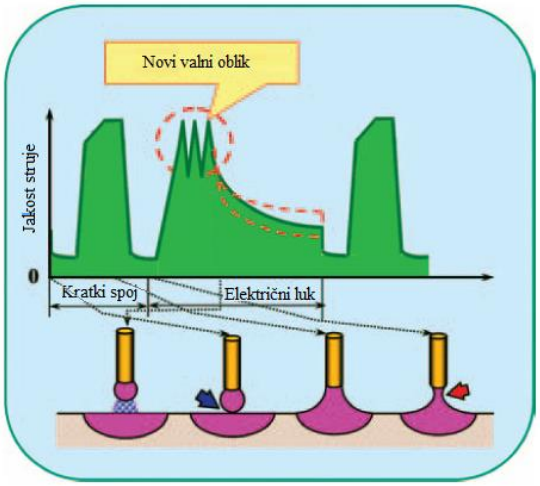
Slika 3.9 Faze CBT prijenosa metala ovisno o vremenu [30]

Pomoću opisanog načina prijenosa moguće je precizno nadziranje procesa odvajanja rastaljene kapljice metala u svrhu predviđanja trenutka pojave kratkog spoja/ponovne uspostave električnog luka čime se minimalizira pojava štrcanja [25], [28] - [30], [87] - [88]. Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline omogućuje se zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala (što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije) [20].

3.3.5.1. CBT – EX način prijenosa metala

Konvencionalnim CBT načinom prijenosa metala moguće je smanjiti pojavu štrcanja samo u rasponu parametara koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. Pojačavanjem parametara dolazi se do krupnokapljičastog (globularnog) prijenosa metala koji se koristi kako bi se povećala proizvodnost procesa i brzina zavarivanja. U tom rasponu parametara više nije moguće koristiti konvencionalni CBT MIG/MAG postupak zavarivanja već ga je potrebno nadograditi, odnosno primijeniti novu inačicu: eng. *Controlled Bridge Transfer – Expanded*, CBT – EX. Slika 3.10 prikazuje princip rada CBT – EX MIG/MAG postupka zavarivanja. Smanjenje pojave štrcanja prije ponovne uspostave električnog luka

slična je kao i u slučaju CBT MIG/MAG postupka zavarivanja. No, da bi se u krupnokapljičastom prijenosu predvidjela ponovna uspostava električnog luka, razvijen je novi visokoprecizni i visokobrzinski Welbee mikroprocesor.

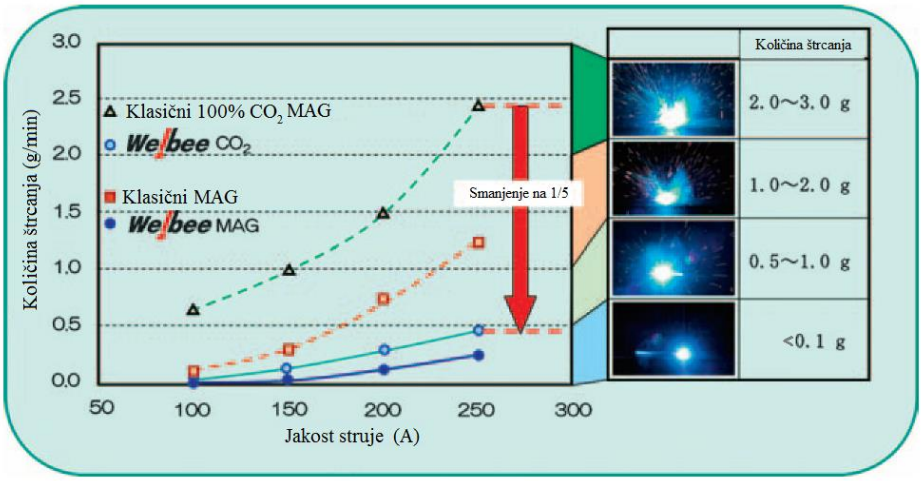


Slika 3.10 Princip CBT-EX MIG/MAG postupka zavarivanja [26]

Vidljivo je sa slike 3.10 da u trenutku prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učina taljenja dodatnog materijala s obzirom na to da je kod krupnokapljičastog prijenosa metala brzina dodavanja žice veća nego što je to u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima. Kako bi se nadoknadio gubitak energije, zbog smanjenja jakosti struje kratkog spoja, i na taj način se postigla odgovarajuća veličina rastaljene kapljice metala, u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Novorazvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju što omogućava manji unos topline i veće brzine zavarivanja.

Kod krupnokapljičastog prijenosa metala, zbog pregrijavanja visokom strujom zavarivanja, dolazi do eksplozija plina u talini i/ili u rastaljenoj kapljici te to dovodi do pojave štrcanja. Zbog karakteristične primjene CBT – EX MIG/MAG postupka zavarivanja (zavarivanje velikim brzinama), potrebno je održavati kratki električni luk što može uzrokovati povremenu pojavu kratkih spojeva. Opisana problematika može dovesti do hlađenja taline metala zavara. Osim navedenog, razlog štrcanju može biti i djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu zbog disocijacije ugljičnog dioksida (CO_2) na ugljični monoksid (CO) i kisik (O) [89]. Kako bi se smanjilo negativno djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu na kraju elektrode, izvršena je promjena u valnom obliku struje. Promjena se očituje

u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka (Slika 3.10). Na taj način se postiže stabilan prijenos metala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju krupnokapljičasti prijenos metala. Slika 3.11 prikazuje usporedne rezultate pojave štrcanja pri variranju jakosti struje (od 100 A do 250 A) i tehnologije zavarivanja (konvencionalni MAG i CBT – EX MAG). Korišten je dodatni materijal promjera 1,2 mm, a brzina zavarivanja iznosila je 100 cm/min. Najveća razlika u količini štrcanja primijećena je kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2. U navedenom slučaju je pri CBT – EX MIG/MAG zavarivanja postignuto smanjenje štrcanja na 20 % (0,5 g/min) od ukupne količine štrcanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja (2,5 g/min). Kod MAG – M zavarivanja postignuta je minimalna količina štrcanja od 0,25 g/min.



Slika 3.11 Usporedni rezultati pojave štrcanja pri CBT – EX MAG i konvencionalnom MAG zavarivanju [26]

3.3.5.2. Izvori struje za CBT MIG/MAG postupak zavarivanja

U novije vrijeme sve više se koriste inverterski ispravljači koji su znatno lakši i pogodniji za upotrebu od ostalih izvora struje za zavarivanje. Dodatna prednost invertera je njihova povećana efikasnost jer su gubici u željeznoj jezgri transformatora manji u odnosu na konvencionalne transformatore pa je stupanj iskorištenja invertera veći od svih ostalih izvora zavarivanja [90]. U tablici 3.2 klasificirane su četiri generacije digitalnih invertera te su prikazane njihove osnovne karakteristike [26].

Tablica 3.2 Klasifikacija digitalnih invertera [26]

	Prva generacija 1996-2000	**Druga generacija 2001-**	**Treća generacija 2008-**	**Četvrta generacija 2010-**
Uređaj za zavarivanje				
Procesor	16- bit CPU	32- bit CPU	FPGA	ASIC
Vrijeme obrade podataka	100 µs	25 µs	1µs	20 ns
Kapacitet procesora	1	4	16	64

Prva generacija koja je razvijena 1996. godine koristi 16-bitni procesor s vremenom obrade podataka od 100 µs. Radi usporedbe s ostalim generacijama snaga procesora prve generacije označena je s 1. Druga generacija invertera razvijena je između 2001. i 2007. godine te su bili korišteni 32-bitni procesori s vremenom obrade podataka od 25 µs i snagom povećanom četiri puta. Treća generacija, koja je poveznica do četvrte generacije, razvijena je 2008. godine i ima vrijeme obrade podataka manje od 1µs i snagu procesora označenu sa 16. Novorazvijeni visokobrzinski Welbee mikroprocesor pripada zadnjoj, četvrtoj generaciji invertera, a razvijen je 2010 godine. Brzina obrade podataka kod Welbee mikroprocesora je oko 20 ns i snaga procesora je povećana na 64 puta u odnosu na prvu generaciju. Velika brzina obrade podataka omogućuje Welbee mikroprocesoru visokobrzinsku i visokopreciznu kontrolu dinamičke karakteristike jakosti struje i napona izvora struje.

3.4. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja

Primarna funkcija zaštitnog plina kod MAG zavarivanja je stvoriti zaštitu oko zavarenog spoja na način da se izolira od okolišne atmosfere kako ne bi došlo do kontaminacije metala zavara. To je nužno jer većina metala zagrijavanjem na zraku razvije veliki afinitet stvaranju oksida i u manjoj mjeri nitrida. Tako dolazi i do reakcije kisika s ugljikom iz taline koji zajedno tvore ugljični monoksid i ugljični dioksid što može rezultirati nepravilnostima u metalu zavara kao npr. uključci troske, poroznost i povećana krhkost. Osim što služi kao zaštitna atmosfera, zaštitni plin svojim djelovanjem utječe i na karakteristiku električnog luka, način prijenosa metala, profil zavara/navara, brzinu zavarivanja, pojavu ugorina, čišćenje površine i svojstva metala zavara [76].

Razumijevanjem osnovnih fizikalnih i kemijskih svojstava zaštitnog plina omogućava se pravilan odabir zaštitnog plina ili mješavine plinova za određenu primjenu. Ukoliko se odabere najbolja opcija za zaštitni plin moguće je ostvariti visokokvalitetne zavarene spojeve kao i značajne uštede u cijelokupnoj izradi konstrukcije. Najvažnija fizikalna svojstva plinova koja imaju utjecaj na proces zavarivanja su: gustoća plina, energija disocijacije, ionizacijski potencijal, sposobnost otapanja u metalu i toplinska vodljivost. Vrijednosti najvažnijih fizikalnih svojstava argona i ugljičnog dioksida dani su u tablici 3.3.

Tablica 3.3 Vrijednosti najvažnijih fizikalnih svojstava argona i ugljičnog dioksida [40],[77]-[91]

Zaštitni plin	**Kemijski simbol**	**Pri temperaturi 21°C i tlaku 0,101 MPa**		**Energija disocijacije, eV**	**Ionizacijski potencijal, eV**	**Toplinska vodljivost, W/(mK) (pri 101325 N/mm^2 i 227 °C)**
		Gustoća, kg/m^3	**Relativna gustoća prema zraku**			
Argon	Ar	1,656	1,380	-	15,8	0,02573
Ugljični dioksid	CO_2	1,833	1,529	5,3	14,4	0,03293

Gustoća plina značajna je radi potrebe učinkovite zaštite metala zavara i prijenosa dodatnog materijala, bez obzira radi li se o inertnim ili aktivnim plinovima. Plinovi teži od

zraka imaju tendenciju padanja uz stup električnog luka, što pospješuje učinak zaštite kod zavarivanja u horizontalnom položaju. Molekularni plinovi (s dva ili više atoma) povećavaju zaštitu zbog povećanja volumena uz stup električnog luka zbog disocijacije. Načelno, da bi se osigurala adekvatna zaštita taline zavara, plinovi teži od zraka, kao što su argon i ugljični dioksid, trebaju manji protok plina prilikom zavarivanja, nego što je potrebno kod lakših plinova, kao što je npr. helij [77], [92].

Ovisno o tome koji metal se zavaruje, i kojom tehnologijom zavarivanja, vrlo male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, izgled površine zavarenog spoja, skrućivanje zavara i poroznost zavara. Iz tog razloga je vrlo bitno kontrolirati koji plin se koristi prilikom zavarivanja te da li zadovoljava normama propisanu minimalnu čistoću.

Energija disocijacije je ona količina energije koju je potrebno dovesti dvo ili višeatomnoj molekuli plina da dođe do disocijacije tj. do odvajanja jednog atoma. Prilikom zavarivanja u električnom luku razvijaju se vrlo visoke temperature (oko 10 000 °C) na kojima dolazi do razlaganja tj. disocijacije molekularnih zaštitnih plinova na atome. Atomi su nakon toga djelomično ionizirani što poboljšava električnu vodljivost zaštitne atmosfere. U trenutku kontakta toplog disociranog plina i hladne površine radnog komada, dolazi do rekombinacije odnosno ponovnog sklapanja atoma u molekule što rezultira oslobađanjem velike količine energije. Zbog oslobođene topline nastale rekombinacijom višeatomarni plinovi postižu efekt jednoatomnih plinova s višim toplinskim vodljivostima (npr. helij). Iz tog razloga je moguće pri istoj temperaturi električnog luka postići veće zagrijavanje radnog komada plinovima poput npr. ugljičnog dioksida u usporedbi s argonom. Opisana disocijacija i rekombinacija nije moguća kod argona jer se on sastoji od jednog atoma [92].

Ionizacijski potencijal je ona energija koju je potrebno dovesti nekom atomu plina da bi došlo do izbijanja jednog atoma iz njegova elektronskog omotača. Dvoatomni plinovi najprije disociraju u atomno stanje, a zatim u većoj ili manjoj mjeri ioniziraju (što ovisi o vrsti plina). Zbroj energije disocijacije i ionizacijskog potencijala daje minimalnu energiju koju je potrebno dovesti plinu da bi došlo do ionizacije plina tj. da bi plin postao vodič električne energije [77]. Pri konstantnim parametrima plina manji ionizacijski potencijal imaju plinovi s većom molekulskom tj. atomskom masom plina. Uspostava i održavanje električnog luka uvelike ovisi o ionizacijskom potencijalu zaštitnog plina. Zaštitni plinovi s relativno nižim

vrijednostima ionizacijskog potencijala olakšavaju uspostavu električnog luka i povećavaju stabilnost tijekom rada [40].

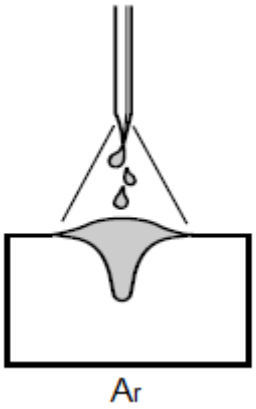
Toplinska vodljivost plina definira njegovu sposobnost da provodi toplinu, odnosno u kolikoj mjeri dolazi do rasipanja topline udaljavanjem od stupa električnog luka. Također je na taj način moguće procijeniti koliki je prijenos topline s plazme električnog luka na radni komad. Zbog toga pri korištenju argona (koji ima relativno nisku toplinsku vodljivost) kao zaštitnog plina dolazi do formiranja električnog luka u kojem se jasno može razlikovati središnji dio u kojem dolazi do visokih temperatura i okolnog plašta koji je znatno hladniji. Opisani električni luk rezultira profilom zavara koji ima uzak korijen i šire lice. Ukoliko se koristi plin s nižom toplinskom vodljivošću, jezgra električnog luka postaje šira rezultirajući ravnomjernijom raspodjelom temperature po njegovom presjeku. Iz tog razlog, profil zavara je u tom slučaju širi i s manjom penetracijom.

Osim spomenutih fizikalnih svojstva zaštitnih plinova, važna su i kemijska svojstva. Argon zbog svoje inertnosti ne dolazi u reakciju s metalom zavara stoga se samo razmatraju svojstva ugljičnog dioksida. Ugljični dioksid ima visoki potencijal oksidacije koji može uzrokovati probleme kao što je gubitak legirnih elemenata. Oksidacija koju može prouzročiti u čistom stanju ekvivalentna je onoj koju uzrokuje inertni zaštitni plin uz dodatak od 8 % do 10 % kisika [76].

3.4.1. Utjecaj zaštitnih plinova argona i ugljičnog dioksida na proces zavarivanja

Argon je jednoatomni kemijski inertni plin bez boje i mirisa, nije zapaljiv niti otrovan te nije topiv u talini metala. Za korištenje argona u procesu zavarivanja kao zaštitnog plina, potrebno je da ima čistoću veću ili jednaku 99,99 % [77]. Argon u usporedbi sa zrakom ima 1,380 puta veću gustoću tako da u slučaju horizontalnog zavarivanja pruža jako dobru zaštitu. Zavarivanje u zaštiti argona rezultira talinom s visokom površinskom napetošću, brzim skrućivanjem taline i malim gubicima legirnih elemenata. Osim kao samostalno, argon se kao zaštitni plin može koristiti u dvo i višekomponentnim plinskim mješavinama i za zavarivanje kako metala na bazi željeza tako i neželjeznih legura (poput nikla, bakra, aluminija, magnezijskih legura i slično). Nizak ionizacijski potencijal argona (Tablica 3.3) uzrokuje izvrsnu stabilnost električnog luka i provodnost električne struje [93]. Pri zavarivanju neželjeznih legura koristi se argon kao zaštitni plin u samostalnom obliku (jednokomponentni

plin) i u tom slučaju pruža izuzetno stabilan električni luk i veliku penetraciju (Slika 3.12) i to u području zavarivanja štrcajućim lukom. Također se može koristiti i u slučaju zavarivanja tankostijenih konstrukcija kratkim spojevima. Ukoliko se zavaruju metali na bazi željeza uz argon se u plinsku mješavinu dodaju kisik, helij, ugljični dioksid, vodik i/ili dušik. Čisti argon skladišti se u boce u plinovitom ili tekućem stanju pod tlakom od 150 bar ili 200 bar (150 i 200 × 100 kPa). Boce su standardizirane i najčešće se koriste čelične boce zapremnine od 40 litara ili 50 litara.



Slika 3.12 Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti argona [94]

Za razliku od argona koji je jednokomponentni plin, ugljični dioksid (CO_2) je dvokomponentni (sastoji se od dva elementa – ugljika i kisika u masenim odnosima 27,3 % ugljika i 72,7 % kisika) što ga razlikuje od svih ostalih korištenih plinova u svrhu zaštite zavarenog spoja. Kao i argon, također je bez boje i mirisa, neotrovan i nezapaljiv. Prilikom zavarivanja u zaštitnoj atmosferi koja sadrži CO_2 između rastaljenog metala i CO_2 dolazi do reakcije što ga svrstava u kategoriju aktivnih zaštitnih plinova. Primjena aktivnih plinova zahtijeva posebnu pažnju zbog pojave oksidacije.

Ugljični dioksid je većinom neaktivan/inertan plin pri sobnoj temperaturi ali pri zagrijavanju na više temperature, iznad 1600 ºC u električnom luku, CO_2 disocira na ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom [75]:

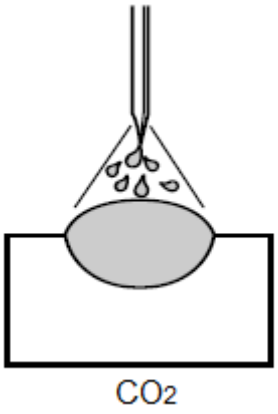
$$CO_2 \rightarrow CO + O$$

CO odlazi u atmosferu (7)

$$Fe + O \rightarrow FeO$$

Zbog toga atmosfera električnog luka sadrži veću količinu kisika koji može reagirati s elementima iz taline. Da li će udio ugljika u metalu zavara biti povećan ili smanjen ovisi o udjelu ugljika u sastavu osnovnog metala i elektrode. Gubitak ugljika se pripisuje stvaranju CO zbog oksidirajuće karakteristike CO_2 zaštitnog plina pri višim temperaturama. Kada dođe do spomenute reakcije, CO može ostati zarobljen u metalu zavara kao poroznost. Štetno stvaranje oksida pri zavarivanju konstrukcijskih čelika može se uspješno spriječiti legiranjem dodatnog materijala (žice) dezoksidantima (Si, Mn).

Ugljični dioksid kao zaštitni plin se najčešće koristi kada se zahtijeva prijenos metala u kratkim spojevima. CO_2 uz O_2 daje široki profil i duboku penetraciju zavara dok nizak potencijal ionizacije i niska toplinska vodljivost stvaraju vrlo visoke temperature u središtu električnog luka (jezgra). Visoke temperature jezgre tako utječu na ukupan zavar dajući mu jednolik profil dubine penetracije i širine zavara čime se mogu „pokriti“ eventualne netočnosti pripreme i vođenja pištolja (Slika 3.13).

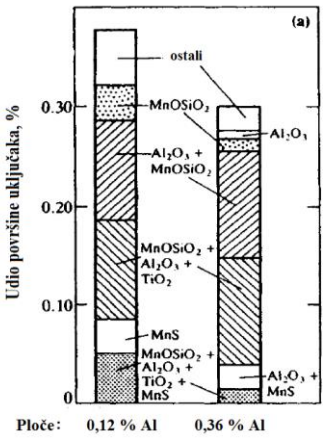


Slika 3.13 Profil geometrije navarenog spoja u zaštiti ugljičnog dioksida (CO_2) [94]

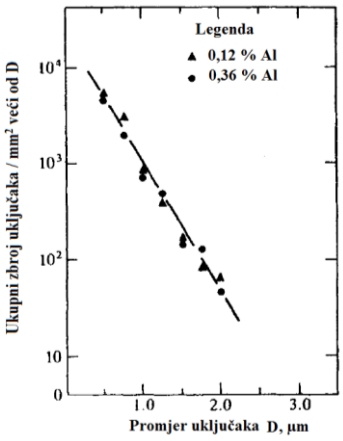
Od zaštitnih plinova koji se koriste za zavarivanje ugljičnih čelika, CO_2 je jedini koji se može koristiti samostalno kao jednokomponentni zaštitni plin. Cijena CO_2 zaštitnog plina je relativno niska no zavari izvedeni u spomenutoj zaštiti zahtijevaju naknadnu obradu u vidu čišćenja površine od produkata prskanja kapljica. Manja učinkovitost deponiranja taline kod CO_2 zaštite, dim i prskanje povećavaju konačnu cijenu izvedenih zavara. Radi poboljšanja operativnih karakteristika, CO_2 se često miješa s argonom. Za zavarivanje se zahtijevaju čistoće CO_2 od minimalno 99,5 % / 99,7 % [77]. CO_2 se skladišti u čeličnim bocama pod tlakovima između 70 bara i 100 bara (70÷100 × 100 kPa) i zapremnine najčešće 40 litara.

3.4.2. Utjecaj udjela kisika u plinskoj mješavini na svojstva zavarenog spoja

Kisik u metal zavara može dospjeti iz okolišne zaštitne atmosfere ili ukoliko je riječ o zavarivanju praškom punjenom žicom, iz interakcije jezgre žice i/ili troske. Kisik koji dospije unutar atmosfere električnog luka utječe na svojstva zavarenog spoja na tri načina: kroz precipitaciju nemetalnih uključaka, oksidacijom legirnih elemenata i uzrokujući poroznost zbog djelovanja ugljičnog monoksida. Unutar metala zavara kisik može biti prisutan u obliku oksida, silikata i ostalih kemijskih spojeva. Ostali kemijski spojevi koji sadrže kisik podrazumijevaju pojavu makro i mikrouključaka. Makrouključci (najčešće uključci troske) vrlo često su rezultat ljudske pogreške odnosno, loše tehnike rada ili odabira parametara. Mikrouključci su pak najčešće precipitati sfernog oblika koji se nalaze na kraju taline metala zavara ili u tek skrutnutom metalu zavara i to zbog svojstva kisika da mu topivost pada s padom temperature. Spomenuti uključci sastoje se od oksida silicija, mangana i ostalih dezoksidanata koji se nalaze u metalu zavara, zajedno s manganovim sulfidom (Slika 3.14). Promjeri oksidnih uključaka su do 10 μm, gustoće od $1 \times 10^4 - 3 \times 10^3$ uključaka po četvornom milimetru metala zavara što rezultira ukupnim postotkom uključaka u metalu zavara do 1 % [53]. Povećanjem jakosti struje zavarivanja, dolazi do pogrubljivanja odnosno povećanja promjera oksidnih uključaka (Slika 3.15).

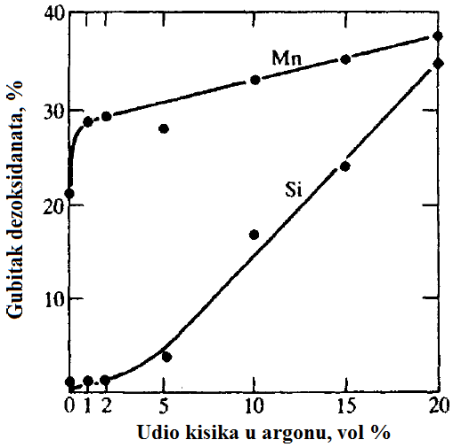


Slika 3.14 Kemijski sastav uključaka unutar metala zavara pri EPP zavarivanju čelika s različitim udjelima aluminija [53]



Slika 3.15 Ovisnost promjera uključaka i njihove gustoće unutar metala zavara pri EPP zavarivanju čelika s različitim udjelima aluminija [53]

U postupcima zavarivanja taljivom elektrodom kao što je i MIG/MAG zavarivanje do oksidacije legirnih elemenata dolazi već na samom vrhu elektrode pri formiranju i prijenosu kapljice rastaljenog metala prema radnom komadu [53]. Puno manje oksidnih reakcija se odvija u talini metala zavara što upućuje na činjenicu da je za očekivati veći gubitak dezoksidanata (kao npr. silicij i mangan) što je trajanje električnog luka duže. Slika 3.16 prikazuje gubitak najčešće korištenih dezoksidanata za ugljične čelike silicija i mangana u ovisnosti o udjelu kisika u zaštitnoj atmosferi gdje ostatak mješavine sačinjava argon. Gubitak mangana je moguć pomoću dva mehanizma i to isparavanjem i oksidacijom dok je gubitak silicija moguć jedino putem oksidacije [18].



Slika 3.16 Ovisnost gubitka dezoksidanata o udjelu kisika u zaštitnom plinu [53]

Odabir postupka zavarivanja visokočvrstih čelika bitno utječe na udio kisika u zavarenom spoju budući da je neizbježna njegova barem djelomična oksidacija zbog reakcije sa zaštitnim plinom. Topivost kisika u čistom potpuno rastaljenom željezu je 1600 ppm na temperaturi taljenja željeza. Tijekom solidifikacije vrijednost topivosti kisika pada na otprilike 860 ppm na 1500 °C. Do smanjenja topivosti kisika prilikom hlađenja dolazi zbog dezoksidacijske ravnoteže između legirnih elemenata u rastaljenom čeliku. Tijekom izrade čelika topivost kisika je u rasponu od 70 do 100 ppm što se tijekom procesa zavarivanja bitno mijenja porastom na nekoliko stotina ppm i kasnije ponovnim smanjivanjem uslijed formiranja oksidnih uključaka. Osim odabira postupka zavarivanja, na udio kisika u zavarenom spoju utječu i količina dezoksidanata, vrsta dodatnog materijala te definirani parametri zavarivanja. Vrijednosti udjela kisika za pojedine postupke zavarivanja dane su u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Udjeli kisika u zavarenom spoju ovisno o postupku zavarivanja i dodatnom materijalu [15]

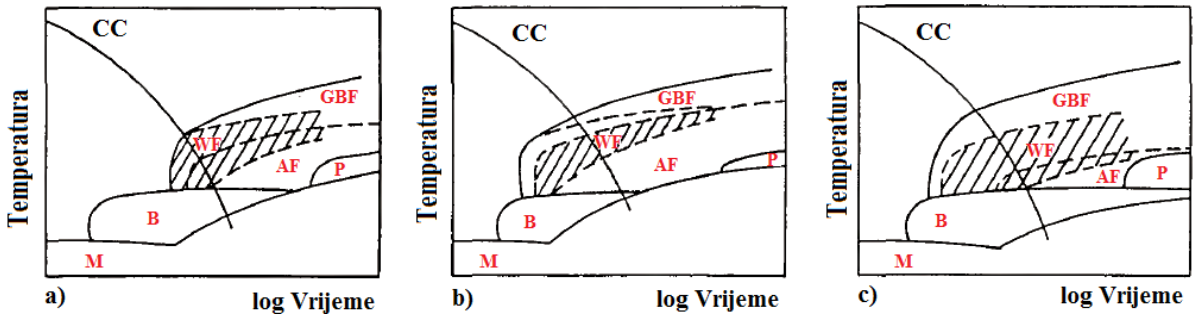
Proces zavarivanja	Dodatni materijal / Zaštitni plin	Kisik, ppm
FCAW	E 70 – rutilni prašak / 100 % CO_2	520
FCAW	Samozaštita / E90X	110
REL	E80X, celulozna obloga elektrode	650
REL	E90X, celulozna obloga elektrode	500
REL	E90X, bazična obloga elektrode	460
MAG	E70X / 100 % CO_2	460
MAG	E100X / 100 % CO_2	560
MAG	E120X / 100 % CO_2	450
MAG – impulsno	E100X / 85 % Ar – 15 % CO_2	310 – 360
MAG – impulsno	E120X / 85 % Ar – 15 % CO_2	280
MAG – impulsno	E100X / 95 % Ar – 5 % CO_2	260

U pravilu zavareni spojevi zavareni postupcima zavarivanja u zaštiti praška ili plinskih smjesa rezultiraju s većim udjelom kisika od onih koji su zavareni procesima s inertnom zaštitnom atmosferom. Udio kisika u zavarenom spoju zavarenom REL-om, FCAW-om ili MAG-om (100 % CO_2) variraju između 450 ppm i 650 ppm. No ukoliko se primjenjuje MAG postupak zavarivanja s dvokomponentnim zaštitnim plinom (Ar – CO_2) vrijednost kisika pada na razinu 260 ppm – 360 ppm. Najniže vrijednosti moguće je postići zavarujući sa samozaštićujućom praškom punjenom žicom — 110 ppm [15].

U literaturi je prema rezultatima ispitivanja definirana optimalna količina udjela kisika u zavarenom spoju u rasponu od 200 ppm do 400 ppm [95] koja rezultira najboljim mehaničkim svojstvima zavarenog spoja visokočvrstog čelika (dobra čvrstoća koja je izravna posljedica mikrostrukture bogate acikularnim feritom).

Kao što je i ranije navedeno, udio kisika u zaštitnom plinu utječe na količinu, sastav i veličinu oksidnih uključaka nastalih u metalu zavara. Nastali uključci pak postaju mjesta

nukleacije i potpomažu austenitnu transformaciju pri hlađenju. Opisano djelovanje kisika pomiče krivulju u CCT dijagramu prema lijevo rezultirajući promjenama u mikrostrukturi [96]. Ovisno o udjelu kisika u zavarenom spoju, moguće je razlikovati tri režima transformacija u CCT dijagramu (Slika 3.17) [97]. Prvi režim predstavlja transformacije u slučaju najniže vrijednosti udjela kisika (< 200 ppm). Sa slike 3.17 je vidljivo da je radi nedovoljne količine nukleusa ograničena nukleacija acikularnog ferita te je kao rezultat toga dobivena mikrostruktura od bainita i Wiedmanstättenovog ferita. Gledajući srednji režim, moguće je uočiti da je dominantna faza u zavarenom spoju acikularni ferit. No, uz njega se javljaju još i bainit, alotriomorfni ferit i Wiedmanstättenov ferit. Prema trećem režimu (najviše kisika) vidljivo je da je dominantna faza Wiedmanstättenov ferit.



Slika 3.17 CCT dijagrami s različitim režimima: a) nizak; b) srednji; c) visoki; M – martenzit, B – bainit, AF – acikularni ferit, P – perlit, WF – Wiedmanstättenov ferit, GBF – alotriomorfni ferit [97]

Uz grafički prikaz utjecaja kisika na strukturu metala zavara putem CCT dijagrama, utjecaj se može kvantificirati i pomoću izraza za izračun ekvivalenta kisika zaštitnog plina kako slijedi [98]:

$$\text{Ekvivalent kisika}_{\text{Zaštitni plin}} = \text{Efektivni potencijal kisika}_{\text{Zaštitni plin}}$$

$$= -0{,}088+0{,}148(CO_2)^{1{,}524}{}_{\text{Zaštitni plin}} + (O_2) \qquad (8)$$

Pomoću izraza (8) može se definirati efektivni potencijal kisika u zaštitnom plinu. Osim toga, pomoću izraza za izračun ekvivalenta kisika zaštitnog plina moguće je uspoređivati rezultate ispitivanja zavarenih spojeva zavarenih s različitim aktivnim mješavinama zaštitnog plina. Matematički gledano, ekvivalent kisika zaštitnog plina je moguće aproksimirati regresijskom analizom koristeći stvarne vrijednosti udjela kisika u metalu zavara i sastava zaštitnog plina.

4. EKSPERIMENTALNI RAD

4.1. Opis eksperimenta

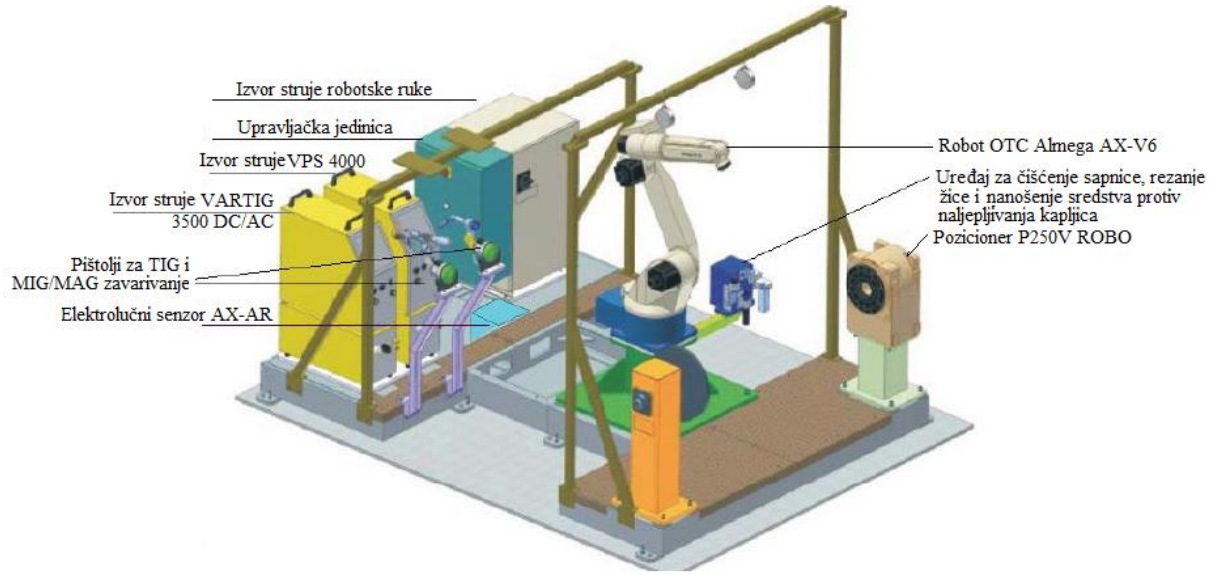
Opsežan eksperimentalni rad izveden je u svrhu kvantificiranja utjecaja parametara pri MAG zavarivanju visokočvrstih čelika na strukturu i svojstva zavarenog spoja. Pregledom i analizom dostupne literature određeni su parametri čijim će se variranjem odrediti njihov utjecaj na mikrostrukturu i svojstva zavarenog spoja čelika X80. Cijelokupni eksperimentalni dio rada proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Tijek izvođenja eksperimenta podijeljen je u 4 dijela. Prvi (početni) dio je bio nužan kako bi se odredilo područje stabilnog prijenosa metala kod CBT MAG zavarivanja. Nakon definiranih parametara zavarivanja uslijedilo je zavarivanje ploča i izrada ispitnih uzoraka, u drugom dijelu eksperimentalnog rada. Treći dio eksperimentalnog dijela rada obuhvaća ispitivanje pripremljenih uzoraka. Četvrti (završni) dio eksperimentalnog dijela rada uključuje obradu i analizu dobivenih podataka.

Zavarivanje uzoraka izvedeno je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u dvije etape: korijenski prolazi zavareni su robotom (Almega OTC AX V6), a popuna automatom (Bugo MDS 1002). Robotiziranim MAG zavarivanjem identičnim parametrima zavarivanja zavareni su korijenski prolazi svih stanja pokusa kako bi se pružili jednaki uvjeti popune za svaki uzorak. Naime, takva odluka je donesena jer je kvalitetan korijenski prolaz zavarenog spoja moguće postići samo u vrlo uskom području parametara zavarivanja. Budući da su svi korijenski prolazi izvedeni u identičnim uvjetima, razlike u izvedbi su minimalne te je tako izbjegnut utjecaj ljudskog čimbenika (zavarivača) na rezultate ispitivanja. Nakon zavarivanja korijenskog prolaza, uslijedilo je zavarivanje popune i završni prolaz. Prema definiranom planu pokusa, tijekom zavarivanja popune varirali su se sljedeći faktori: brzina dovođenja žice, sastav zaštitnog plina i način prijenosa metala. Ovisno o stanju pokusa, ukupni broj prolaza se mijenjao od 4 prolaza za zavarivanje s brzinom dodavanja žice od 7 m/min do 6 prolaza popune za brzinu dodavanja žice od 4 m/min.

4.2. Oprema za zavarivanje

Kao što je i ranije navedeno korijenski prolazi svih uzoraka zavareni su robotiziranim MAG postupkom. Grafički prikaz robotske stanice OTC Almega AX-V6 predočen je na slici 4.1 uz označene ostale komponente sustava.



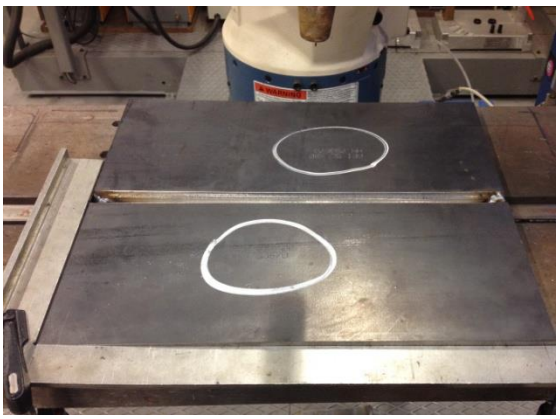
Slika 4.1 Grafički prikaz stanice za robotizirano zavarivanje

Uz prikazane sastavne komponente robotske stanice, robot također ima i „shock“ senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojeg se izvršava on-line programiranje, što se odnosi na snimanje putanje i definiranje tehnoloških parametara za zavarivanje. Robot OTC Almega AX-V6 ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja na osnovi kojih je u pripadajućem radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. Pozicioniranje i zavarivanje ploča vidljivi su na slikama 4.2 i 4.3.

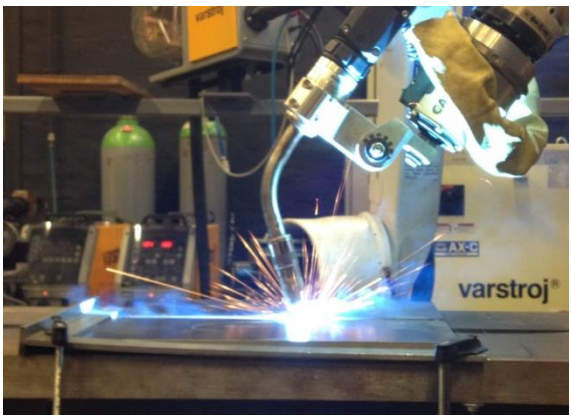
U sastavu robotske stanice nalazi se i izvor struje Varstroj VPS 4000 čije karakteristike je moguće vidjeti u tablici 4.1. Izvor struje VPS 4000 omogućuje zavarivanje s tri različita postupka zavarivanja: MIG/MAG konvencionalno, MIG/MAG impulsno i REL zavarivanje obloženim elektrodama.

Tablica 4.1 Karakteristike izvora struje Varstroj VPS 4000 [99]

Izvor struje		**Varstroj VPS 4000**
Priključni napon, Hz		3 ~ 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 – 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 – 34
Intermitencija, A	**100 %**	400
	50 %	283
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 - 1,2 (1,6)
Masa, kg		45
Dimenzija (D × Š × V), mm		653 × 300 × 595

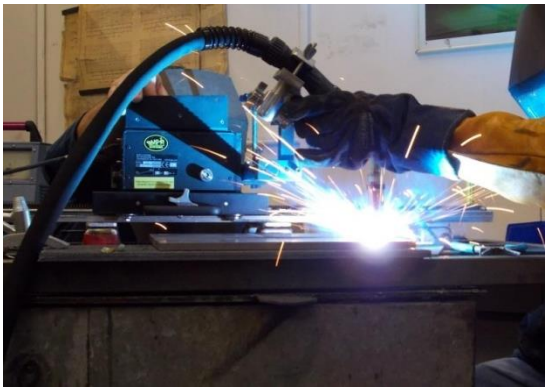


Slika 4.2 Pozicioniranje ploča

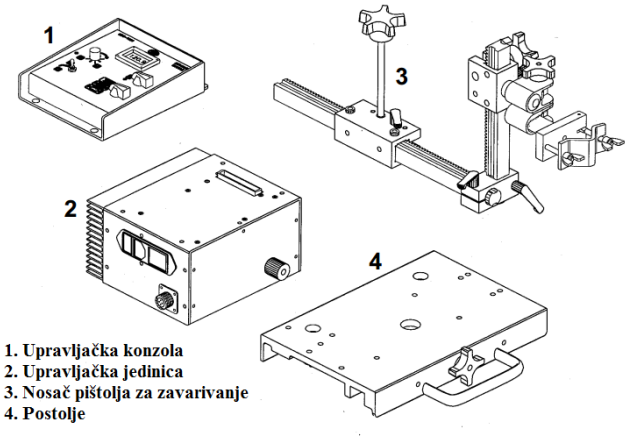


Slika 4.3 Zavarivanje korijenskog prolaza

Prolazi popune zavareni su automatiziranim CBT MAG postupkom koji je uključivao automat za zavarivanje BUG-O Systems MDS 1002 i izvor struje za zavarivanje Welbee P500L (WB – P500L). Automat (Slika 4.4) ima mogućnosti uzdužnog gibanja preko zubne letve, te mogućnost namještanja željene udaljenosti i nagiba pištolja od radnog komada (preko nosača pištolja) i upravljanje brzinama zavarivanja (preko upravljačke jedinice i konzole) (Slika 4.5).

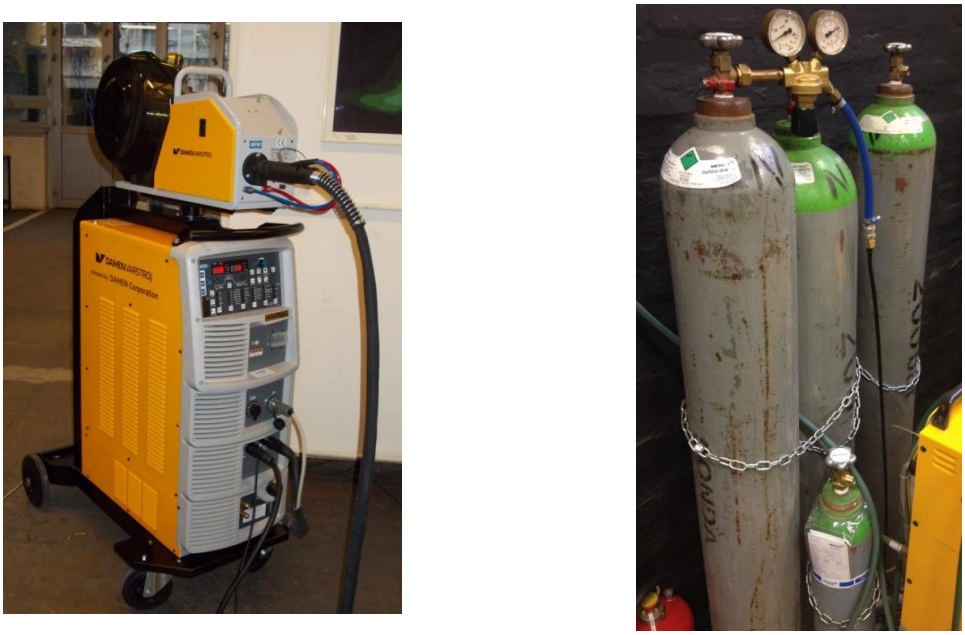


Slika 4.4 Automat BUG-O Systems MDS 1002



Slika 4.5 Sastavni dijelovi automata BUG-O Systems MDS 1002 [100]

Izvor struje za zavarivanje WB – P500L kojeg je razvila i proizvela tvrtka OTC Daihen predstavlja najnoviju generaciju izvora struje za MAG zavarivanje i prvi je izvor struje za zavarivanje čiji je procesor (Welbee procesor) proizveden nanotehnološkim procesom. Izvor struje i korišteni zaštitni plinovi te korisničko sučelje prikazani su na slikama 4.6 i 4.7. Tehničke karakteristike WB – 500L navedene su u tablici 4.2.



a) b)

Slika 4.6 Izvor struje WB – 500L (a) i boce korištenih zaštitinih plinova (b)



Slika 4.7 Korisničko sučelje izvora struje WB – 500L

Tablica 4.2 Karakteristike izvora struje WB – 500L [101]

Izvor struje	**WB – P500L**	
Način rada	DC	Impulsno
Priključni napon, V	400 +/- 15 %	
Nazivna ulazna snaga, kVA	25	
Struja zavarivanja, A	30 – 500	30 – 400
Napon zavarivanja, V	12 – 39	12 – 34
Težina, kg	83	
Dimenzije (Š×D×V), mm	395×710×592	

4.3. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je visokočvrsti čelik API 5L X80. Oznaka je to prema API normi (eng. *American Petroleum Institute*) koja definira gradaciju čelika za izradu cjevovoda. Osnovna gradacija čelika za izradu cjevovoda koristi oznake A i B, no čelici s većim čvrstoćama nose oznaku X s pratećim brojem koji označava granicu razvlačenja izraženu u ksi (kilopounds per square inch). Prema opisanoj metodologiji označavanja, čelik API 5L X80 ima granicu razvlačenja od 80 ksi što preračunato u SI jedinice iznosi 551 N/mm^2. Mehanička svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala dani su u tablicama 4.3 i 4.4. Prema normi HRN EN 10208-2:1996 utvrđena je oznaka čelika koja glasi L555MB.

Tablica 4.3 Mehanička svojstva čelika API 5L X80 [102][103]

Mehaničko svojstvo	**Vlačna čvrstoća, N/mm^2**		**Granica razvlačenja, N/mm^2**	
X80	Min	Max	Min	Max
	621	827	552	690
X80 (prema atestu)	650		557	

Tablica 4.4 Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema certifikatu i ispitivanjima [103]

API 5L X80	**Kemijski sastav (maseni udio), %**									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Ispitivanje	0,07	0,35	1,94	0,015	0,00	0,15	0,01	0,001	0,01	0,027
Atest	0,065	0,330	1,97	0,015	0,0004	0,170	0,018	0,002	0,009	-
API 5L	0,24	-	1,4	0,025	0,015	-	-	-	-	-

Za svako smanjenje udjela ugljika od 0,01 %, od normom API 5L specificiranog maksimalnog udjela, moguće je povećati udio mangana za 0,05 % iznad maksimalno specificiranog udjela do najviše 2 % za čelike gradacije X80 i više. Popratni elementi poput Ti, Nb i V mogu se koristiti ovisno o potrebama proizvodnje, ali njihov zbirni udio ne smije premašiti vrijednost 0,15 [46]. Za slučaj ispitivanog čelika API 5L X80 certifikatom materijala je utvrđena prisutnost spomenutih vrijednosti za Ti (0,014 %), Nb (0,062 %) i V (0,001 %) i njihov zbroj ne premašuje normom API 5L propisanu maksimalnu vrijednost. Iako je isporuka visokočvrstog čelika API 5L X80 moguća u raznim varijacijama kemijskog sastava (ovisno o debljini materijala) i mehaničke strukture, bitno je naglasiti da one uvijek rezultiraju vrijednostima mehaničkih svojstva propisane i regulirane API normom. Priprema spoja kod sučeljenog zavarivanja ploča dimenzija 350 mm × 150 mm × 10 mm je bila V priprema spoja otvora 60° s razmakom između ploča od 3 mm.

4.4. Dodatni materijal

Za MAG zavarivanju čelika API 5L X80 korišten je dodatni materijal LNM MoNi proizvođača Lincoln Electric (oznaka G 62 4 M Mn3NiCrMo prema EN ISO 16834). Riječ je o punoj žici promjera 1,2 mm koja se koristi za zavarivanje visokočvrstih čelika granice razvlačenja do 620 N/mm^2, te rezultira zavarenim spojevima dobrog udarnog rada loma i na temperaturi od – 40 °C [104]. Kemijski sastav dodatnog materijala dan je u tablici 4.5. Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u tablici 4.6.

Tablica 4.5 Kemijski sastav dodatnog materijala LNM MoNi [103]

LNM MoNi	**Kemijski sastav, %**						
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
	0,10	1,65	0,75	0,55	0,60	0,30	0,08

Tablica 4.6 Mehanička svojstva dodatnog materijala LNM MoNi [104]

LNM MoNi	**Mehanička svojstva**					
	Granica razvlačenja, N/mm^2	Vlačna čvrstoća, N/mm^2	Istezljivost, %	Udarni rad loma, J		
				- 20 °C	- 40 °C	- 60 °C
	635	770	19	100	90	70

4.5. Zaštitni plin

S obzirom da se u eksperimentu ispitivao i utjecaj zaštitnog plina na svojstva zavarenog spoja čelika X80 korištene su 3 različite vrste zaštitnog plina. Na taj način je bilo moguće analizirati njihov utjecaj na fiziku električnog luka, način prijenosa metala kao i strukturu zavarenog spoja. U tu svrhu korišteni su sljedeći zaštitni plinovi:

a) 18 % CO_2 i 82 % Ar (oznaka M21 prema normi HRN EN ISO 14175: 2008)

b) 59 % CO_2 i 41 % Ar

c) 100 % CO_2 (oznaka C1 prema normi HRN EN ISO 14175: 2008)

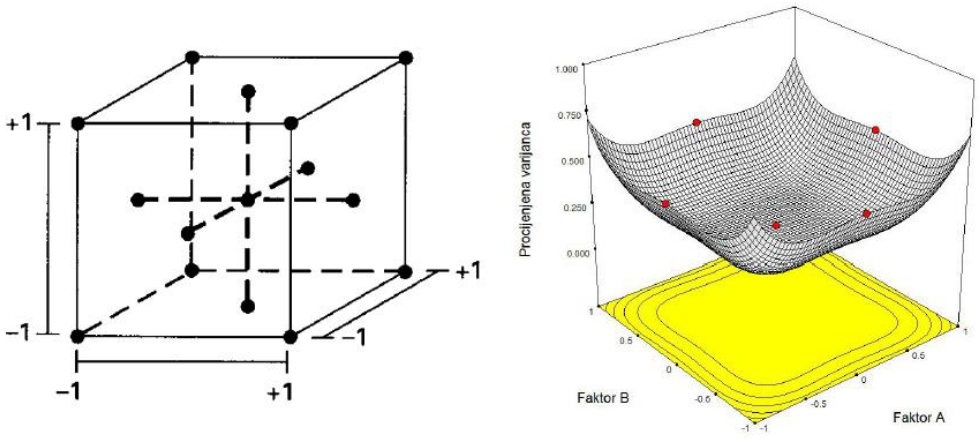
Srednja mješavina koja sadrži 59 % CO_2 nije standardna mješavina te stoga nema klasifikaciju prema normi ISO 14175: 2008, Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke. Riječ je o posebnoj mješavini izrađenoj za potrebe eksperimentalnog dijela ovog doktorskog rada, a koja je definirana prema centralno kompozitnom planu pokusa. Korišteni protoci zaštitnog plina za sva stanja pokusa i za sve prolaze popune su bili 18 l/min.

4.6. Oblikovanje eksperimenta i plan pokusa

Cilj provođenja eksperimenta je definirati i kvantificirati utjecajnost variranih parametara na udio acikularnog ferita i odgaranje legirnih elemenata (Si i Mn) u svrhu definiranja optimalnih parametara koji rezultiraju zavarenim spojem optimalnih svojstava i to pomoću matematičkog modela razvijenog metodom odzivnih površina.

Radi boljeg razumijevanja kompleksnijih procesa, kao što je proces zavarivanja, potrebna je primjena naprednih metoda poput metode odzivnih površina (engl. *Responce Surface Methods - RSM*). Pod kompleksnije procese podrazumijevaju se procesi u kojima postoji složeni odnos između odziva i variranih parametara procesa. Svrha metode odzivnih površina je dobivanje matematičkog modela koji omogućava određivanje vrijednosti ulaznih varijabli koje rezultiraju željenim odzivom. Ukoliko ispitani parametri (faktori) predstavljaju one koji najviše utječu na proces te ako su eksperimentalno dobiveni podaci dovoljno točni i precizni, matematičkim modelom uz poznavanje vrijednosti parametara (faktora) moguće je predvidjeti odziv.

Nakon odabira metode odzivnih površina bilo je potrebno odabrati kojim planom pokusa će se izvoditi eksperiment. Odlučeno je prema specifičnim zahtjevima eksperimenta da će on biti proveden shodno centralno kompozitnom planu pokusa uz vrijednost koeficijenta α=1, odnosno plošno centriranom planu pokusa (eng. CCF – *Face Centered Composite Design*), a ne češće korištenom opisanom planu pokusa (eng. CCC – *Circumscribed Composite Design*) gdje je vrijednost koeficijenta α različita i veća od 1. Slika 4.8 prikazuje grafički prikaz plošnog centralno kompozitnog plana pokusa.



Slika 4.8 Grafički prikaz plošno centriranog centralnog kompozitnog plana pokusa s odgovarajućom odzivnom površinom [106]

Koeficijent α određuje udaljenost točaka plana pokusa od centra, a kada je α=1, znači da se radi o plošno centriranom centralno kompozitnom planu pokusa u kojem nije zadržana rotabilnost. Jedna od karakteristika ortogonalnosti je balansiranost pokusa (rotabilnost), što znači da su svi parametri stavljeni u jednaku poziciju te tako nema favoriziranja pojedinog od njih (svaka se projektna varijabla pojavljuje jednak broj puta i po redovima i po stupcima). Rotabilan plan pokusa jest onaj kod kojega je vrijednost funkcije procijenjene varijance jednaka u svim točkama koje su jednako udaljene od centra plana pokusa [107]. Prilagodba u vidu izmjene vrijednosti koeficijenta α je moguća, ali i nužna, a posljedica je tehnoloških ograničenja variranih parametara. Naime opisani centralno kompozitni plan pokusa (CCC) iziskivao bi korištenje zaštitnog plina s udjelom aktivne komponente (CO_2) većem od 100 % što, naravno, nije moguće.

Nakon izvođenja pokusa i izvršenog mjerenja, shodno planu eksperimenta potrebno je prvo analizirati varijancu, odnosno utvrditi značajnost doprinosa pojedinih parametara te utvrditi međusobni utjecaj faktora analizom efekata. Model ovisnosti će se opisati regresijskom jednadžbom višeg reda te će se analizirati greške u eksperimentalnom prostoru i pritom detektirati nelinearnosti u odnosima.

Tablica 4.7 prikazuje sva stanja pokusa definirana plošno centriranim centralno kompozitnim planom pokusa zajedno s pridruženim oznakama uzoraka. Prema planu pokusa definirano je 19 stanja pokusa uz 3 ponavljanja u centru. Ponavljanja u centru se izvode kako bi bilo moguće odrediti čistu grešku i zakrivljenost odzivne površine u eksperimentalnom prostoru [108], [109].

Tablica 4.7 Generirana stanja pokusa i pridružene oznake uzoraka

Oznaka uzorka	Redoslijed izvođenja	Slučajni redoslijed izvođenja	Udio CO_2, %	Brzina dodavanja žice, m/min	Način prijenosa metala, Konvencionalni/CBT
1	1	10	18	4	Konvencionalni
2	12	9	18	4	CBT
3	5	5	18	5,5	Konvencionalni
4	16	19	18	5,5	CBT
5	3	14	18	7	Konvencionalni
6	14	16	18	7	CBT
7	7	15	59	4	Konvencionalni
8	18	22	59	4	CBT
9	11	6	59	5,5	Konvencionalni
10	9	11	59	5,5	Konvencionalni
11	10	17	59	5,5	Konvencionalni
12	22	18	59	5,5	CBT
13	21	13	59	5,5	CBT
14	20	2	59	5,5	CBT
15	8	8	59	7	Konvencionalni
16	19	3	59	7	CBT
17	2	7	100	4	Konvencionalni
18	13	21	100	4	CBT
19	6	1	100	5,5	Konvencionalni
20	17	4	100	5,5	CBT
21	4	12	100	7	Konvencionalni
22	15	20	100	7	CBT

4.7. Parametri zavarivanja

Definiranjem razina variranih faktora, osnovnog i dodatnog materijala i postupka zavarivanja, pristupilo se zavarivanju uzoraka. Korišteni parametri zavarivanja uzoraka dani su u tablici 4.8.

Tablica 4.8 Parametri zavarivanja uzoraka prema odgovarajućim stanjima pokusa

Stanje pokusa	Prolaz	Udio CO_2, %	Brzina dodavanja žice, m/min	Način prijenosa metala, KV/CBT	Očitane vrijednosti		Brzina zavarivanja, cm/min	Protok plina, l/min	Unos topline, kJ/cm
					Jakost struje, A	Napon, V			
1	korijen	18	3,5	KV	105	18,7	11,6	16	8,13
	1.	18	4	KV	160	17,2	25	18	5,29
	2.	18	4	KV	162	16,9	25	18	5,26
	3.	18	4	KV	158	17,2	25	18	5,22
	4.	18	4	KV	158	17,3	25	18	5,25
	5.	18	4	KV	155	17,1	25	18	5,09
2	korijen	18	3,5	KV	105	18,9	11,6	16	8,22
	1.	18	4	CBT	160	17,3	25	18	5,32
	2.	18	4	CBT	161	17,2	25	18	5,32
	3.	18	4	CBT	153	17,4	25	18	5,11
	4.	18	4	CBT	155	17,2	25	18	5,12
	5.	18	4	CBT	153	17,0	25	18	5,00
3	korijen	18	3,5	KV	103	18,8	11,6	16	8,02
	1.	18	5,5	KV	198	19,4	25	18	7,38
	2.	18	5,5	KV	196	19,1	25	18	7,19
	3.	18	5,5	KV	195	19,1	25	18	7,15
	4.	18	5,5	KV	195	18,9	25	18	7,08
4	korijen	18	3,5	KV	103	18,7	11,6	16	7,97
	1.	18	5,5	CBT	195	18,5	25	18	6,93
	2.	18	5,5	CBT	195	18,1	25	18	6,78
	3.	18	5,5	CBT	189	18,4	25	18	6,68
	4.	18	5,5	CBT	182	18,2	25	18	6,36
5	korijen	18	3,5	KV	104	18,8	11,6	16	8,09
	1.	18	7	KV	238	22,0	25	18	10,06
	2.	18	7	KV	235	22,7	25	18	10,25
	3.	18	7	KV	236	22,8	25	18	10,34
6	korijen	18	3,5	KV	103	18,7	11,6	16	7,97
	1.	18	7	CBT	237	20,1	25	18	9,15
	2.	18	7	CBT	225	20,1	25	18	8,69
	3.	18	7	CBT	220	20,3	25	18	8,58
7	korijen	59	3,5	KV	100	19,1	11,6	16	7,91
	1.	59	4	KV	158	19,4	25	18	5,89
	2.	59	4	KV	152	19,5	25	18	5,69
	3.	59	4	KV	156	19,4	25	18	5,81
	4.	59	4	KV	153	19,4	25	18	5,70
	5.	59	4	KV	148	19,5	25	18	5,54

Nastavak tablice 4.8.

Stanje pokusa	Prolaz	Udio CO_2, %	Brzina dodavanja žice, m/min	Način prijenosa metala, KV/CBT	Očitane vrijednosti		Brzina zavarivanja, cm/min	Protok plina, l/min	Unos topline, kJ/cm
					Jakost struje, A	Napon, V			
8	korijen	59	3,5	KV	105	19,0	11,6	16	8,26
	1.	59	4	CBT	148	18,7	25	18	5,32
	2.	59	4	CBT	150	18,5	25	18	5,33
	3.	59	4	CBT	151	18,6	25	18	5,39
	4.	59	4	CBT	145	18,5	25	18	5,15
	5.	59	4	CBT	140	18,6	25	18	5,00
9	korijen	59	3,5	KV	101	19,1	11,6	16	7,99
	1.	59	5,5	KV	190	20,7	25	18	7,55
	2.	59	5,5	KV	181	20,9	25	18	7,27
	3.	59	5,5	KV	184	20,7	25	18	7,32
	4.	59	5,5	KV	189	20,9	25	18	7,59
10	korijen	59	3,5	KV	100	19,2	11,6	16	7,95
	1.	59	5,5	KV	182	20,9	25	18	7,31
	2.	59	5,5	KV	179	20,7	25	18	7,12
	3.	59	5,5	KV	184	20,5	25	18	7,25
	4.	59	5,5	KV	188	20,9	25	18	7,55
11	korijen	59	3,5	KV	101	19,0	11,6	16	7,94
	1.	59	5,5	KV	188	20,6	25	18	7,44
	2.	59	5,5	KV	190	20,7	25	18	7,55
	3.	59	5,5	KV	184	20,9	25	18	7,39
	4.	59	5,5	KV	187	21,1	25	18	7,58
12	korijen	59	3,5	KV	103	19,2	11,6	16	8,19
	1.	59	5,5	CBT	174	19,8	25	18	6,62
	2.	59	5,5	CBT	178	20,0	25	18	6,84
	3.	59	5,5	CBT	177	20,1	25	18	6,83
	4.	59	5,5	CBT	173	20,3	25	18	6,75
13	korijen	59	3,5	KV	104	19,1	11,6	16	8,22
	1.	59	5,5	CBT	185	19,8	25	18	7,04
	2.	59	5,5	CBT	180	20,1	25	18	6,95
	3.	59	5,5	CBT	178	20,1	25	18	6,87
	4.	59	5,5	CBT	183	20,0	25	18	7,03
14	korijen	59	3,5	KV	101	19,0	11,6	16	7,94
	1.	59	5,5	CBT	180	20,1	25	18	6,95
	2.	59	5,5	CBT	175	20,3	25	18	6,82
	3.	59	5,5	CBT	173	20,0	25	18	6,65
	4.	59	5,5	CBT	175	20,1	25	18	6,76
15	korijen	59	3,5	KV	100	19,1	11,6	16	7,91
	1.	59	7	KV	221	23,7	25	18	10,06
	2.	59	7	KV	210	23,8	25	18	9,60
	3.	59	7	KV	223	23,4	25	18	10,02

Nastavak tablice 4.8.

Stanje pokusa	Prolaz	Udio CO_2, %	Brzina dodavanja žice, m/min	Način prijenosa metala, KV/CBT	Očitane vrijednosti		Brzina zavarivanja, cm/min	Protok plina, l/min	Unos topline, kJ/cm
					Jakost struje, A	Napon, V			
16	korijen	59	3,5	KV	106	19,1	11,6	16	8,38
	1.	59	7	CBT	210	22,3	25	18	8,99
	2.	59	7	CBT	208	22,3	25	18	8,91
	3.	59	7	CBT	205	22,2	25	18	8,74
17	korijen	100	3,5	KV	104	19,6	11,6	16	8,44
	1.	100	4	KV	160	19,5	25	18	5,99
	2.	100	4	KV	163	19,5	25	18	6,11
	3.	100	4	KV	160	19,4	25	18	5,96
	4.	100	4	KV	157	19,5	25	18	5,88
	5.	100	4	KV	158	19,3	25	18	5,86
18	korijen	100	3,5	KV	105	19,5	11,6	16	8,48
	1.	100	4	CBT	150	18,8	25	18	5,42
	2.	100	4	CBT	150	18,7	25	18	5,39
	3.	100	4	CBT	151	18,6	25	18	5,39
	4.	100	4	CBT	148	18,8	25	18	5,34
	5.	100	4	CBT	148	18,7	25	18	5,32
19	korijen	100	3,5	KV	105	19,6	11,6	16	8,52
	1.	100	5,5	KV	200	21,2	25	18	8,14
	2.	100	5,5	KV	190	21,1	25	18	7,70
	3.	100	5,5	KV	195	21,1	25	18	7,90
	4.	100	5,5	KV	193	21,2	25	18	7,86
20	korijen	100	3,5	KV	106	19,6	11,6	16	8,60
	1.	100	5,5	CBT	181	19,9	25	18	6,92
	2.	100	5,5	CBT	180	20,1	25	18	6,95
	3.	100	5,5	CBT	178	20,2	25	18	6,91
	4.	100	5,5	CBT	177	20,1	25	18	6,83
21	korijen	100	3,5	KV	103	19,4	11,6	16	8,27
	1.	100	7	KV	229	23,8	25	18	10,47
	2.	100	7	KV	220	24,2	25	18	10,23
	3.	100	7	KV	227	23,5	25	18	10,25
22	korijen	100	3,5	KV	104	19,5	11,6	16	8,40
	1.	100	7	CBT	215	22,5	25	18	9,29
	2.	100	7	CBT	205	22,4	25	18	8,82
	3.	100	7	CBT	211	22,4	25	18	9,08

Unos topline računa se prema izrazu [46]:

$$E = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta \quad (9)$$

Gdje je:

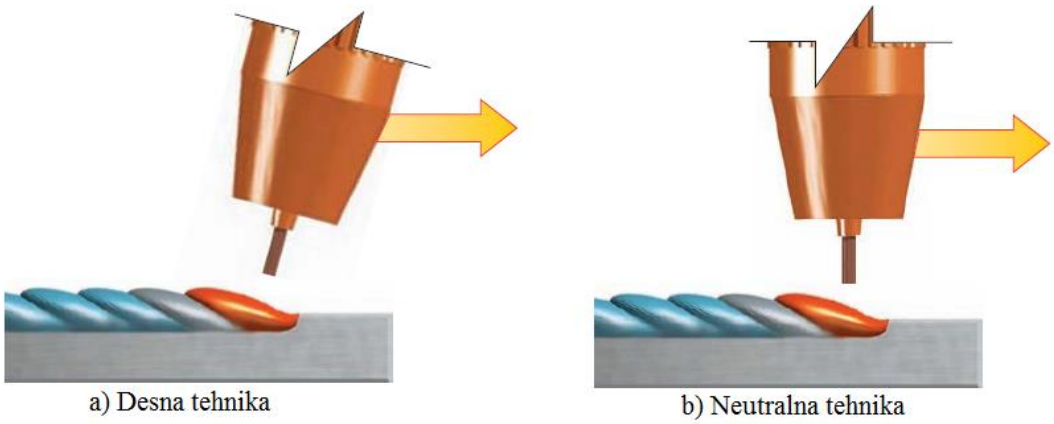
U – napon zavarivanja, V

I – Jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, mm/s

η - stupanj iskorištenja postupka zavarivanja.

Kao što je iz tablice 4.8 i vidljivo, ovisno o brzini dodavanja žice, odnosno stanju pokusa, varirao je i broj prolaza popune i to od 3 do 5 prolaza popune. Rezultat je to relativno malih unosa topline koji su posljedica zadržavanja načina prijenosa metala u području kratkih spojeva. Prilikom zavarivanja korijenskog prolaza mala brzina zavarivanja je rezultat tehnike njihanja. Iako je na privjesku za učenje robota postavljena brzina zavarivanja od 32 cm/min, zbog njihanja je krajnja brzina zavarivanja u smjeru gibanja iznosila 11,6 cm/min. Položaj pištolja za zavarivanje je u slučaju zavarivanja korijenskog prolaza bio pozicioniran u blagu desnu tehniku (nagib pištolja od 15° od vertikale – Slika 4.9, a)) dok je u slučaju zavarivanja prolaza popune pištolj bio u neutralnom položaju (okomit na radni komad – Slika 4.9, b)).



Slika 4.9 Položaji pištolja kod zavarivanja uzoraka

Slobodni kraj žice je u slučaju robotiziranog zavarivanja bio 15 mm, dok pri automatiziranom zavarivanju prolaza popune vrijednost slobodnog kraja žice iznosila 12 mm. Prilikom zavarivanja uzoraka održavana je međuprolazna temperatura ispod 100°C.

4.8. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon provedenog zavarivanja ploča potrebno je bilo pristupiti izradi ispitnih uzoraka za sva stanja pokusa prema normi HRN EN ISO 15614-1. Prvotno su ploče plinskim postupkom izrezane na veće segmente. Korišteni plinovi za plinsko rezanje su bili acetilen i kisik uz brzinu rezanja od 35 cm/min. Nakon toga je uslijedilo rezanje na pili na točnu mjeru te kao zadnji korak izvršeno je brušenje. Ručno grubo brušenje je izvedeno brusnim papirom smanjujućih veličina zrnatosti i to redom: P120, P240, P320, P400, P500, P600. Prilikom prelaska na brusne papire različitih zrnatosti smjer brušenja uvijek je mijenjan za 90°. Daljnje brušenje uzoraka nastavljeno je na uređaju Phoenix Alpha Grinder Polisher na kojem se kao sredstvo za hlađenje koristi voda. Na spomenutom uređaju korišten je brusni papir od silicij-karbida, dok je brzina brušenja bila 300 okr/min za sve finoće brusnog papira. Korištene oznake brusnog papira su bile P1200, P2500 i završni brusni papir je bio zrnatosti P4000. Kao i kod ručnog brušenja, nakon svake izmjene brusnog papira, ispitni uzorak je zarotiran za 90°. Nakon završenog brušenja uzorci su isprani vodom (kako bi se uklonile nečistoće) te su prebačeni na uređaj DAP-V koji služi za poliranje uzoraka. Poliranje je izvršeno brzinom od 150 okr/min pomoću tkanine i dijamantne paste Diamond Polishing Compound 1 μm. Tijekom poliranja uzorci su hlađeni tekućinom DP - Lubricant Blue kako ne bi došlo do strukturnih promjena u uzorcima. Nakon izvršenog poliranja uzorci su očišćeni etilnim alkoholom i suhom vatom. U svrhu izrade uzoraka za provedbu određivanja mikrostrukturnih promjena ispitni uzorci nagriženi su u tropostotnoj otopini dušične kiseline HNO_3 u destiliranoj vodi. Za daljnju makrostrukturnu analizu uzorci su nagriženi u sedam postotnoj otopini dušične kiseline HNO_3 u alkoholu. Slika 4.10 prikazuje gotove i obrađene uzorke. Gruba priprema uzoraka izvedena je u Laboratoriju za zavarivanje, dok je nagrizanje, fino brušenje i poliranje izvršeno u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 4.10 Pripremljeni uzorci za ispitivanja

4.9.Provedba ispitivanja svojstava zavarenih spojeva

U svrhu analize utjecaja variranih parametara na svojstva zavarenog spoja čelika X80 provedena su sljedeća ispitivanja:

- Analiza dinamičke karakteristike izvora struje WB – 500L,
- Mjerenje mikrotvrdoće HV 0,2 u područjima: metala zavara, grubozrnate zone utjecaja topline i sitnozrnate zone utjecaja topline – po vertikalnoj liniji,
- Analiza kemijskog sastava uključaka u metalu zavara,
- Analiza kemijskog sastava metala zavara,
- Analiza mikrostrukturnih elemenata unutar metala zavara,
- Mjerenje geometrije zavarenog spoja (nadvišenje, širina ZUT-a).

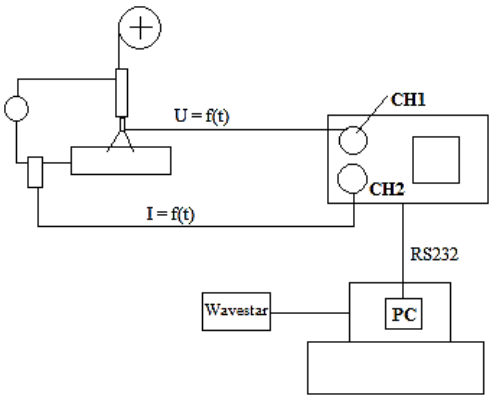
Analiza dinamičke karakteristike *u, i = f (t)* izvora struje WB – 500L

Dinamička karakteristika prikazuje promjenu napona i struje u jedinici vremena prilikom zavarivanja. Ovisno o postupku zavarivanja, registriraju se promjene napona i jakosti struje zavarivanja do 10 ili više kHZ, pri čemu se koriste različiti sustavi za praćenje, odnosno sustavi za mjerenje, registraciju i obradu glavnih parametara zavarivanja (napona i struje). Dinamičkim praćenjem parametara zavarivanja pruža se mogućnost ocjene stabilnosti procesa i upravljanja parametrima zavarivanja. Budući da ne postoji jedinstveni način za opisati dinamičku karakteristiku nekog uređaja za zavarivanje, potrebno ju je mjeriti tijekom zavarivanja.

Prilikom snimanja dinamičkih karakteristika izvora struje WB – 500L korištena je oprema koja uključuje osobno računalo i osciloskop (Slika 4.11). Korišteni osciloskop je dvokanalni Tektronix TDS 210 koji nudi veliko mjerno frekvencijsko područje, automatizaciju mjernih značajki i jednostavnost korištenja. Dva ulazna kanala su kontrolirana svaki zasebno pomoću potenciometara i prekidača. Podaci dobiveni osciloskopom analizirani su i obrađeni na osobnom računalu pomoću programske aplikacije Wavestar. Shema spajanja opisane mjerne opreme dana je na slici 4.12. Analiza dinamičke karakteristike provedena je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



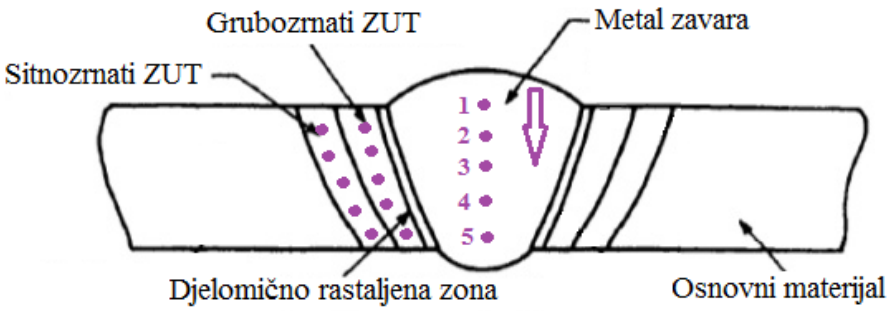
Slika 4.11 Radno mjesto s opremom za snimanje dinamičkih karakteristika



Slika 4.12 Shema spajanja mjerne opreme [20]

Mjerenje mikrotvrdoće po Vickersu

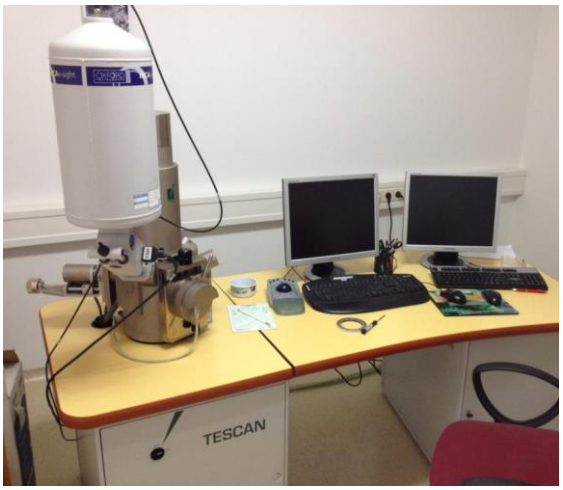
Mikrotvrdoće uzoraka izmjerene su metodom po Vickersu HV 0,2. Sila primijenjena za mjerenje tvrdoće iznosila je 1,961 N, a cjelokupno mjerenje izvedeno je prema normi EN ISO 6507-1:2005. Raspored i smjer mjerenja mjernih točaka mikrotvrdoće dan je na slici 4.13.



Slika 4.13 Raspored mjernih točaka mikrotvrdoće

Analiza nemetalnih uključaka

Analiza nemetalnih uključaka uključivala je određivanje dimenzija i kemijskog sastava uključaka. U tu svrhu korišten je skenirajući elektronski mikroskop (SEM) TESCAN VEGA 5136 MM koji je opremljen s Oxford EDS detektorom (Slika 4.14). Korištena tehnika za dobivanje slika mikrostrukture ispitanih uzoraka bila je pomoću raspršenih elektrona (eng. BSE – *Back Scatter Electron*).



Slika 4.14 Skenirajući elektronski mikroskop korišten za analizu nemetalnih uključaka

Princip rada skenirajućeg elektronskog mikroskopa temelji se na skeniranju površine ispitivanog uzorka vrlo precizno fokusiranim snopom elektrona koji pobuđuje elektrone u sastavu atoma uzorka. Energije proizašlih elektrona iz uzorka sakupljaju se i mjere detektorima te mikroprocesora stvara pseudotrodimenzionalnu sliku valnih duljina elektrona jedinstvenih za element koji se nalazi u uzorku. Mikroanaliza kemijskog sastava (eng. EDS – *Energy Dispersive Spectrometry*) provodi se na temelju činjenice da u trenutku kada ubrzani elektron, uglavnom iz snopa elektrona, izbije elektron iz unutarnje ljuske istog atoma nastaju fotoni. Zbog toga što se energija elektrona razlikuje od ljuske do ljuske unutar atoma i specifična je za svaki određeni element, energija emitirane zrake karakteristična je za pobuđeni atom. Spektrometar X-zraka prikuplja emitirane zrake, broji ih, sortira i formira spektar. Visina vrha na dobivenom spektru odgovaraju elementima prisutnim u uzorcima, a broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka. Analiza nemetalnih uključaka provedena je u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Kemijska analiza metala zavara

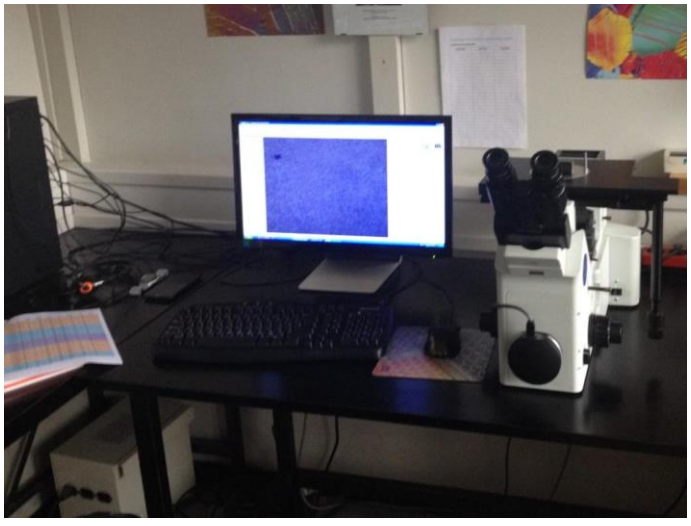
U svrhu definiranja utjecaja variranih parametara na odgaranje legirnih elemenata, uzorci su podvrgnuti kemijskoj analizi. Pomoću optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem (GDOES) određen je kemijski sastav osnovnog metala i metala zavara. Uređaj na kojem su izvršena mjerenja je GDS 850, LECO (Slika 4.15). Ovaj uređaj namijenjen je za kvantitativnu i kvalitativnu kemijsku analizu vodljivih čvrstih uzoraka. Kemijski elementi koji se mogu analizirati su: C, P, S, N, B, Cr, Ni, Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, Si, Nb, V, Ti, W, Sb, Sn, Al, Mg i Pb. Analiza kemijskih sastava metala zavara provedena je u Laboratoriju za analizu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 4.15 Optički emisijski spektrometar GDS 850, LECO

Analiza mikrostrukturnih elemenata unutar metala zavara

Za potrebe analize mikrostrukturnih elemenata unutar metala zavara uzorci su nakon poliranja nagriženi u 3 % nitalu (3 % HNO_3 u etilnom alkoholu), nakon čega su isprani u alkoholu i osušeni. Na taj način dobiveni mikroizbrusci analizirani su i snimljeni na mikroskopu Olympus GX51F-5. Spomenuti mikroskop ima ugrađenu CCD kameru koja je opremljena s računalnim programom za analizu slike AnalySIS. Korišteni mikroskop zajedno s ugrađenom CCD kamerom prikazan je na slici 4.16. Analiza mikrostrukture zavarenih spojeva provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 4.16 Mikroskop Olympus GX51F-5 s ugrađenom CCD kamerom i računalni program AnalySIS

Mjerenje geometrije zavarenog spoja

Priprema uzoraka za analizu geometrije zavarenog spoja ista je kao i kod pripreme mikroizbrusaka osim što su uzorci bili nagriženi u nešto jačoj otopini Nitala (7 % HNO_3 u etilnom alkoholu). Pripremljeni uzorci snimljeni su pomoću fotoaparata Canon C – 5050 Zoom i podvrgnuti su analizi geometrije zavara. Za geometrijsku analizu metala zavara koristio se program ImageJ s kojim je provedeno mjerenje vrijednosti širine i nadvišenja metala zavara te širine zone utjecaja topline. Princip rada računalnog programa ImageJ temelji se na pretvaranju izmjerenih piksela u odabrane mjerne jedinice. To funkcionira na način da se prije samog mjerenja karakterističnih značajki zavarenog spoja definira odnos milimetra i piksela i to pomoću naredbe *Set Scale*. Naredba *Set Scale* koristi mjerno sredstvo koje se nalazi na fotografiji zajedno s ispitnim uzorkom kako bi se definirao omjer između piksela i označene veličine na slici. Mjerenje geometrijskih značajki zavarenih spojeva provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

4.10. Metodologija vrednovanja prihvatljivosti matematičkih modela

Dobiveni rezultati prethodno opisanih mjerenja statistički su obrađeni u računalnom programu Design Expert. Rezultat statističke analize provedene u spomenutom software-u su izrađeni matematički modeli koji opisuju utjecaj variranih parametara (numeričkih i kategoričkih) na mjerena svojstva zavarenog spoja čelika X80. Dobiveni matematički modeli podvrgnuti su analizi varijance (eng. ANOVA – Analysis of variance). Prikladnost modela određivana je pomoću F-testa kojim je moguće odrediti značajnost izrađenih modela i pojedinih članova modela te odstupanje od modela. F-test se provodi tako da se od izračunatih procijenjenih varijanci analiziranih skupova podataka veća stavlja u brojnik, a manja u nazivnik zbog čega će F-vrijednost biti uvijek veća od 1.

F-vrijednost modela je omjer procijenjene varijance modela i procijenjene varijance ostataka koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance modela procijenjenoj varijanci ostataka. Veliki broj F-vrijednosti modela ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena modelom, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Vrijednost „Prob>F“ analizirane F-vrijednosti modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita (da model nije značajan). Kada je vrijednost „Prob>F“ manja od 0,05, znači da je model značajan, a u obrnutom slučaju da model nije značajan.

F-vrijednost člana modela je omjer procijenjene varijance člana modela i procijenjene varijance ostataka koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance člana modela procijenjenoj varijanci ostataka. Veliki broj F-vrijednost člana modela ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena članom modela, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Vrijednost „Prob>F“ analizirane F-vrijednosti člana modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita (da član modela nije značajan). Kada je vrijednost „Prob>F“ manja od 0,05, znači da je član modela značajan, a u obrnutom slučaju da član modela nije značajan.

F-vrijednost Odstupanje od modela je omjer procijenjene varijance Odstupanja od modela i procijenjene varijance Čiste greške koji pokazuje relativan doprinos procijenjene varijance Odstupanja od modela procijenjenoj varijanci Čiste greške. Veliki broj F-vrijednosti Odstupanje od modela ukazuje na to da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena Odstupanjem od modela, a mali broj da je varijanca moguća zbog šumova. Što je broj veći, veća je vjerojatnost da izrađeni model ne opisuje dobro pojavu. Vrijednost „Prob>F“ analizirane F-vrijednosti Odstupanja od modela je vjerojatnost da je hipoteza H_0 istinita (da Odstupanje od modela nije značajno). Kada je vrijednost „Prob>F“ manja od 0,05, znači da je Odstupanje od modela značajno, a u obrnutom slučaju da Odstupanje od modela nije značajno.

Prema potrebi, provodi se redukcija modela eliminacijom unatrag, tj. isključivanjem neznačajnih članova čija vrijednost „Prob>F“ je veća od 0,05. Ovakvim pristupom redukciji modela eliminacijom unatrag, svi članovi imaju mogućnost uključivanja te je dobiveni model znatno robusniji od pristupa uključivanjem unaprijed. U nastavku su objašnjene veličine koje su korištene za analizu i vrednovanje kvalitete izrađenih matematičkih modela.

„R-Squared“ – R-kvadrat je koeficijent determinacije koji predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka objašnjenih pomoću modela.

„Adjusted R-Squared” – Prilagođeni R-kvadrat je R-kvadrat prilagođen broju stupnjeva slobode modela u odnosu na broj stanja pokusa.

„Predicted R-Squared“ – Predviđeni R-kvadrat je mjera iznosa varijacija u novim podacima objašnjenim pomoću modela. Oba R-kvadrata („Adjusted R-Squared“ i „Predicted R-Squared“) trebala bi biti blizu broja 1, a ako im je vrijednost 1 onda je 100 % varijacije promatranih vrijednosti objašnjeno modelom. Razlika između prilagođenog R-kvadrata i predviđenog R-kvadrata ne smije biti veća od 0,2. Ako je razlika znatno veća, postoji sumnja

u vjerodostojnost podataka ili izrađeni matematički model. Ukoliko je prilagođeni R-kvadrat veći od 75 % model se može smatrati značajnim.

„Leverage“ – Utjecaj na model: nalazi se u rasponu od 0 do 1 i pokazuje koliko pojedino stanje plana pokusa utječe na predviđene vrijednosti modela. Ako model prolazi kroz pojedinu točku pokusa, tada je vrijednost ostatka u toj točki jednaka nuli i ta točka kontrolira model. Ta pojava naziva se „Leverage“ i u navedenom slučaju iznosi 1. Visoki iznos vrijednosti „Leverage“ je nepovoljan, jer ukoliko postoji neočekivana greška mjerenja u takvoj točki, ta greška snažno utječe na model.

„Internally Studentized Residuals“ – Interno Studentizirani ostaci su ostaci podijeljeni s procijenjenom standardnom pogreškom (ostaci izračunati po Student-ovoj t-razdiobi). Vrijednost mjeri broj standardnih devijacija koje razdvajaju stvarne i predviđene vrijednosti.

„Cook´s Distance“ – Cook-ova udaljenost je mjera koja pokazuje koliko se regresija mijenja ako se određena točka modela izbriše. Velike vrijednosti Cook-ove udaljenosti povezane su s visokim „Leverage“ vrijednostima i velikim Studentiziranim ostacima, a mogu biti uzrokovane greškom pri mjerenju, neadekvatnim modelom ili stanjem pokusa daleko od ostalih stanja pokusa.

„Lack of fit“ – Odstupanje od modela je veličina koja govori o varijaciji vrijednosti mjerene veličine kod ponavljanja istovjetnih stanja plana pokusa oko njihovih prosječnih vrijednosti. Ako je ova vrijednost značajna, to znači da je varijacija ponovljenih stanja pokusa veća od varijacije vrijednosti za pojedino stanje pokusa predviđeno modelom.

„Pure Error“ – Čista greška je greška ponavljanja pojedinih stanja pokusa u svrhu procjene varijance odziva kao i broja stupnjeva slobode za adekvatno statističko testiranje izrađenog modela [111].

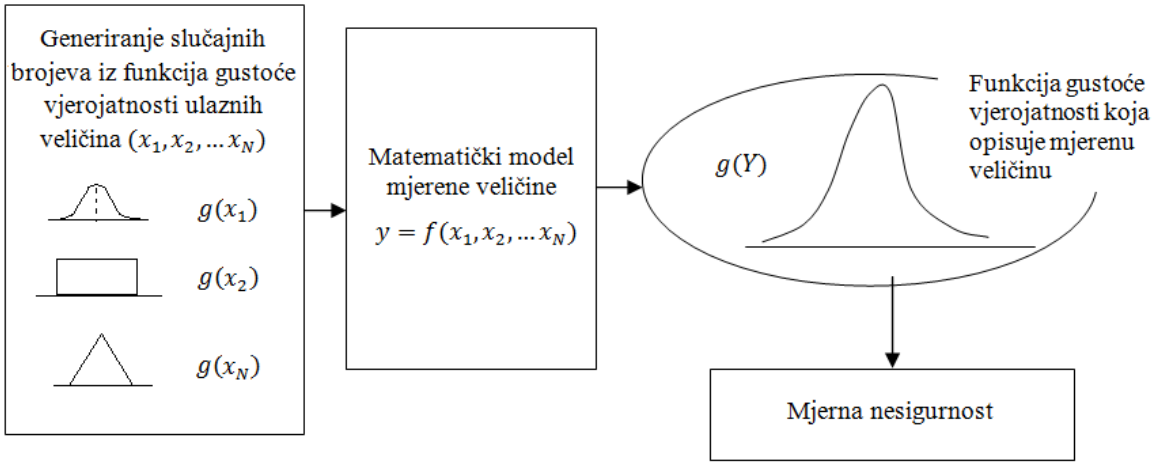
Za grafičko prikazivanje odabran je način interpretacije konturnom plohom i 3D površinom. Kao što je i ranije navedeno u poglavlju 4.6, ponavljanja nisu izvedena za sva stanja pokusa (zbog znatnog povećanja troškova izrade) nego samo za središnju točku plana pokusa. Ponavljanje je izvedeno 3 puta u svrhu određivanja Čiste greške i zakrivljenosti odzivne površine u eksperimentalnom prostoru.

Princip hijerarhije modela implicira da u slučaju kada model sadrži značajne članove višeg reda i značajne interakcije, model nužno mora imati i članove nižeg reda od kojih su

sastavljeni članovi višeg reda [112]. Iz tog su razloga u nekim modelima zadržani članovi koji samostalno nisu značajni, ali imaju značajan kvadratni član ili interakciju čijim uključivanjem se dobivaju veći koeficijenti determinacije.

4.11. Proračun mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja MCS metodom

MCS metoda (Monte Carlo simulacija) u postupku procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja temelji se na generiranju slučajnih brojeva iz funkcija gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu x_i i stvaranju odgovarajuće vrijednosti izlazne veličine y, kombinirajući različite razdiobe kojima su definirane ulazne veličine. Postupak se ponavlja M puta, te se na taj način tvori eksperimentalna funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine koja se temelji na M×y vrijednosti. Iz eksperimentalne funkcije gustoće vjerojatnosti slijedi procjena izlazne veličine y, procijenjeno standardno odstupanje, te procjena intervala $\left(y_{\left(\frac{1-P}{2}\right)\cdot M}, y_{\left(\frac{1+P}{2}\right)\cdot M}\right)$ za zadanu vjerojatnost P [113]. Primjena Monte Carlo simulacije na mjerni sustav prikazana je na slici 4.17.



Slika 4.17 Monte Carlo simulacija mjernog sustava [114]

Karakteristike MCS metode u postupku procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja su sljedeće:

- moguća je kombinacija različitih funkcija gustoća vjerojatnosti kojima su definirane ulazne veličine,
- u proračun su uključeni viši redovi razvoja funkcije u Taylerov red,
- simuliraju se nepoznate sustavne pogreške,
- simulira se korelacija između ulaznih veličina ako je prisutna.

Osnovne značajke MCS metode mogu se navesti kako slijedi:

- ulazne veličine definirane su različitim funkcijama gustoće vjerojatnosti (pdf),
- funkcije gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina međusobno se kombiniraju i čine eksperimentalnu funkciju gustoće vjerojatnosti mjerene (izlazne) veličine,
- procjena izlazna veličina y, te interval za određenu vjerojatnost P procijenjuju se iz eksperimentalne pdf izlazne veličine.

5. DOBIVENI REZULTATI MJERENJA I NJIHOVA ANALIZA

5.1. Analiza dinamičke karakteristike izvora struje WB500L

U svrhu usporedbe s konvencionalnim načinom prijenosa metala (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) i određivanja područja stabilnog prijenosa metala kroz električni luk pri CBT MAG zavarivanju snimane su dinamičke karakteristike izvora struje i to pri korištenju tri različite plinske zaštite. Tablica 5.1 prikazuje očitanje parametara tijekom snimanja dinamičkih karakteristika. Tablice 5.2, 5.3 i 5.4 prikazuju snimljene dinamičke karakteristike za slučajeve korištenja zaštitnog plina s 18 % CO_2/82 % Ar, 59 % CO_2/82 % Ar i 100 % CO_2.

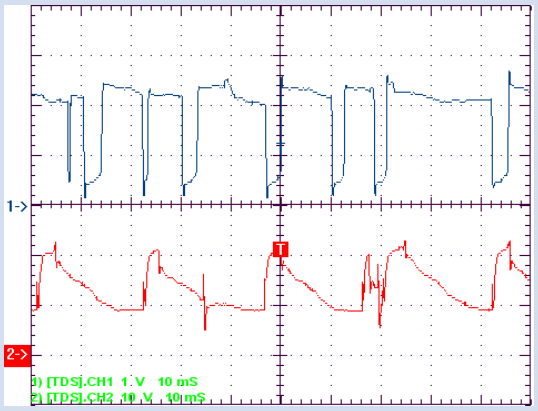
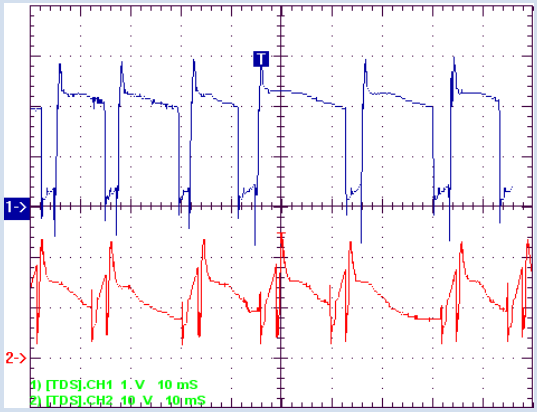
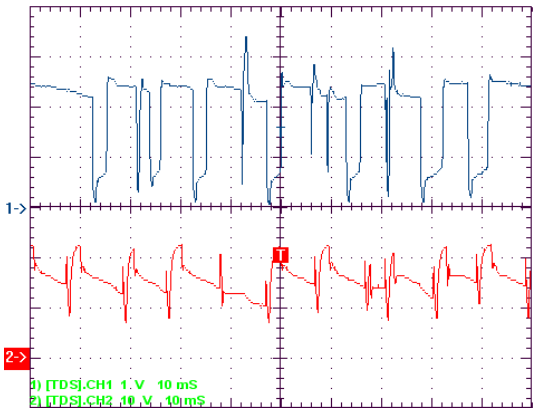
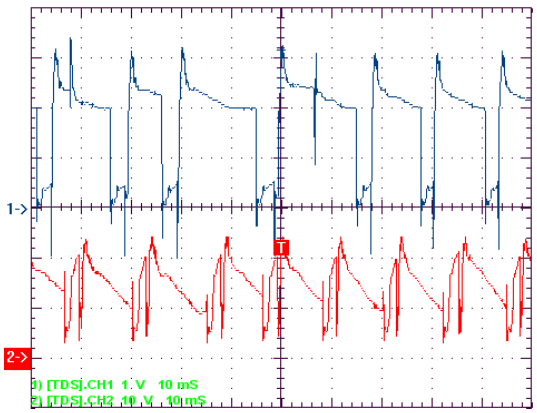
Tablica 5.1 Očitani parametri pri snimanju dinamičkih karakteristika

Udio CO_2, %	**Brzina dodavanja žice, m/min**	**Očitana jakost struje, A**	**Očitan napon, V**	**Brzina zavarivanja, cm/min**	**Način prijenosa metala, CBT/KV**
18	3	125	18,1	25	CBT
18	4	151	18,5	25	CBT
18	5	170	19,5	25	CBT
18	6	195	20,2	25	CBT
18	7	215	21,5	25	CBT
18	7,5	225	22,4	35	CBT
18	3	133	18,6	25	KV
18	4	160	19,1	25	KV
18	5	180	19,9	25	KV
18	6	200	20,9	25	KV
18	7	225	23	25	KV
18	7,5	235	23,7	35	KV
59	3	125	18,2	25	CBT
59	4	145	18,8	25	CBT
59	5	165	20,0	25	CBT
59	6	190	20,9	25	CBT
59	7	220	22,5	25	CBT
59	7,5	220	23,5	35	CBT
59	3	130	19,1	25	KV
59	4	155	19,7	25	KV
59	5	175	20,5	25	KV
59	6	195	22,0	25	KV
59	7	220	24,0	25	KV
59	7,5	235	24,5	35	KV
100	3	125	18,5	25	CBT
100	4	150	19,0	25	CBT

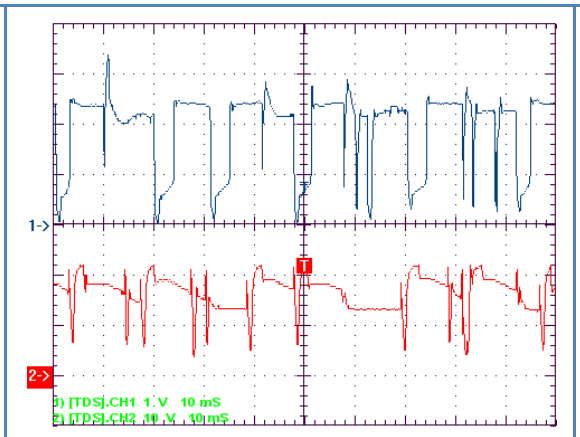
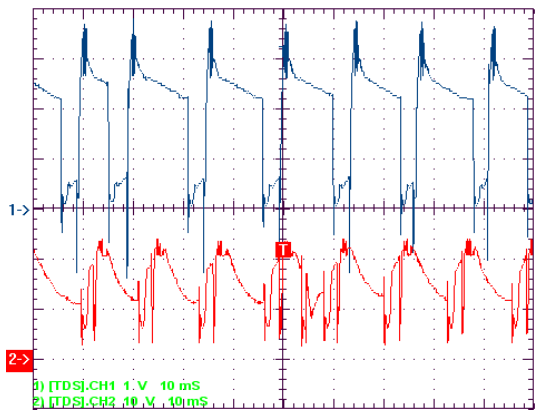
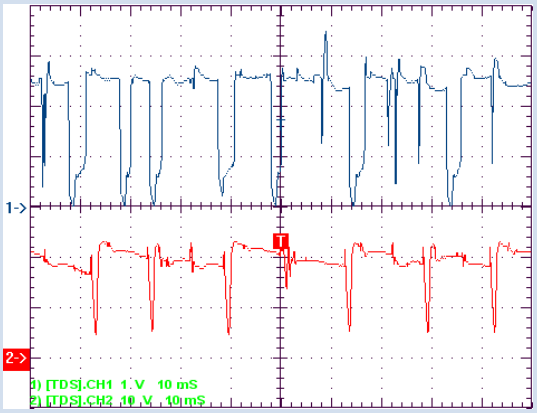
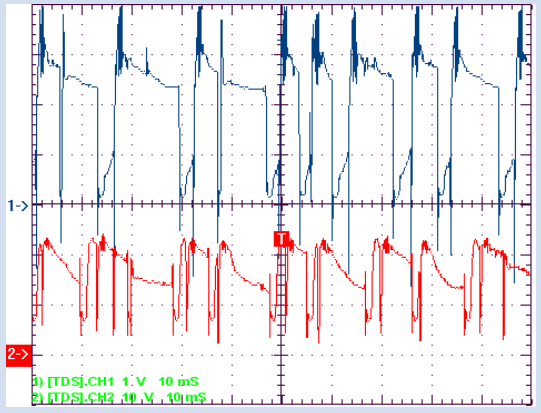
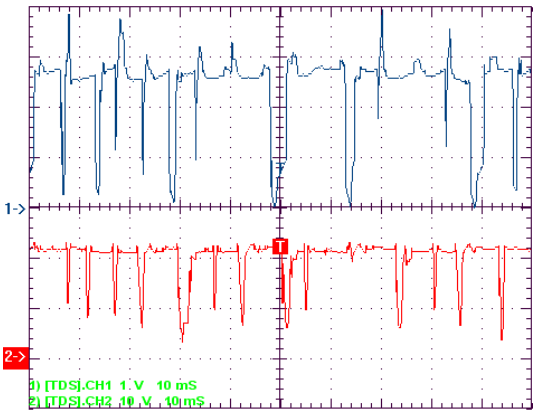
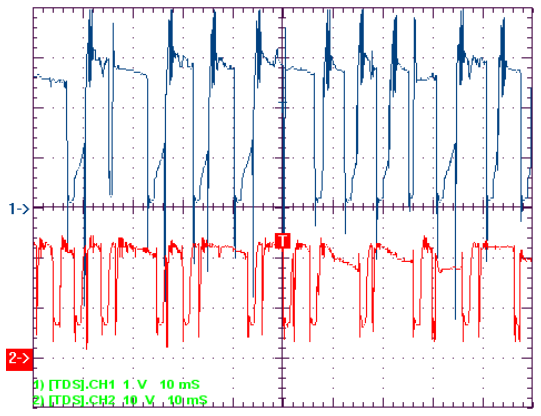
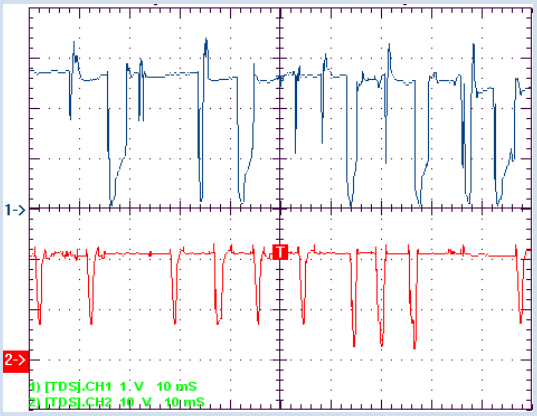
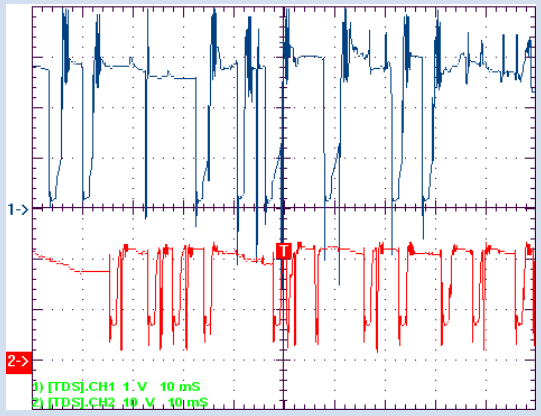
Nastavak tablice 5.1.

Udio CO_2, %	Brzina dodavanja žice, m/min	Očitana jakost struje, A	Očitan napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Način prijenosa metala, CBT/KV
100	5	175	19,9	25	CBT
100	6	190	21,0	25	CBT
100	7	220	22,8	25	CBT
100	7,5	218	24,0	35	CBT
100	3	125	19,5	25	KV
100	4	150	19,9	25	KV
100	5	170	21,0	25	KV
100	6	205	21,5	25	KV
100	7	225	24,1	25	KV
100	7,5	225	25,2	35	KV

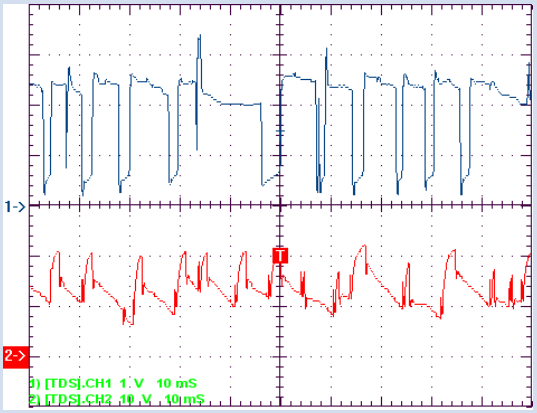
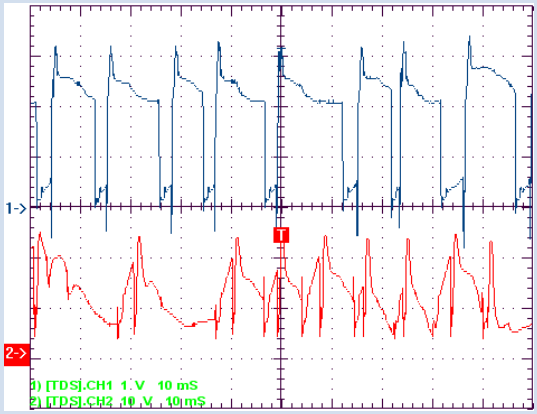
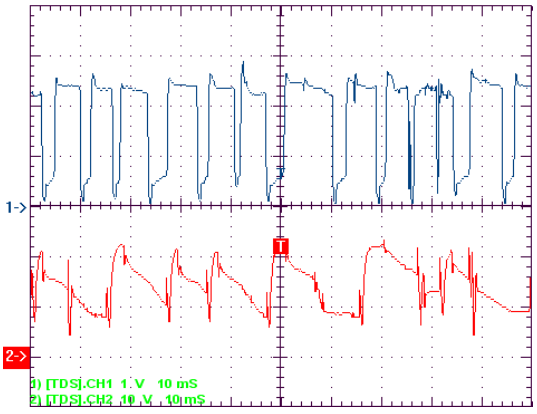
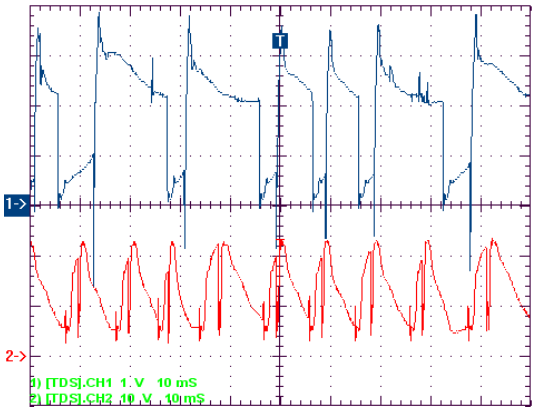
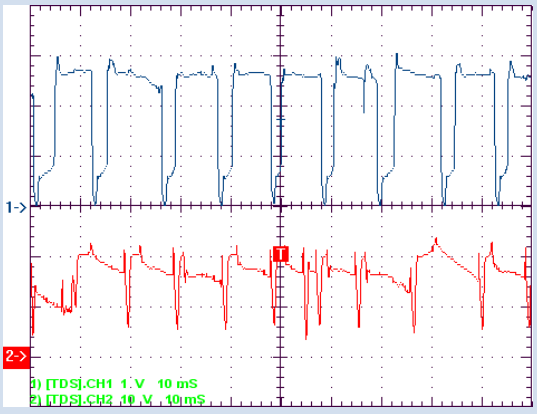
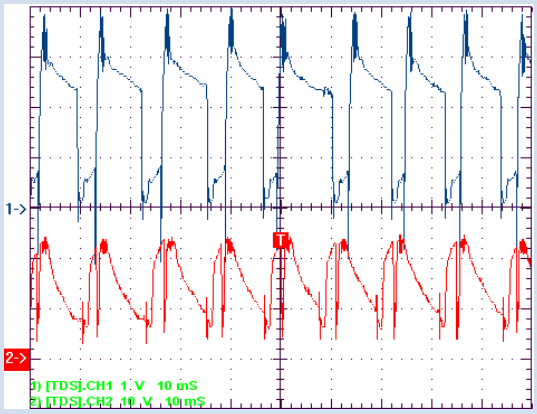
Tablica 5.2 Dinamičke karakteristike *u*, *i* = *f (t)* procesa zavarivanja pri 18 % CO_2/82 % Ar

	Konvencionalno	**CBT**
3 m/min		
4 m/min		

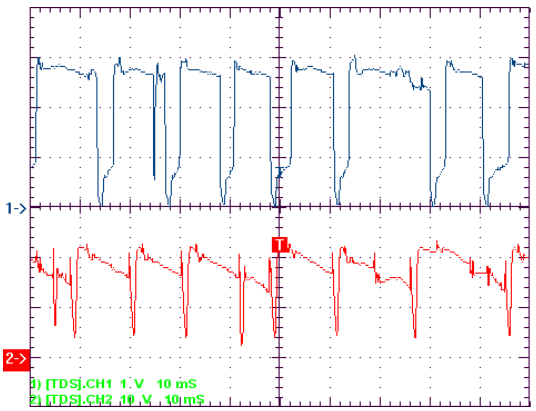
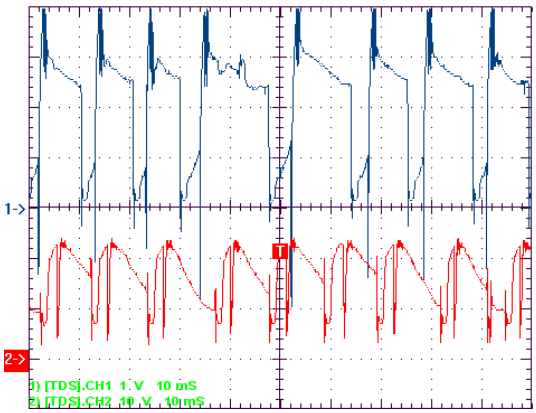
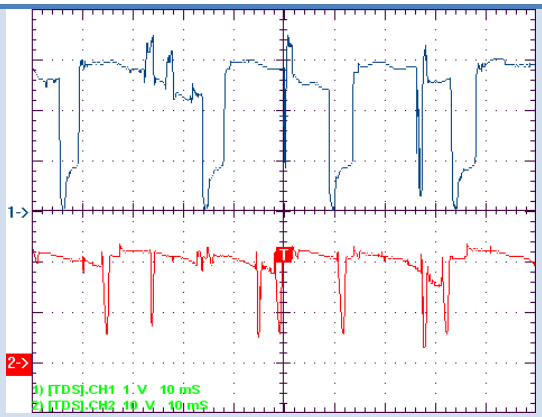
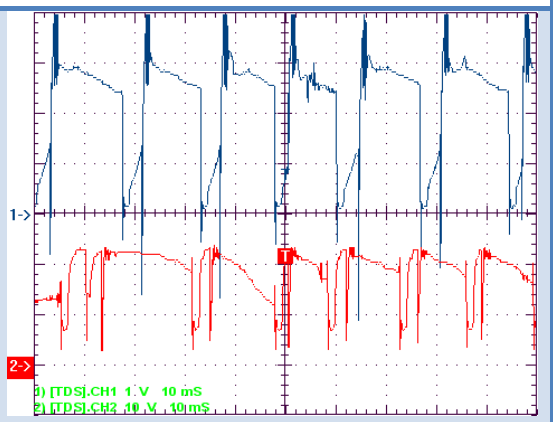
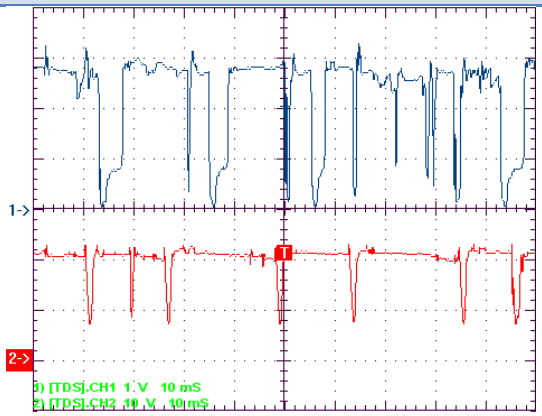
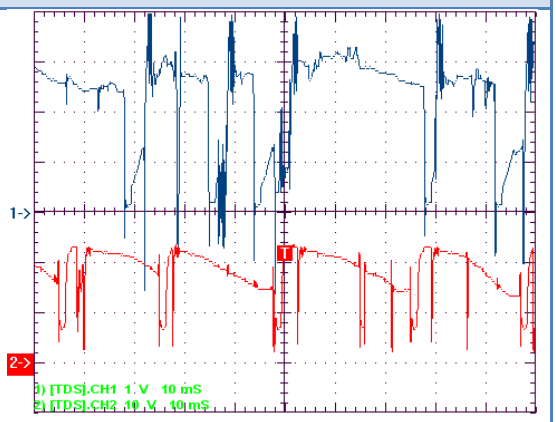
Nastavak tablice 5.2.

5 m/min		
6 m/min		
7 m/min		
7,5 m/min		

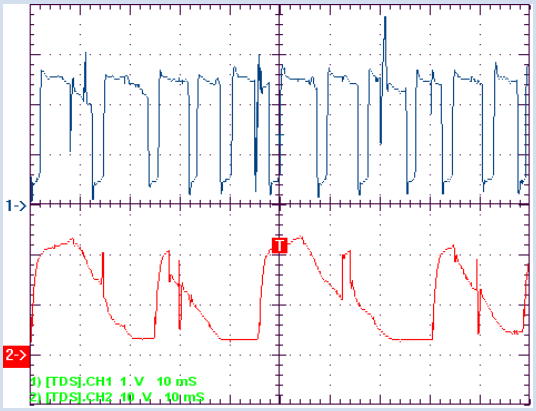
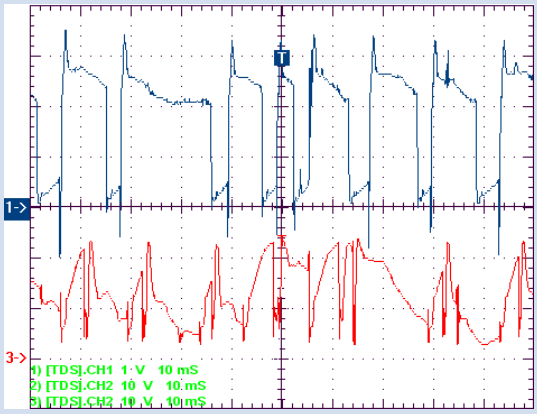
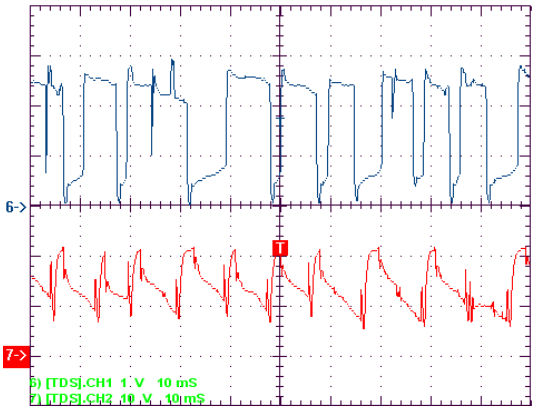
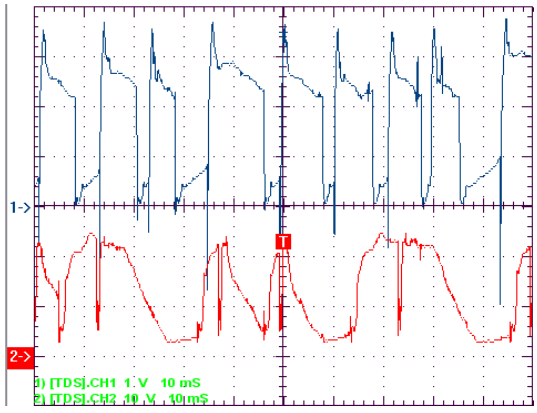
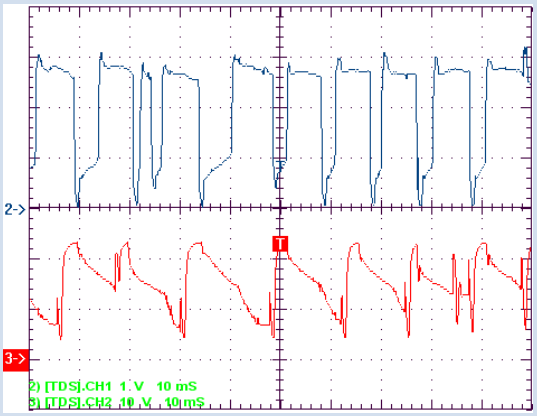
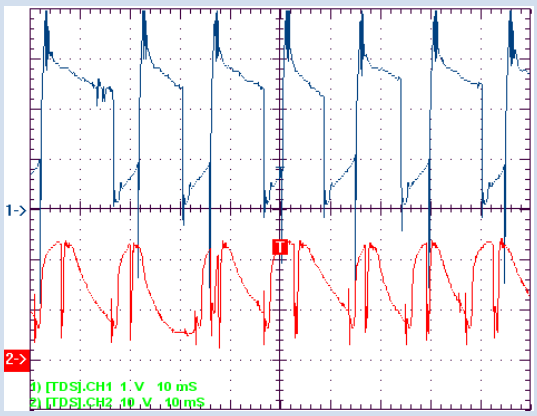
Tablica 5.3 Dinamičke karakteristike *u, i = f (t)* procesa zavarivanja pri 59 % CO_2/82 % Ar

	Konvencionalno	**CBT**
3 m/min		
4 m/min		
5 m/min		

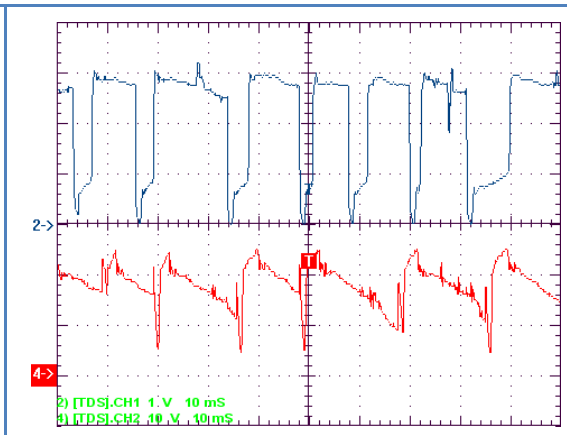
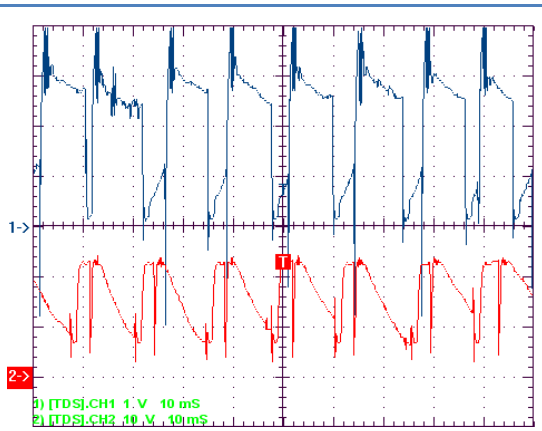
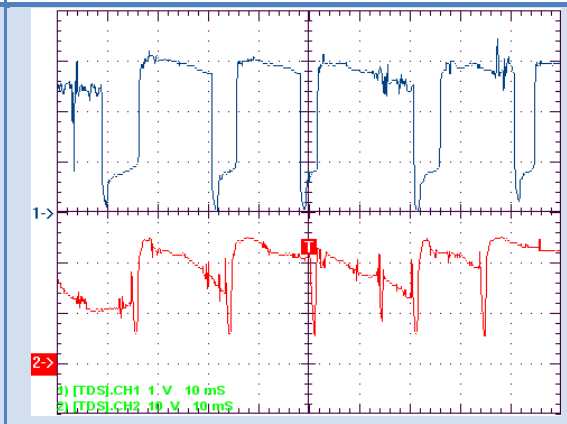
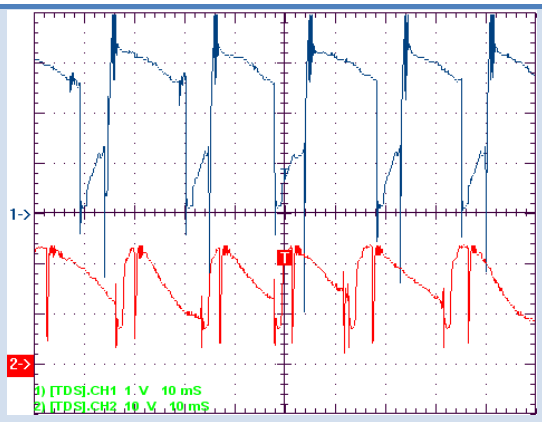
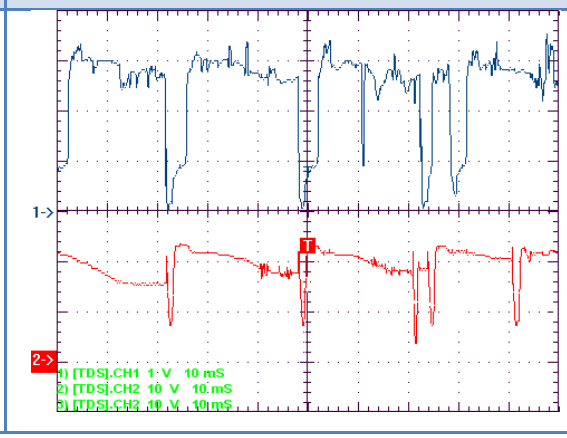
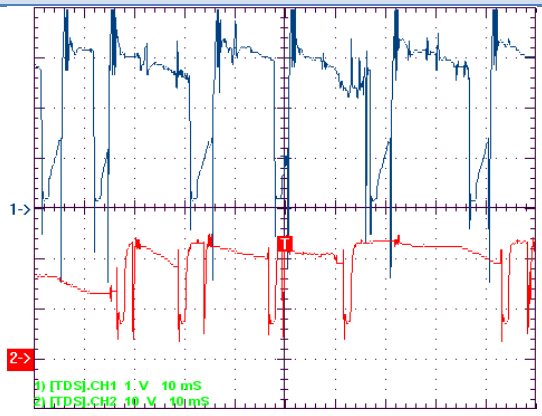
Nastavak tablice 5.3.

6 m/min		
7 m/min		
7,5 m/min		

Tablica 5.4 Dinamičke karakteristike *u, i = f (t)* procesa zavarivanja pri 100 % CO_2

	Konvencionalno	**CBT**
3 m/min		
4 m/min		
5 m/min		

Nastavak tablice 5.4.

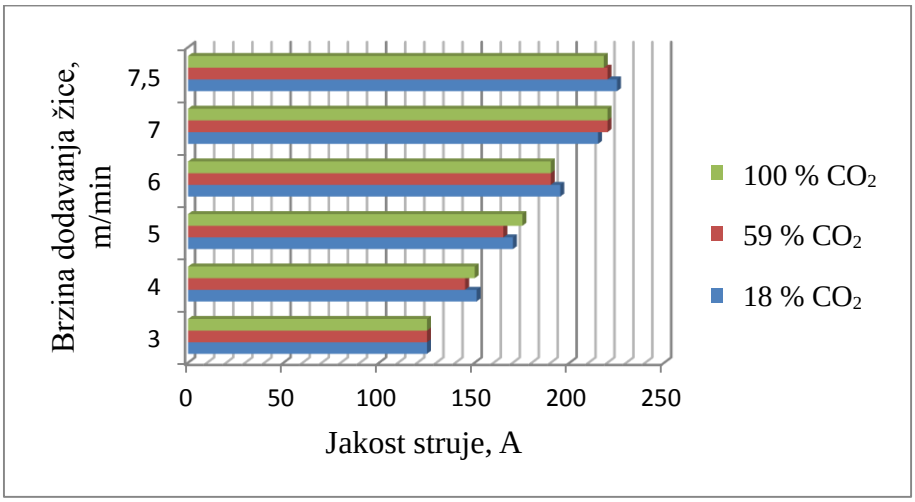
6 m/min		
7 m/min		
7,5 m/min		

Snimljene dinamičke karakteristike prikazane u tablicama 5.2, 5.3, i 5.4 jasno definiraju područja stabilnog procesa kod oba načina prijenosa metala. Pri konvencionalnom načinu prijenosa metala (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) vidljivo je da se stabilnost prijenosa metala polako gubi pri brzini dodavanja žice od 5 m/min (~170 A). U tom slučaju je vidljivo da daljnjim povećanjem brzine dodavanja žice dolazi do prelaska u područje prijelaznog luka gdje se pojavljuje prijenos krupnim kapljicama tj. iregularno se izmjenjuju ciklusi električnog luka i kratkog spoja.

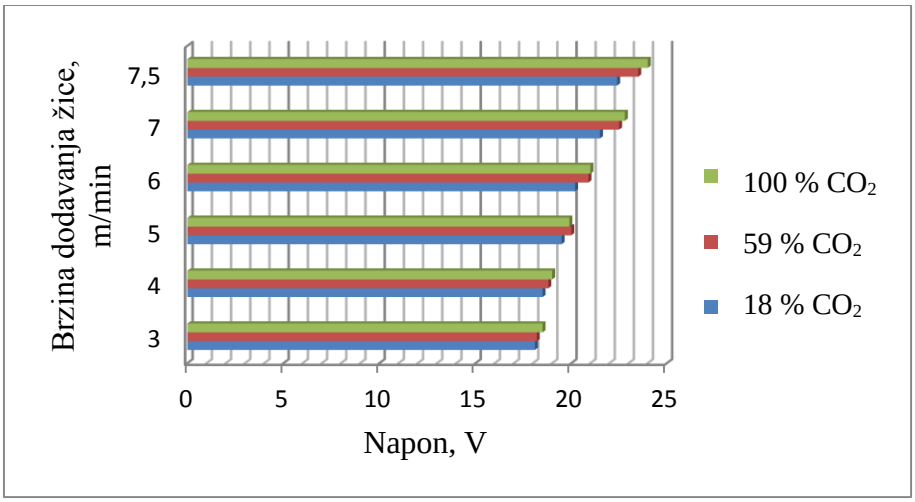
To područje je poželjno izbjegavati tijekom rada zbog nepredvidljivosti i nestabilnosti samog procesa prijenosa metala kroz električni luk. Također je analizom dinamičkih karakteristika moguće uočiti razlike u područjima stabilnosti procesa korištenjem različitih zaštitnih plinova. Povećanjem udjela aktivne komponente (CO_2) povećava se i područje stabilnosti prijenosa metala te je radi toga moguće uočiti da kod zaštitnog plina sa 100% udjelom CO_2 područje stabilnog prijenosa metala održano i kod brzine dodavanja žice od 6 m/min (~205 A).

Za razliku od konvencionalnog načina prijenosa metala kratkim spojevima i prijelaznim lukom, pri modificiranom prijenosu metala CBT načinom područje stabilnosti pomaknuto je sve do brzine dodavanja žice od 7 m/min (~ 225 A). Sa snimljenih oscilograma je vidljivo da u području nestabilnog prijenosa metala konvencionalnim načinom (pri brzini dodavanja žice od 5 m/min), CBT način prijenosa metala pokazuje područje najveće stabilnosti prijenosa metala. Kao što je bilo moguće uočiti razlike u područjima stabilnih prijenosa metala u ovisnosti o zaštitnom plinu kod zavarivanja kratkim spojevima, isto je moguće uočiti i kod CBT načina prijenosa metala. Naime, pri korištenju zaštitnog plina sa 100 % udjelom CO_2 vidljivo je da je prijenos metala najstabilniji i da bi bilo moguće koristiti i brzinu dodavanja žice od 7,5 m /min. No kao odabir granice područja stabilnosti pri CBT načinu prijenosa metala je ipak odabrano 7 m/min jer je to dokazano stabilno područje pri svim ispitanim mješavinama zaštitnih plinova. Povećanjem brzine dodavanja žice mijenja se područje prijenosa metala što više ne predstavlja područje interesa ukoliko je riječ o nastojanjima za smanjenjem unosa topline.

Analizom snimljenih oscilograma moguće je usporediti razlike u očitanim vrijednostima jakosti struje i napona u ovisnosti o načinu prijenosa metala i korištenom zaštitnom plinu (Slika 5.1 – 5.10).

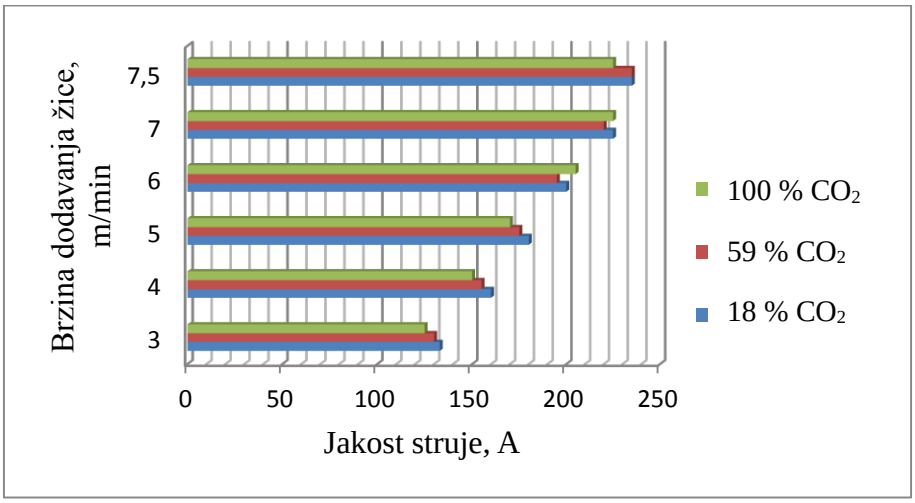


Slika 5.1 Promjena jakosti struje u ovisnosti o zaštitnom plinu pri CBT načinu prijenosa metala

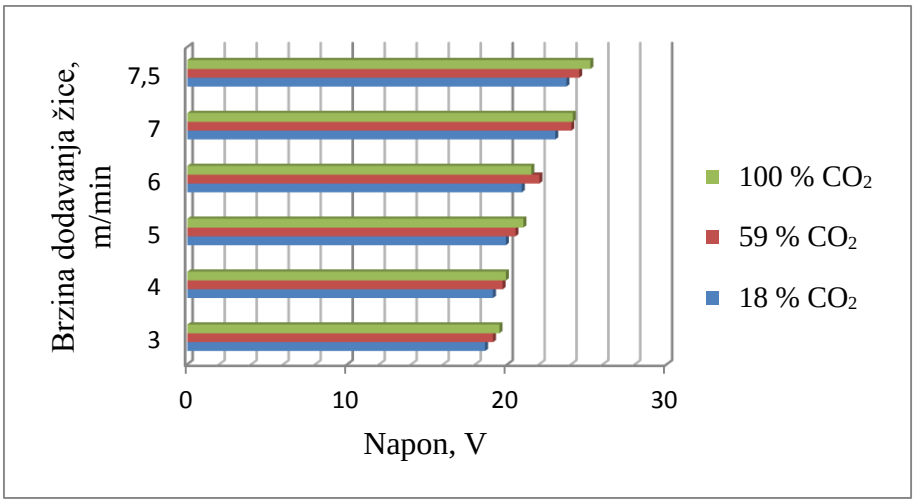


Slika 5.2 Promjena napona u ovisnosti o zaštitnom plinu pri CBT načinu prijenosa metala

Slike 5.1 i 5.2 grafički prikazuju promjene u parametrima očitanim na izvoru struje tijekom snimanja dinamičkih karakteristika pri CBT načinu prijenosa metala. Vidljivo je da ovisno o udjelu aktivne komponente u zaštitnom plinu dolazi do povećanja ili smanjenja parametara. Kod očitanja napona vidljivo je da se gotovo pravilno mijenja u ovisnosti o udjelu aktivne komponente plina i to s povećanjem udjela CO_2 raste i vrijednost napona električnog luka. Kod jakosti struje navedena pravilnost nije toliko izražena no svejedno je moguće uočiti trend povećanja vrijednosti u korelaciji s povećanjem udjela CO_2. Najveća „odstupanja“ povezuje se sa zaštitnim plinom s 59 % CO_2 što je moguće obrazložiti činjenicom da izvor struje u svojem procesoru nema program za rad s navedenom mješavinom zaštitnog plina.

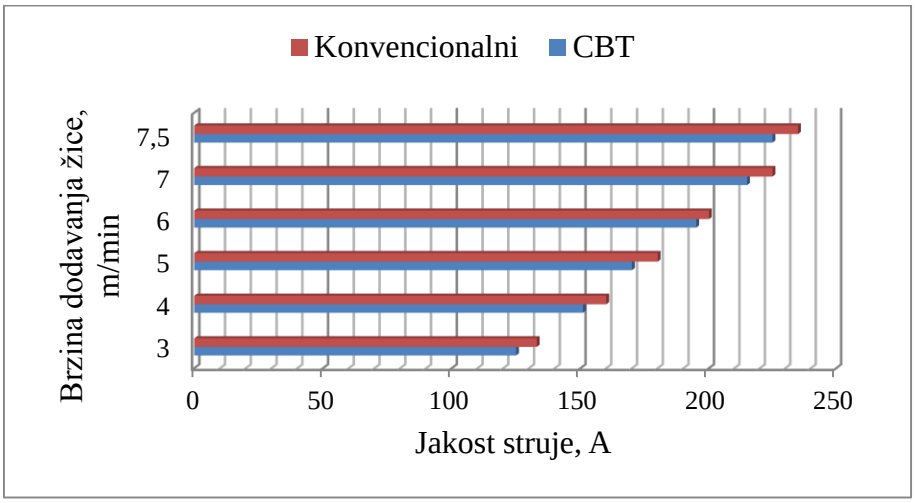


Slika 5.3 Promjena jakosti struje u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konvencionalnom načinu prijenosa metala

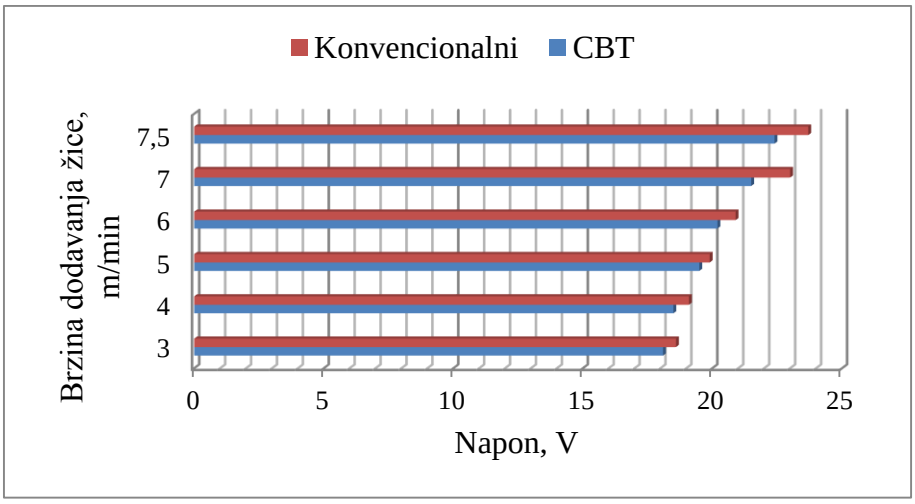


Slika 5.4 Promjena napona u ovisnosti o zaštitnom plinu pri konvencionalnom načinu prijenosa metala

Slike 5.3 i 5.4 prikazuju promjene u očitanim vrijednostima parametara jakosti struje zavarivanja i napona prilikom zavarivanja konvencionalnom načinom prijenosa metala (kratkim spojevima i prijelaznim lukom). Kao i u prethodnom slučaju kod CBT načina prijenosa metala, vidljiv je trend porasta parametara s povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu. Očitane vrijednosti napona ponovno prate pravilan trend rasta s manjim odstupanjima u području brzine dodavanja žice od 6 m/min i to ponovno u atmosferi zaštitnog plina s 59 % CO_2. Kod očitanja struje zavarivanja postoje mala odstupanja no to je moguće zanemariti s obzirom da je riječ o razlikama manjim od 10 A što je na ukupnu vrijednost od približno 130 A manje od 5 %.

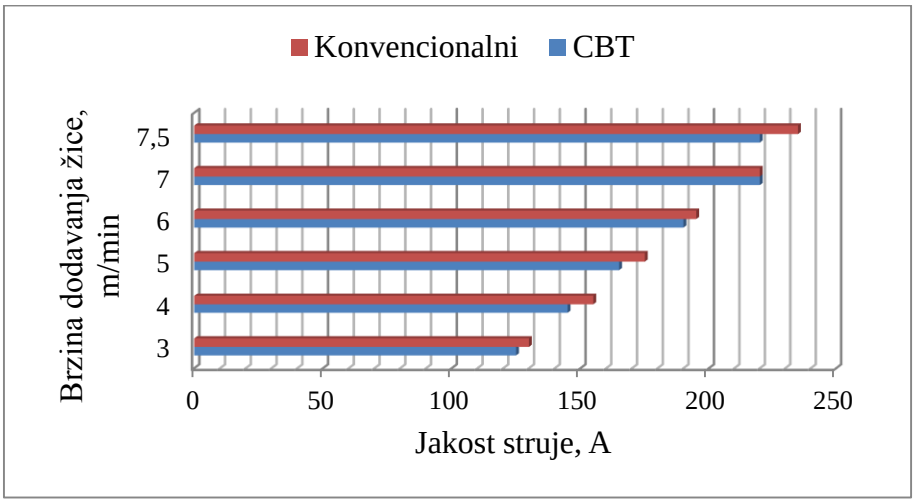


Slika 5.5 Promjena jakosti struje ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2

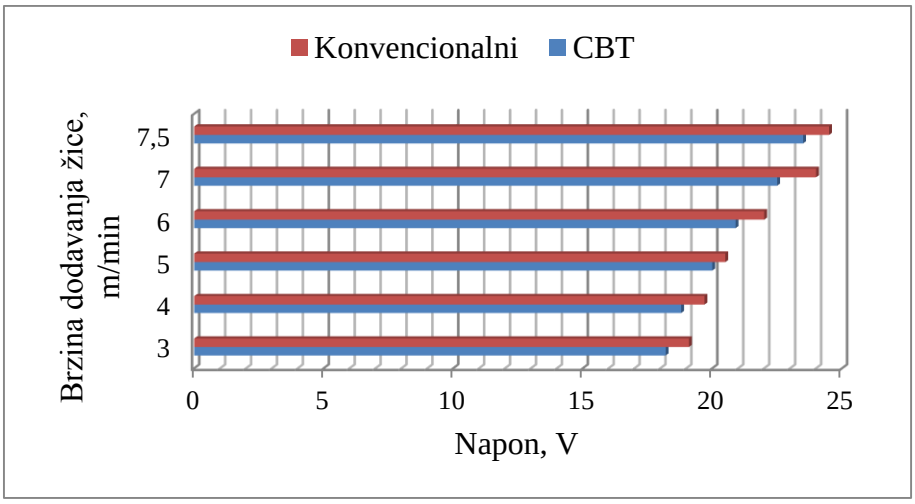


Slika 5.6 Promjena napona ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2

Slike 5.5 i 5.6 prikazuju promjene u očitanim parametrima u ovisnosti o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2. S oba grafička prikaza moguće je uočiti jasnu razliku u parametrima između dva načina prijenosa metala. U svim slučajevima (i pri različitim brzinama dodavanja žice i očitanim parametrima zavarivanja) uočljivo je da pri CBT načinu prijenosa metala dolazi do manjeg unosa topline tj. očitane su manje vrijednosti parametara zavarivanja. Rezultat je to modifikacije dinamičke karakteristike u svrhu odvajanja kapljice pomoću sila površinske napetosti. Do najvećih razlika u vrijednostima napona zavarivanja dolazi pri brzinama žice kod kojih se počinju stvarati uvjeti za prijenos slobodnim letom kapljica (7 m/min i 7,5 m/min) kod konvencionalnog MAG zavarivanja, a u čijem području pri CBT MAG zavarivanju je još uvijek kontrolirani prijenos premošćivanjem.

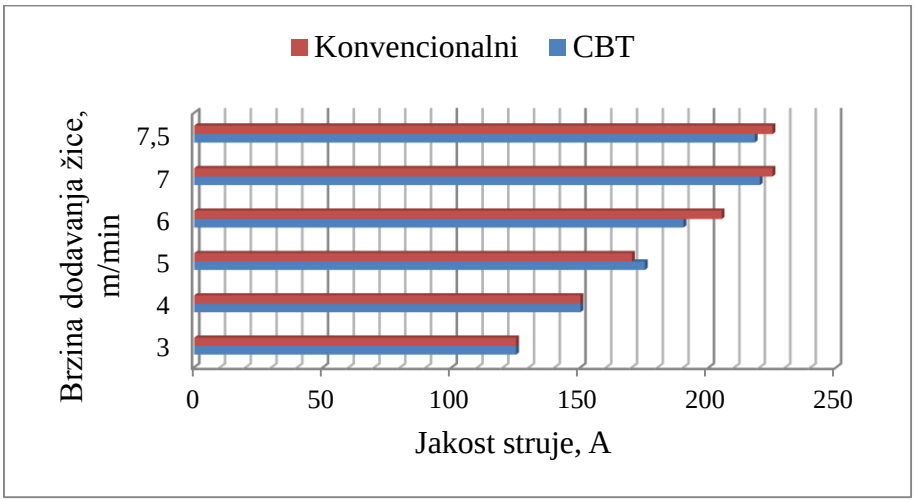


Slika 5.7 Promjena jakosti struje ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2

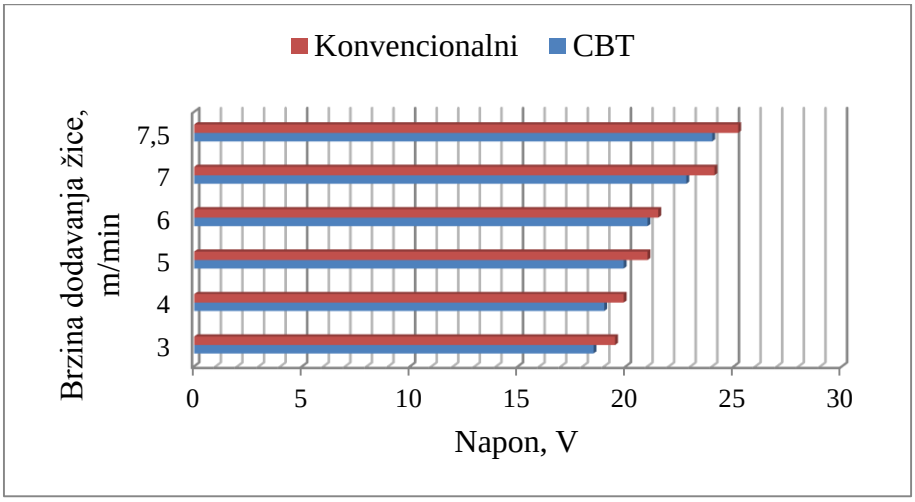


Slika 5.8 Promjena napona ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2

Slike 5.7 i 5.8 ponovno prikazuju razlike u očitanjima parametara zavarivanja, no pri zavarivanju u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2. Ponovno je moguće uočiti trend manji unos topline pri CBT načinu prijenosa metala spram konvencionalnog MAG zavarivanja. Također je kod očitanja napona pri većim brzinama dodavanja žice vidljiva veća razlika u parametrima između načina prijenosa metala kao što je to bilo i u prijašnjem slučaju sa zaštitnim plinom od 18 % CO_2. Kod promjena jakosti struje postoji jasna pravilnost u trendu većeg unosa topline pri konvencionalnom MAG zavarivanju. Najmanja razlika u očitanim vrijednostima je pri brzini žice od 7 m/min koje predstavlja granično stabilno područje prijenosa metala CBT načinom prijenosa metala pa je iz tog razloga moguće očitanje vrlo sličnih vrijednosti.



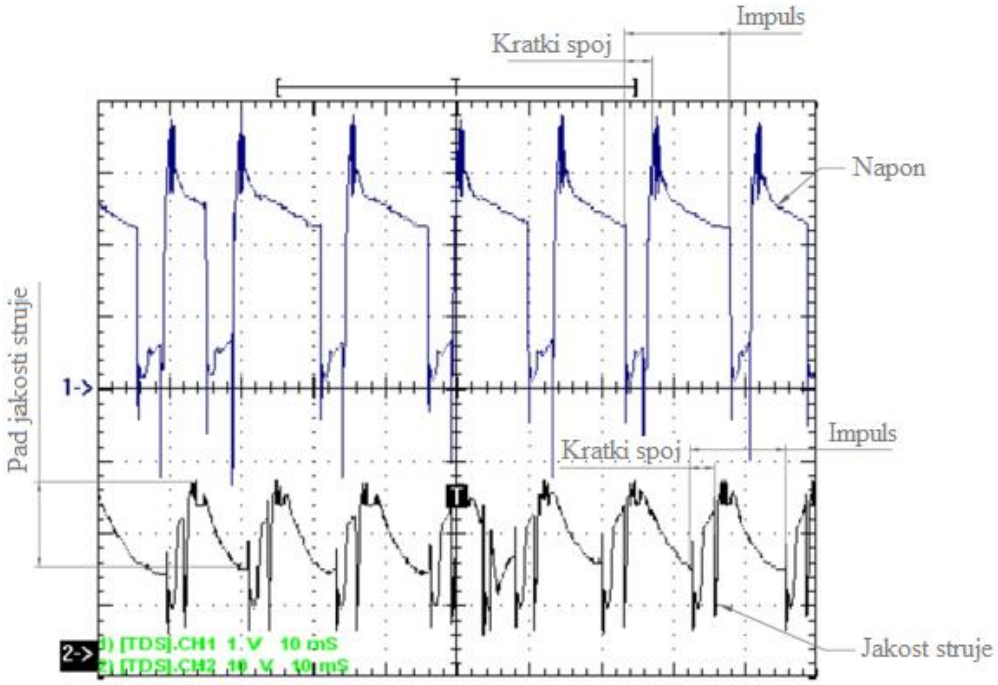
Slika 5.9 Promjena jakosti struje ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2



Slika 5.10 Promjena napona ovisno o načinu prijenosa metala u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2

Slike 5.9 i 5.10 prikazuju očitane vrijednosti parametara kod snimanja dinamičkih karakteristika u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2. Kod očitanja napona uočava se pravilnost manjih vrijednosti pri CBT načinu prijenosa metala bez ikakvih odstupanja. Za razliku od napona, kod očitanih vrijednosti jakosti struje moguće je vidjeti manja odstupanja. Riječ je o području manjih brzina dodavanja žice (3 i 4 m/min) gdje je minimalna razlika u očitanim vrijednostima, te kod brzine od 5 m /min gdje je moguće uočiti veću očitanu vrijednost za CBT način prijenosa metala. Budući da je to područje početka nestabilnog prijenosa metala prijelaznim lukom, moguće je da je tijekom očitanja „uhvaćen“ nestabilan prijenos metala.

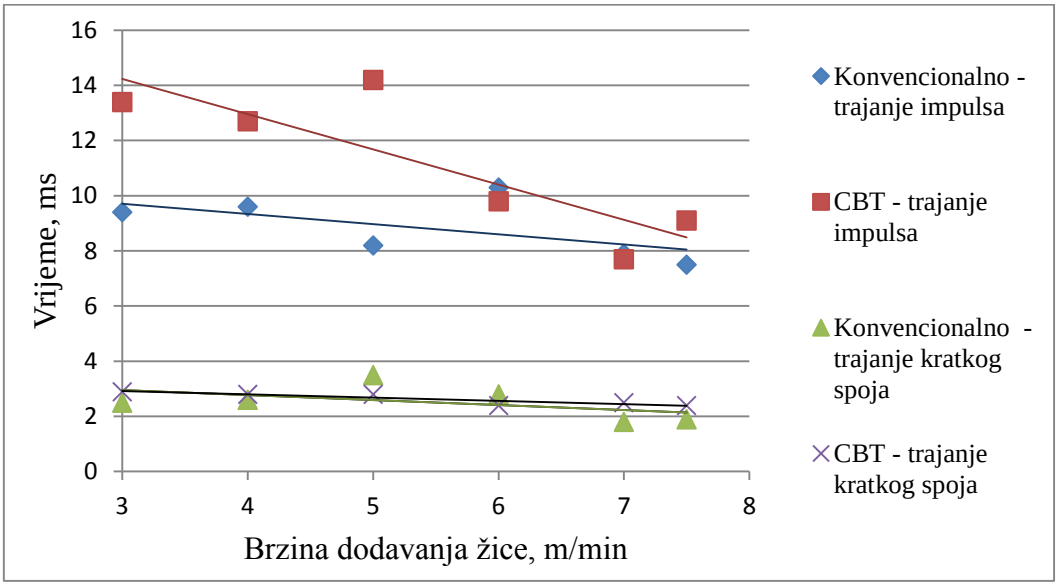
Osim analize očitanih vrijednosti parametara zavarivanja tijekom snimanja dinamičke karakteristike, u svrhu ocjene stabilnosti procesa prijenosa metala kroz električni luk, moguće je izmjeriti i duljinu trajanja pojedinog impulsa kao i trajanje kratkog spoja. To su vrijednosti koje je moguće pratiti i kod konvencionalnog načina prijenosa metala i kod CBT načina prijenosa. No, kod CBT načina prijenosa metala zanimljivo je pratiti i još jednu vrijednost, a to je pad jakosti struje zavarivanja na nominalnu vrijednost za vrijeme perioda trajanja električnog luka. Spomenute vrijednosti za snimljene dinamičke karakteristike moguće je vidjeti kotirane na slici 5.11. Vrijednosti očitane sa snimljenih oscilograma *u, i = f (t)* prikazane su u tablici 5.5 za udio CO_2 od 18 %, tablici 5.6 za udio CO_2 od 59 % i tablici 5.7 za 100 % udjela CO_2. Grafički prikaz očitanih vrijednosti s oscilograma dan je na slikama 5.12 – 5.14.



Slika 5.11 Označeni karakteristični ciklusi na oscilogramu *u, i = f (t)*

Tablica 5.5 Očitane vrijednosti s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 18 %

18 % CO_2	**Konvencionalno**						**CBT**					
Brzina dodavanja žice, m/min	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7,5**
Trajanje impulsa, ms	9,4	9,6	8,2	10,3	7,9	7,5	13,4	12,7	14,2	9,8	7,7	9,1
Trajanja kratkog spoja, ms	2,5	2,7	3,5	2,8	1,8	1,9	2,7	2,9	2,8	2,4	2,5	2,3
Pad struje, A	-	-	-	-	-	-	150	138	124	96	38	22
Frekvencija, Hz	106	104	121	97	126	133	75	78	70	102	129	110

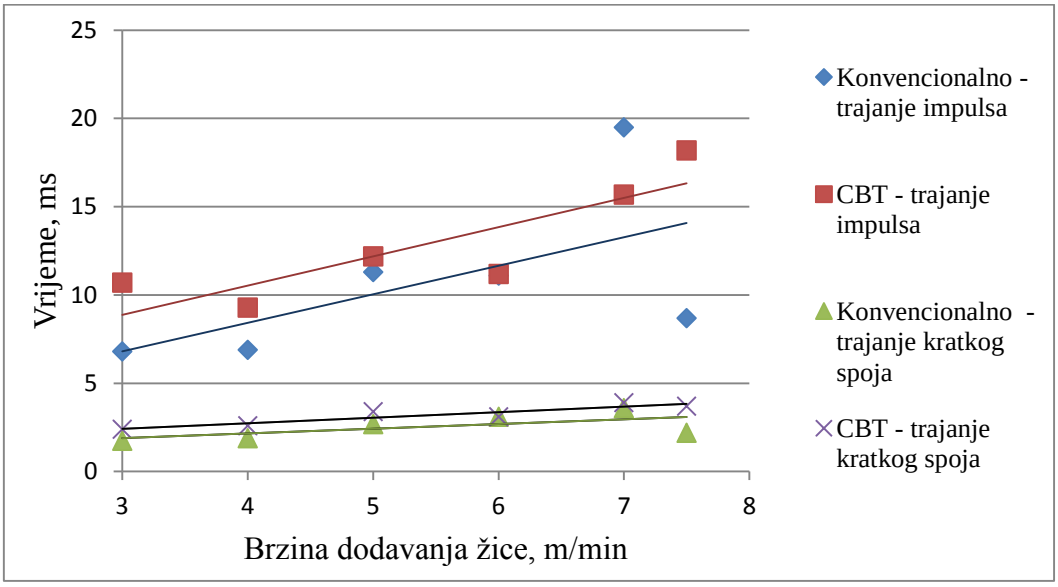


Slika 5.12 Grafički prikaz promjene trajanja impulsa u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2

Iz tablice 5.5 i sa slike 5.12 vidljivo je da s povećanjem brzine dodavanja žice sve mjerene vrijednosti pokazuju padajući trend. Kod prijenosa metala CBT načinom riječ je o nešto strmijem padu vrijednosti trajanja impulsa kojeg prati i pravac aproksimacije za vrijednosti trajanja kratkog spoja. U području brzine dodavanja žice od 5 m/min i 6 m/min moguće je uočiti nešto veća odstupanja izmjerenih vrijednosti od aproksimacijskog pravca što upućuje na određene nestabilnosti tijekom procesa prijenosa metala. Smanjenje trajanja kratkih spojeva analogno je činjenici da se približavanjem prijenosu metala štrcajućim lukom produžuju vremena trajanja električnog luka, odnosno polako dolazi do eliminacije pojave kratkih spojeva. Potrebno je i napomenuti da je to riječ o snimljenim karakteristikama u vrlo malom periodu trajanja procesa, što može uzrokovati manja odstupanja od realnog stanja.

Tablica 5.6 Očitane vrijednosti s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 59 %

59 % CO_2	Konvencionalno						CBT					
Brzina dodavanja žice, m/min	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7,5**
Trajanje impulsa, ms	6,8	6,9	11,4	10,9	19,5	8,7	10,7	9,3	12,2	11,2	15,7	18,2
Trajanja kratkog spoja, ms	1,7	1,9	2,8	3,1	3,6	2,2	2,4	2,6	3,4	3,1	3,9	3,7
Pad struje, A	-	-	-	-	-	-	158	145	133	96	55	39
Frekvencija, Hz	147	144	88	90	51	114	93	107	82	89	64	55

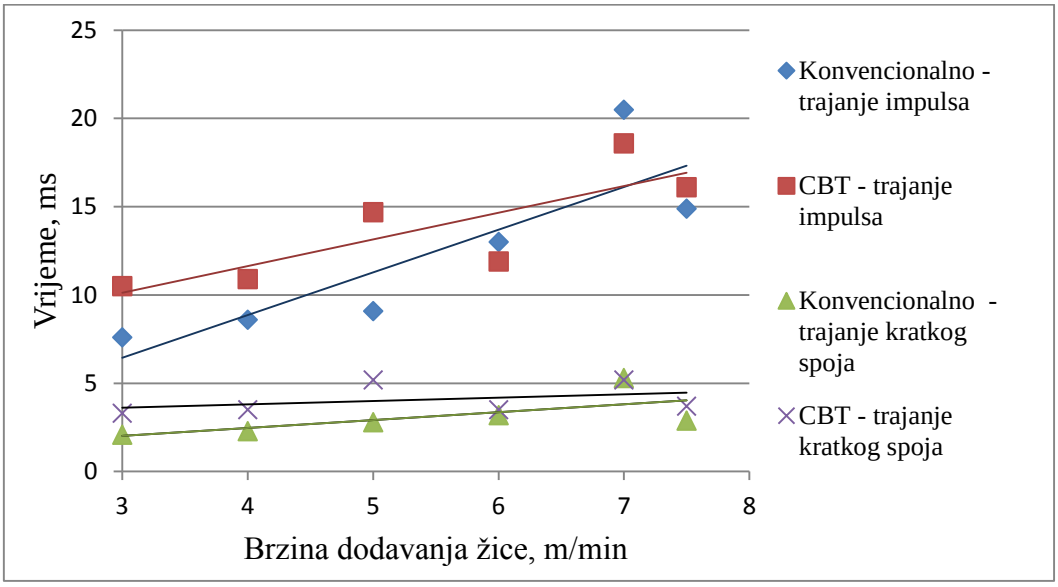


Slika 5.13 Grafički prikaz promjene trajanja impulsa u zaštitnoj atmosferi s 59 % CO_2

Tablični (Tablica 5.6) i grafički (Slika 5.13) prikaz očitanih vrijednost s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 59 % prikazuju drugačiji trend promjena u trajanjima impulsa i kratkih spojeva za oba načina prijenosa metala. Naime, vidljivo je da s povećanjem brzine dodavanja žice dolazi i do rasta trajanja impulsa. Tu činjenicu je moguće povezati s time da se povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu koja zbog svoje relativno niže vrijednosti ionizacijskog potencijala (spram argona) olakšava uspostavu električnog luka i povećava stabilnost tijekom rada. Također se može vidjeti da aproksimacijski pravci trajanja kratkih spojeva vjerno prate aproksimacijske pravce trajanja impulsa upučujući na relativno konstantan omjer kratkih spojeva i električnog luka.

Tablica 5.7 Očitane vrijednosti s oscilograma *u, i = f (t)* za udio CO_2 od 100 %

100 % CO_2	**Konvencionalno**						**CBT**					
Brzina dodavanja žice, m/min	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7,5**
Trajanje impulsa, ms	7,6	8,6	9,1	12,9	20,1	14,9	10,5	10,9	14,7	11,9	18,6	16,1
Trajanja kratkog spoja, ms	2,1	2,4	2,8	3,2	5,3	2,9	3,4	3,6	5,2	3,5	5,2	3,72
Pad struje, A	-	-	-	-	-	-	165	142	128	113	100	37
Frekvencija, Hz	131	116	110	78	49	67	95	91	68	84	53	62



Slika 5.14 Grafički prikaz promjene trajanja impulsa u zaštitnoj atmosferi sa 100 % CO_2

Očitane i analizirane vrijednosti sa zadnje snimljenih dinamičkih karakteristika pri zavarivanju sa zaštitnim plinom koji sadrži 100 % CO_2 (Tablica 5.7 i Slika 5.14) prikazuju ponovno pozitivan trend promjena u trajanju impulsa i kratkih spojeva kao i u slučaju korištenja zaštitnog plina s 59 % CO_2. Povećanjem brzine dodavanja žice povećava se i vrijednost jakosti struje zavarivanja i na taj način se prijenos metala polako mijenja prema štrcajućem luku, odnosno prema smanjenju pojave kratkih spojeva tj. prema sve duljem trajanju električnog luka i impulsa. Sličnosti u ponašanjima dinamičke karakteristike između dva spomenuta zaštitnog plina leži u činjenici da je korišten isti program rada uređaja za zavarivanje za oba slučaja budući da ne postoji program za mješavinu s 59 % CO_2.

Iz prikazanih oscilograma i grafičkih prikaza ovisnosti parametara zavarivanja u ovisnosti o zaštitnom plinu i načinu prijenosa metala, moguće je zaključiti sljedeće:

- Povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu moguće je uočiti trend povećanja parametara zavarivanja. Razlog tome leži u činjenici da CO_2 ima uz energiju disocijacije i manji ionizacijski potencijal te veću toplinsku vodljivost spram argona te je za isto podešene parametre (brzinu dodavanja žice) moguće postići veće unose topline samo povećavanjem udjela CO_2 komponente.

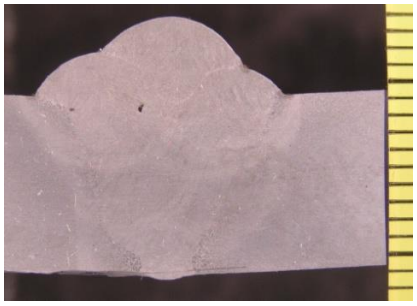
- Povećanjem udjela CO_2 kao aktivne komponente zaštitnog plina moguće je postići stabilniji prijenos metala i općenito stabilniji proces zavarivanja. Posljedica je to manje energije ionizacije CO_2 spram argona te je iz tog razloga moguće postići stabilniji proces zavarivanja. Negativnu konotaciju povećane količine štrcanja vezanu uz veće udjele CO_2, uvelike kompenzira korištenje CBT načina prijenosa metala. Ukratko rečeno, kombinacija CBT načina prijenosa metala i zaštitne atmosfere sa 100 % udjelom CO_2 rezultira stabilnim procesom zavarivanja uz smanjenje ili eliminaciju pojave štrcanja.

- Usporedbom zavarivanja kratkim spojevima i CBT načina prijenosa metala vidljivo je da je kod CBT načina prijenosa metala moguće ostvariti manji unos topline uz identično postavljene parametre zavarivanja. Uz smanjenje unosa topline, posebno oblikovanom dinamičkom karakteristikom moguć je prijenos metala pretežito silama površinske napetosti. Ta činjenica je ključna za primjenu tehnologije u praksi jer je na taj način moguće ostvariti zavarivanje ploča manjih debljina od promjera dodatnog materijala ili zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima, te zavarivanje uz manje gubitke dodatnog materijala.

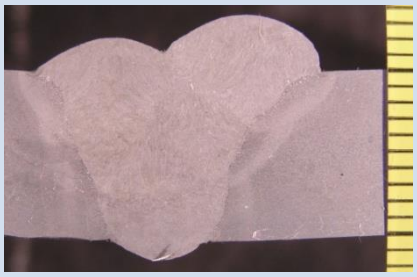
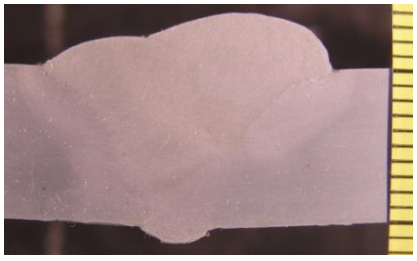
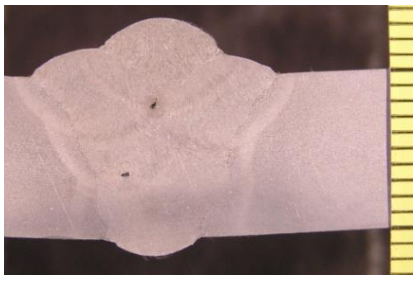
5.2. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki zavarenog spoja

Nakon što su uzorci bili pripremljeni za analizu makrostrukture (opisano u poglavlju 4.8) fotografirani su fotoaparatom Canon C – 5050 Zoom. Dobivene fotografije su pomoću računalnog programa ImageJ analizirane te su dobivene vrijednosti širine i nadvišenja metala zavara kao i širine zone utjecaja topline. Izgledi makroizbrusaka kao i dobivene izmjerene vrijednosti prikazane su u tablici 5.8.

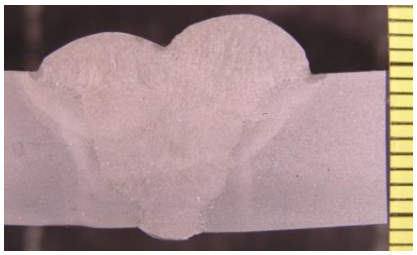
Tablica 5.8 Geometrijska analiza makroizbrusaka

Oznaka uzorka	Uzorak	Broj prolaza	Širina metala zavara, mm	Nadvišenje metala zavara, mm	Širina ZUT-a, mm
1		6	15,76	4,14	1,21
2		6	18,12	5,77	1,23
3		6	21,49	4,75	1,27

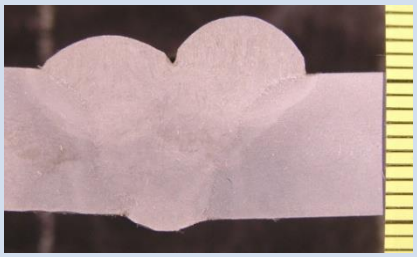
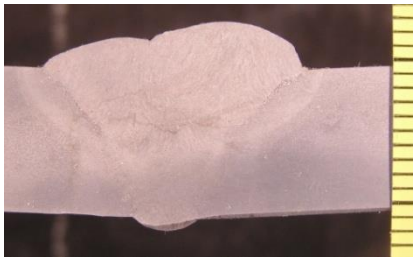
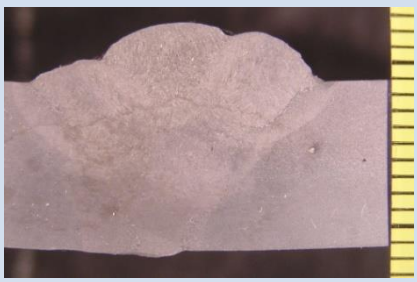
Nastavak tablice 5.8.

Oznaka uzorka	Uzorak	Broj prolaza	Širina metala zavara, mm	Nadvišenje metala zavara, mm	Širina ZUT-a, mm
4		6	22,56	4,46	1,43
5		6	27,15	5,22	2,03
6		6	25,67	4,99	1,80
7		5	17,17	3,93	1,31
8		5	20,01	5,13	1,32

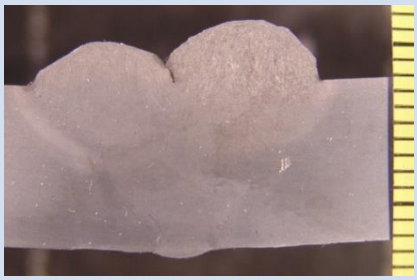
Nastavak tablice 5.8.

Oznaka uzorka	Uzorak	Broj prolaza	Širina metala zavara, mm	Nadvišenje metala zavara, mm	Širina ZUT-a, mm
9		5	18,26	3,73	1,23
10		5	23,50	5,04	1,50
11		5	22,77	4,67	1,31
12		5	22,89	4,38	1,60
13		5	20,56	4,38	1,15

Nastavak tablice 5.8.

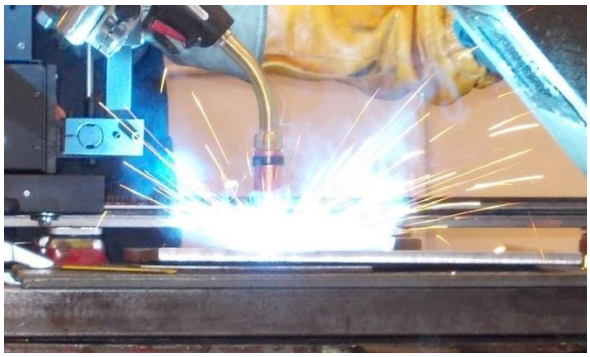
Oznaka uzorka	Uzorak	Broj prolaza	Širina metala zavara, mm	Nadvišenje metala zavara, mm	Širina ZUT-a, mm
14		5	20,23	4,42	1,27
15		5	20,35	3,52	1,52
16		5	23,83	4,34	1,43
17		4	21,66	4,50	1,61
18		4	23,05	4,67	1,39

Nastavak tablice 5.8.

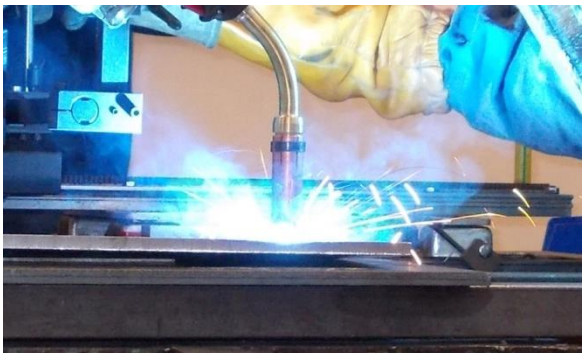
Oznaka uzorka	Uzorak	Broj prolaza	Širina metala zavara, mm	Nadvišenje metala zavara, mm	Širina ZUT-a, mm
19		4	27,15	5,69	1,60
20		4	23,03	5,04	1,26
21		4	23,42	4,51	1,72
22		4	24,94	4,75	1,90

Sa slika prikazanih u tablici 5.8 vidljivo je da je ovisno o brzini dodavanja žice variran i ukupni broj prolaza i to od 6 prolaza za brzinu žice od 4 m/min do 4 prolaza za brzinu žice od 7 m/min. Bitno je za napomenuti da je većina uzoraka na kojima su uočene stanovite greške bili zavareni konvencionalnim načinom prijenosa metala, odnosno kratkim spojevima i prijelaznim lukom. Riječ je o uzorcima oznaka 1, 3, 7, 9, 11 i 19. Što se tiče učestalosti pojava

grešaka kod CBT načina prijenosa metala, greške su uočene na uzorcima 2 i 20. Riječ je o grešci naljepljivanja. Pojava tih grešaka je bila i za očekivati u području slabijih parametara zavarivanja. Iako je putem CBT načina prijenosa metala uočen manji unos topline, ipak je učestalost grešaka naljepljivanja kod tog načina prijenosa metala bila mala. Slike 5.15 do 5.17 prikazuju postupke konvencionalnog MAG i CBT MAG zavarivanja te količinu kapljica u žlijebu zavara ovisno o postupku zavarivanja.



Slika 5.15 Konvencionalno MAG zavarivanje



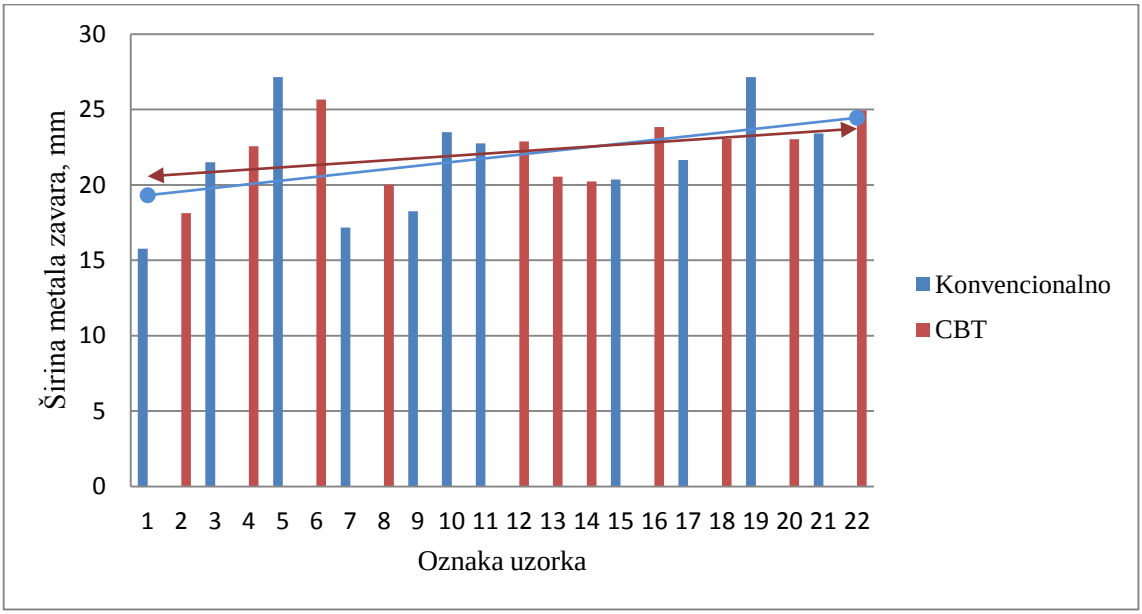
Slika 5.16 CBT MAG zavarivanje



Slika 5.17 Količina kapljica u žlijebu zavara kao posljedica štrcanja kod konvencionalnog MAG zavarivanja – lijevo i CBT MAG zavarivanja – desno

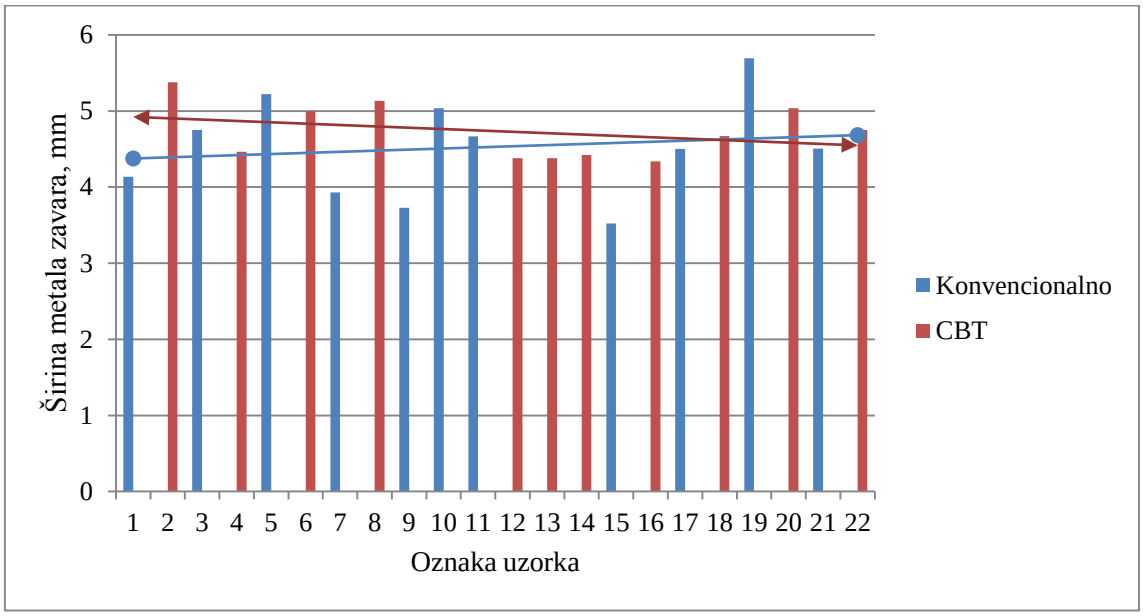
5.3. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki zavarenog spoja

Dobiveni rezultati mjerenja geometrijskih značajki zavarenog spoja navedeni u tablici 5.8 grafički su prikazani na slikama 5.18 – 5.20.



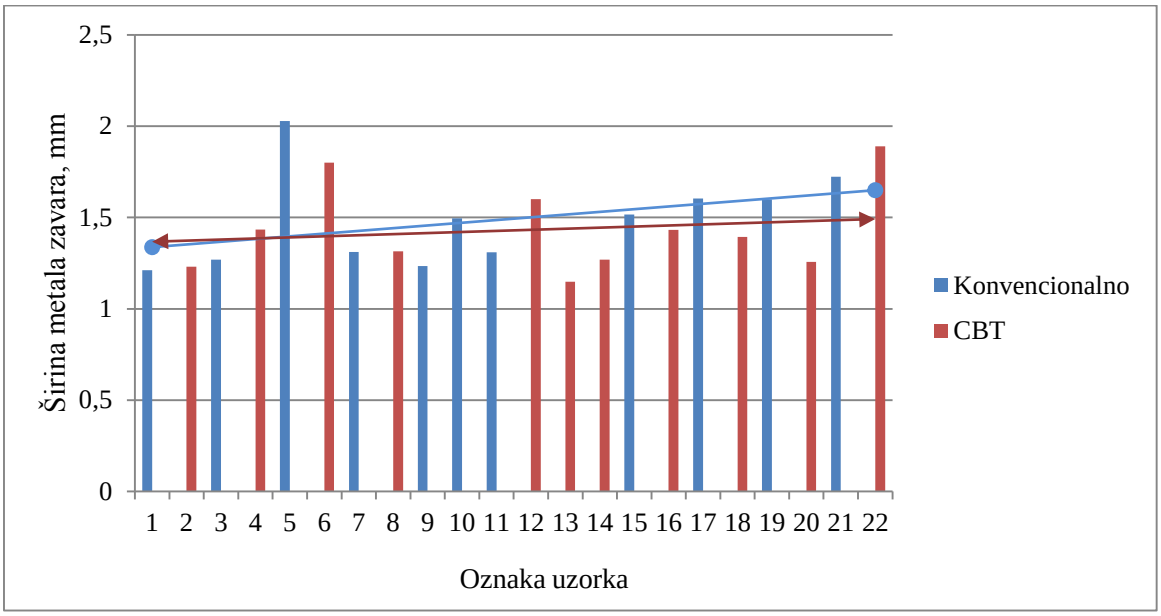
Slika 5.18 Grafički prikaz promjene širine metala zavara ovisno o variranim parametrima za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje

Na slici 5.18 vidljiva su dva trenda. Jedan je globalni koji se proteže preko svih stanja pokusa i ukazuje na to da povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu za oba postupka zavarivanja dolazi do porasta u vrijednostima širine metala zavara. Taj trend je moguće pratiti u oba slučaja načina prijenosa metala s time da je on nešto strmiji u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima. Rastući trendovi širine metala zavara rezultat su većih unosa topline što zbog veće brzine dodavanja žice, a što zbog djelovanja aktivne komponente CO_2 koji zbog svoje energije disocijacije i veće toplinske vodljivosti uzrokuje rast parametara zavarivanja za istu brzinu dodavanja žice. Drugi trend koji je moguće uočiti je trend povećanja širine metala zavara s povećanjem brzine dodavanja žice. Taj trend je moguće uočiti po grupama uzoraka 1 – 6, zatim 7 – 16 te 17 – 22 (različiti udjeli CO_2 od 18 %, preko 59 % i do 100 %). Unutar tih grupa uzoraka jasno se vidi značajan utjecaj povećanja parametara zavarivanja u vidu povećanja širine metala zavara. Rezultat je to u konačnici sve većeg unosa topline koji za posljedicu ima veće zagrijavanje osnovnog materijala i šire područje metala zavara.



Slika 5.19 Grafički prikaz promjene nadvišenja metala zavara ovisno o variranim parametrima za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje

Slika 5.19 grafički prikazuje odnos između variranih parametara brzine dodavanja žice, aktivne komponente zaštitnog plina i načina prijenosa metala na nadvišenje metala zavara za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje. Za razliku od prethodnog grafičkog prikaza na slici 5.18 gdje su oba trenda bila istog nagiba, ovdje je situacija nešto drukčija. Naime, za slučaj prijenosa metala kratkim spojevima i prijelaznim lukom (konvencionalno MAG zavarivanje), trend je ostao isti (rastući), no za slučaj CBT načina prijenosa došlo je do promjene u nagibu aproksimacijskog pravca koji je sada blago padajući. To znači da porastom udjela CO_2 i brzine dodavanja žice, za slučaj zavarivanja CBT načinom prijenosa metala dolazi do smanjenja nadvišenja metala zavara. Faktor koji isto utječe na način razlijevanja taline i samim time na nadvišenje zavarenog spoja je i udio silicija i mangana koji će kasnije biti obrađen i prikazan u radu. Veći sadržaj mangana i silicija povećavaju viskoznost taline što rezultira zavarom manjeg nadvišenja i glatkom površinom lica zavara. Gledajući ponovno po tri grupacije uzoraka (ovisno o udjelu CO_2) jednostavna korelacija između variranih parametara nije uočena. Za kratke spojeve je vidljivo u prvoj grupaciji da je rast linearan s obzirom na brzinu dodavanja žice, dok se u druge dvije grupacije trend može opisati konveksnom krivuljom. Kod CBT načina prijenosa metala u prvoj i drugoj grupi uzoraka postoji konkavni trend dok u zadnjoj on poprima konveksni oblik.



Slika 5.20 Grafički prikaz promjene širine ZUT-a ovisno o variranim parametrima za konvencionalno MAG i CBT MAG zavarivanje

Na slici 5.20 ponovno je moguće uočiti pozitivan globalni trend za oba načina prijenosa metala. Prema tome, povećanjem brzine dodavanja žice i udjela CO_2 dolazi do blagog povećanja širine ZUT-a neovisno o načinu prijenosa metala. Ono što je moguće razlikovati između varirana dva načina prijenosa da je taj porast ipak nešto blaži u slučaju zavarivanja CBT načinom prijenosa metala. Takav rezultat je i logično za očekivati s obzirom na princip rada i već analizirane unose topline tijekom snimanja dinamičke karakteristike. Što se tiče promjena vrijednosti širine ZUT-a variranjem brzine žice pri pojedinoj smjesi korištenog zaštitnog plina (3 grupacije rezultata: uzorci 1 – 6, uzorci 7 – 16, i uzorci 17 – 22), opet je moguće razlikovati nekoliko trendova. Kod zavarivanja kratkim spojevima uočava se gotovo linearan rast u sva tri slučaja što i ide u prilog tome da je globalni trend nešto veći nego kod CBT načina prijenosa metala. Gledajući trendove CBT MAG zavarivanja po grupacijama, situacija je nešto drugačija. Naime, kod korištenog plina s 18 % i 59 % udjela aktivne komponente, trend rasta je pozitivan i može ga se aproksimirati s pravcem. No, u zadnjem slučaju (udio CO_2 100 %) blagi trend porasta je potrebno aproksimirati konkavnom krivuljom.

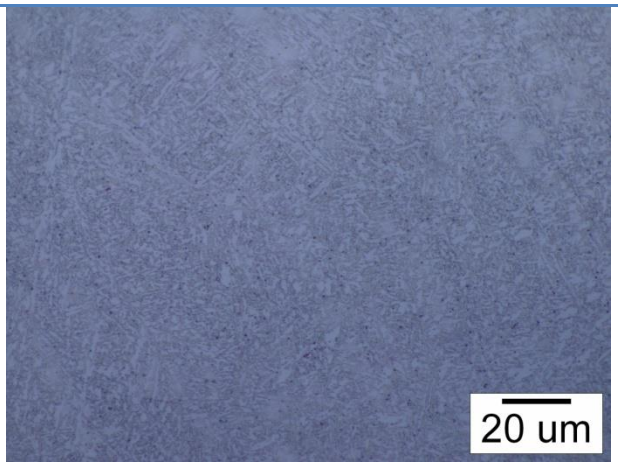
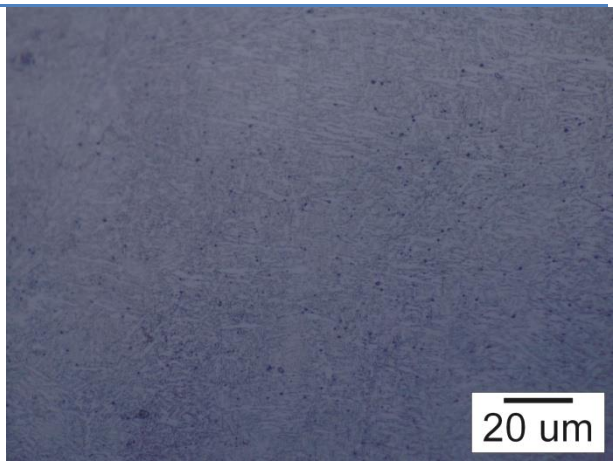
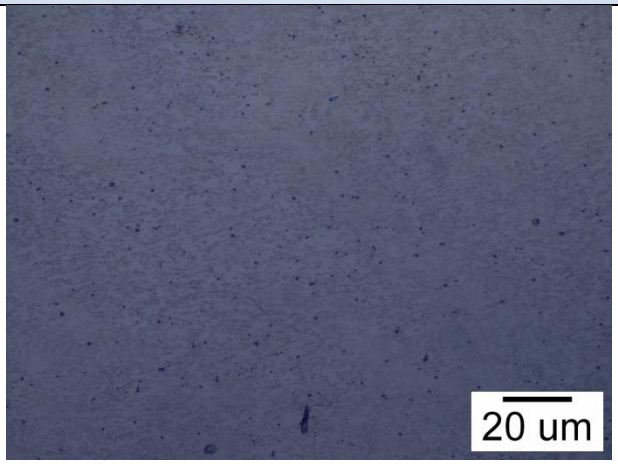
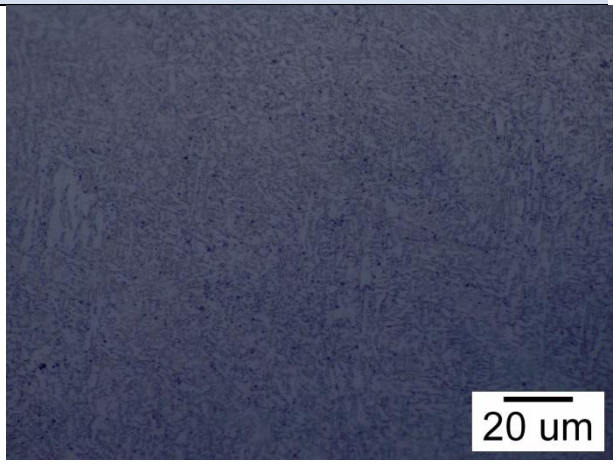
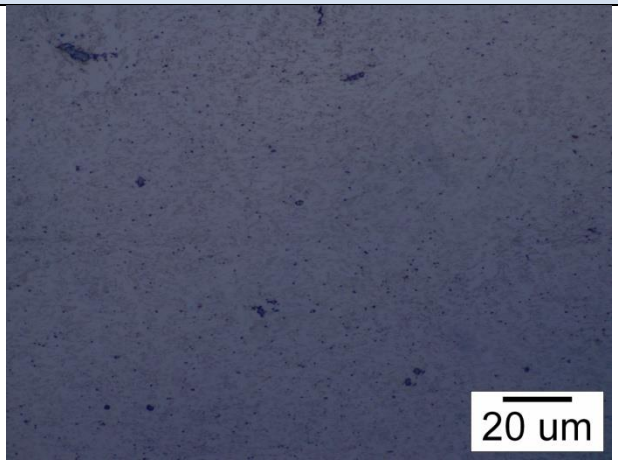
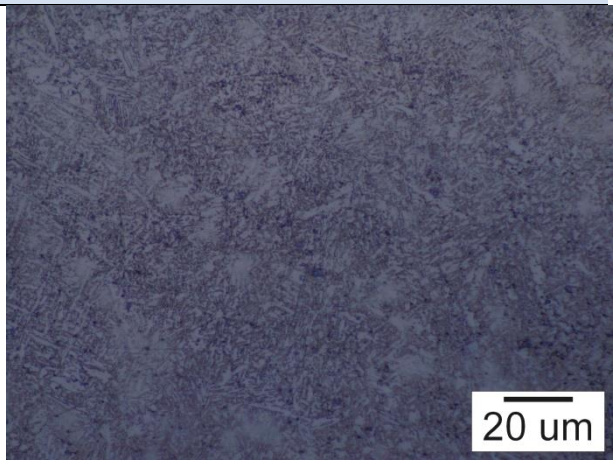
5.4. Prikaz rezultata dobivenih analizom mikrostrukture

Rezultati dobiveni analizom mikrostrukture dani su u tablici 5.9. Uz postotni udio acikularnog ferita u mikrostrukturi, navedeni su i podaci udjela uključaka u mikrostrukturi te ekvivalenta kisika zaštitnog plina za koje je literaturnim pregledom zaključeno da utječu na nastanak i razvoj acikularnog ferita. U tablici je crvenom bojom označena vrijednost najvećeg udjela acikularnog ferita, dok je zelenom bojom označena najmanja vrijednost. Vrijednosti ekvivalenta kisika izračunate su prema izrazu (8). Mikrostruktura svih uzoraka prikazana je u tablici 5.10.

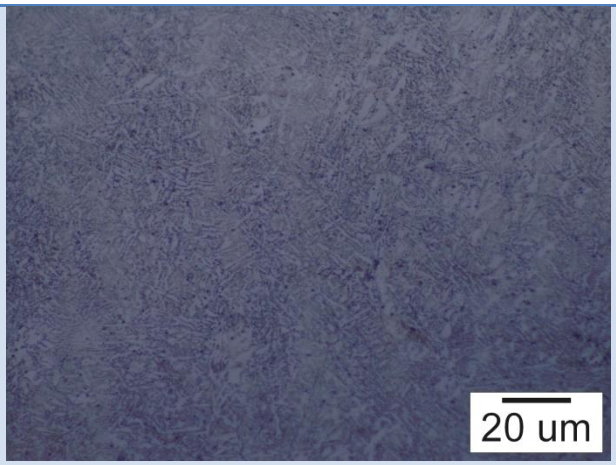
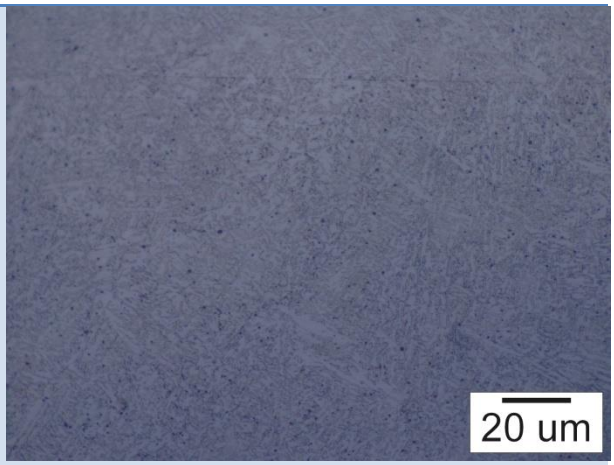
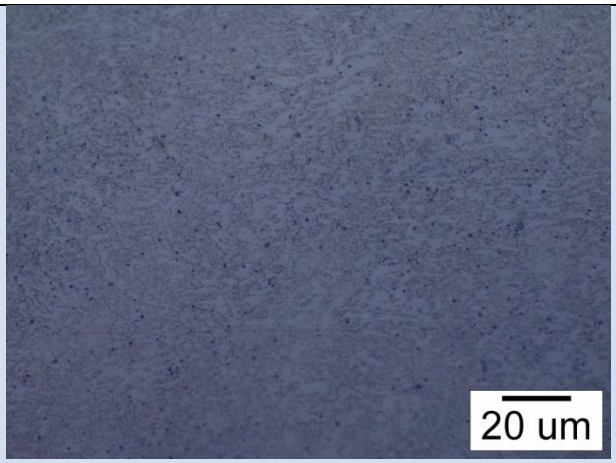
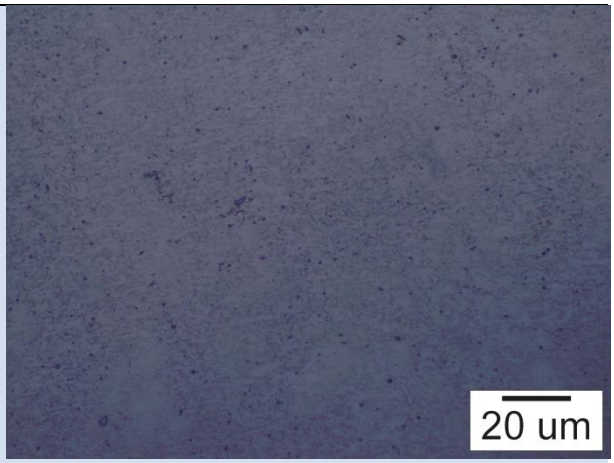
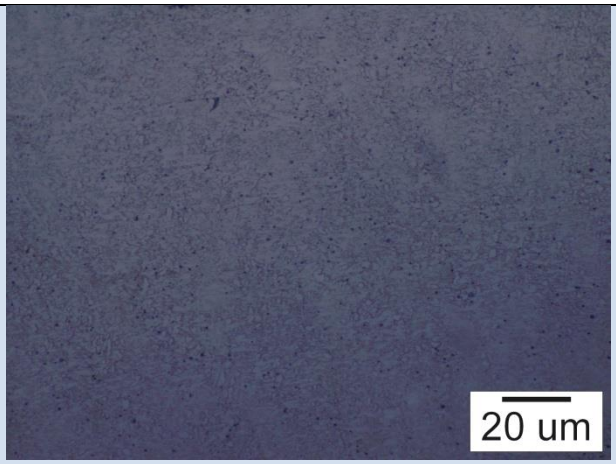
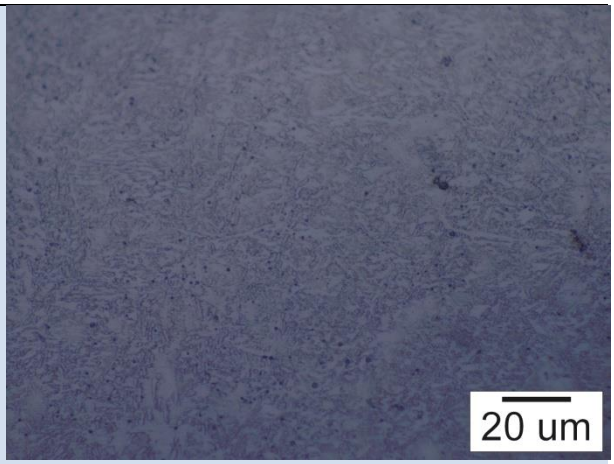
Tablica 5.9 Rezultati analize mikrostrukture

Uzorak broj	Brzina dodavanja žice, m/min	Prijenos metala, KV/CBT	Udio CO_2 u zaštitnom plinu, %	Udio AF u mikrostrukturi, %	Udio uključaka u mikrostrukturi, %	Ekvivalent kisika zaštitnog plina
1	4	KV	18	49,762	0,603	12,03
2	4	CBT	18	44,981	0,505	
3	5,5	KV	18	52,262	0,760	
4	5,5	CBT	18	47,784	0,626	
5	7	KV	18	54,238	0,981	
6	7	CBT	18	50,715	0,725	
7	4	KV	59	55,945	0,992	73,88
8	4	CBT	59	52,681	0,796	
9	5,5	KV	59	62,169	1,246	
10	5,5	KV	59	62,284	1,143	
11	5,5	KV	59	60,337	1,273	
12	5,5	CBT	59	58,248	1,110	
13	5,5	CBT	59	56,689	0,987	
14	5,5	CBT	59	57,191	1,081	
15	7	KV	59	66,044	1,484	
16	7	CBT	59	61,464	1,245	
17	4	KV	100	68,177	1,601	165,21
18	4	CBT	100	60,235	1,298	
19	5,5	KV	100	72,326	1,903	
20	5,5	CBT	100	62,548	1,357	
21	7	KV	100	74,997	2,108	
22	7	CBT	100	66,725	1,614	

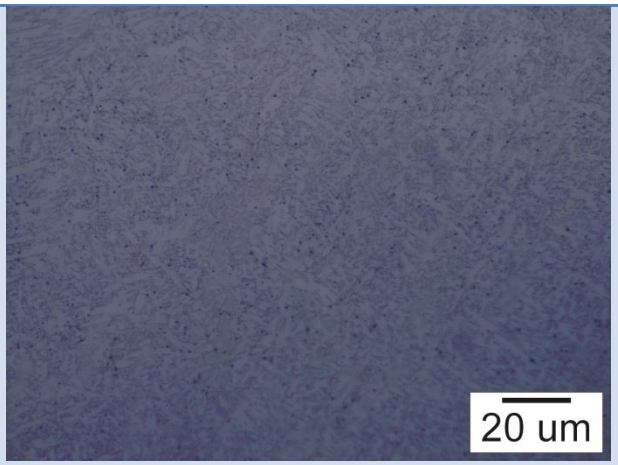
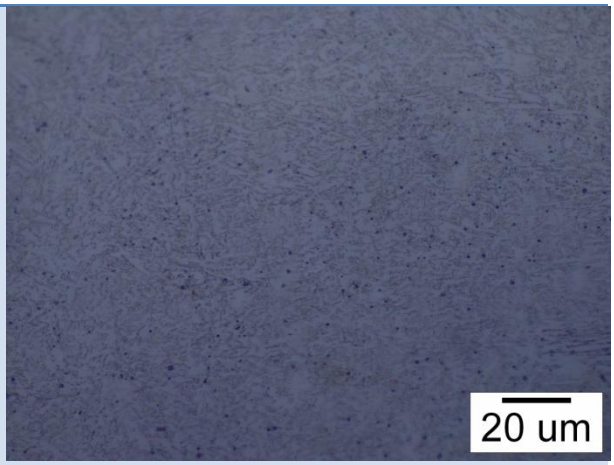
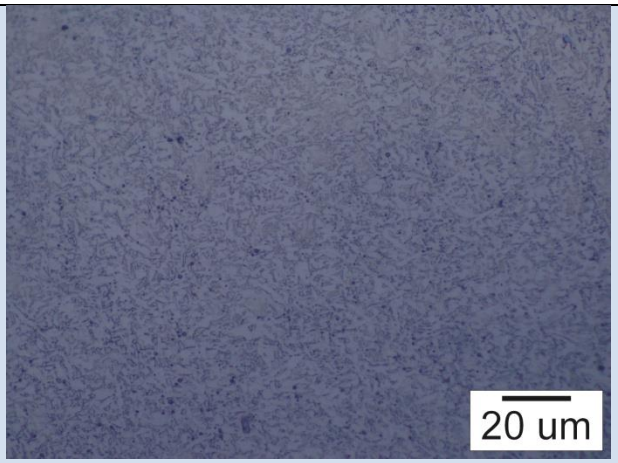
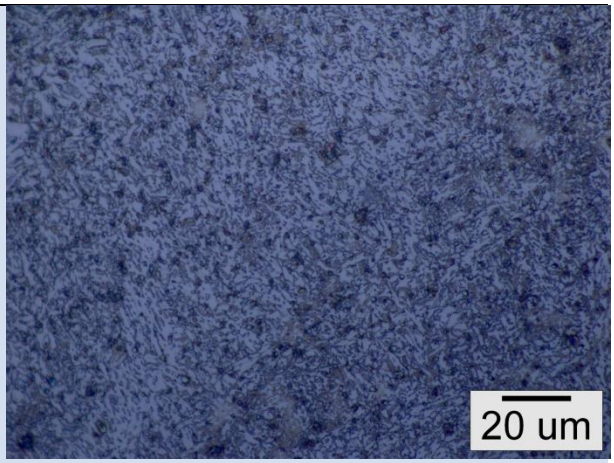
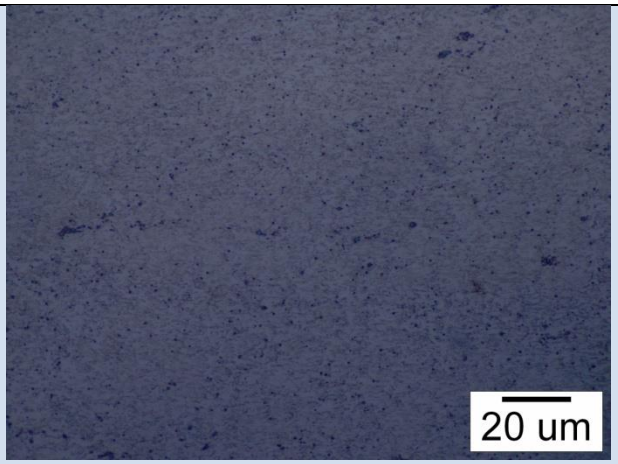
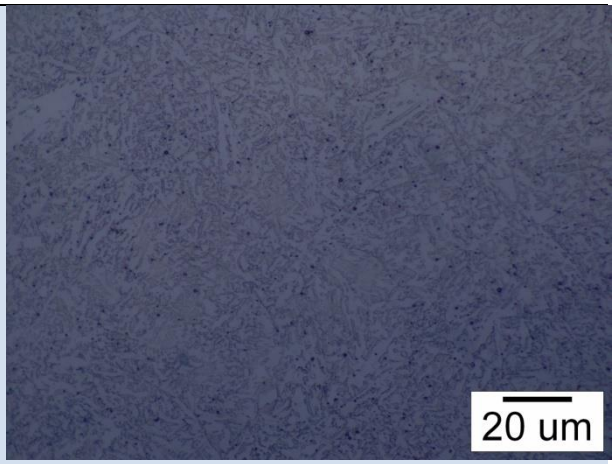
Tablica 5.10 Mikrostrukture svih zavarenih uzoraka

	
Uzorak broj 1	Uzorak broj 2
	
Uzorak broj 3	Uzorak broj 4
	
Uzorak broj 5	Uzorak broj 6

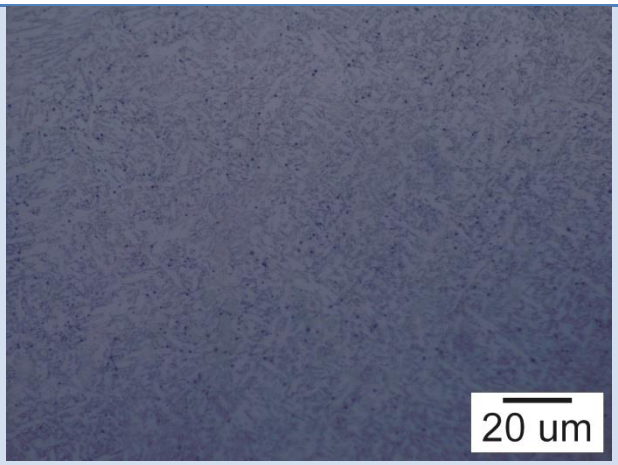
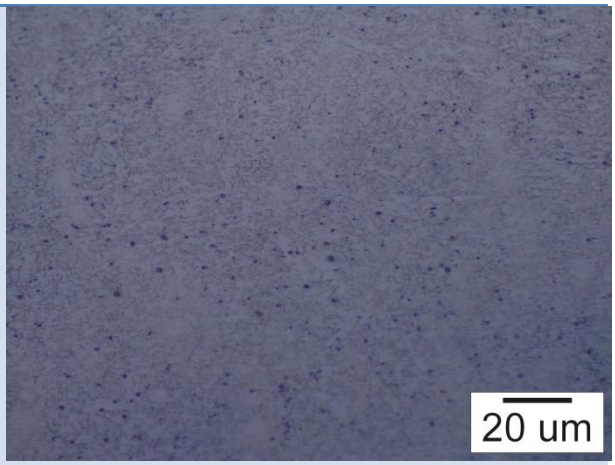
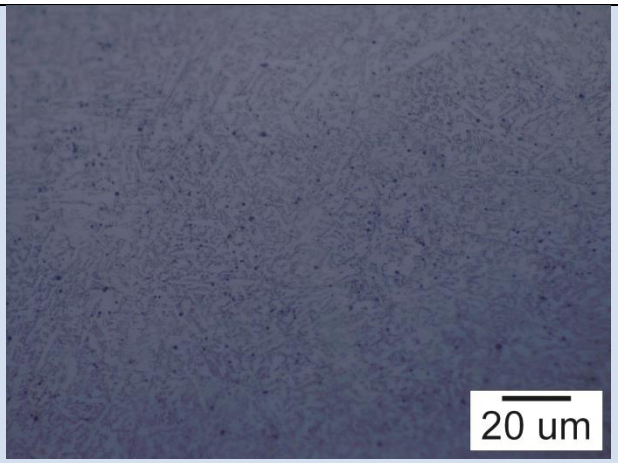
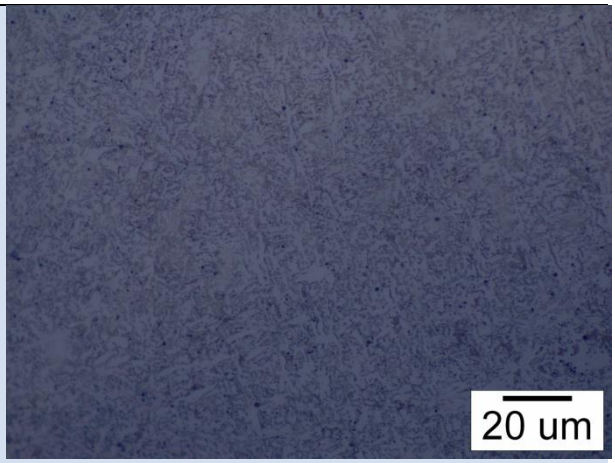
Nastavak tablice 5.10.

	
Uzorak broj 7	Uzorak broj 8
	
Uzorak broj 9	Uzorak broj 10
	
Uzorak broj 11	Uzorak broj 12

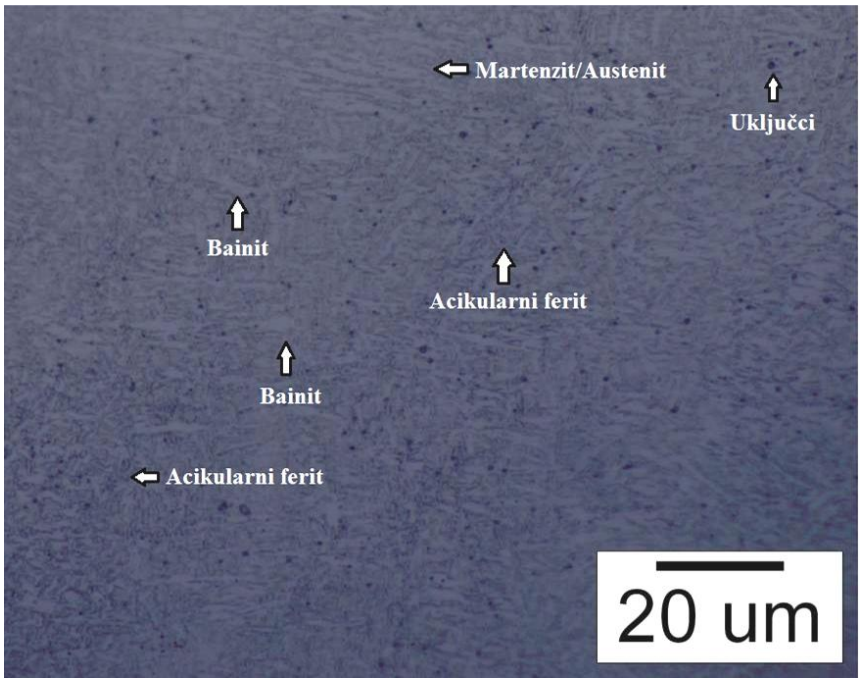
Nastavak tablice 5.10.

	
Uzorak broj 13	Uzorak broj 14
	
Uzorak broj 15	Uzorak broj 16
	
Uzorak broj 17	Uzorak broj 18

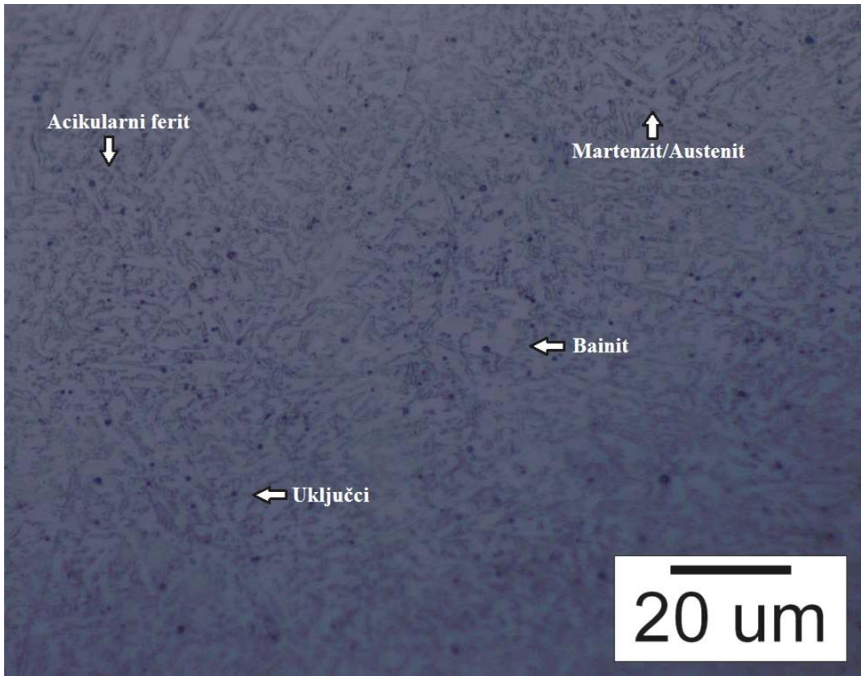
Nastavak tablice 5.10.

	
Uzorak broj 19	Uzorak broj 20
	
Uzorak broj 21	Uzorak broj 22

Fotografije karakterističnih uzoraka s najmanjim i najvećim udjelom acikularnog ferita prikazane su na slikama 5.21 i 5.22. Na navedenim slikama moguće je vidjeti da se uz acikularni ferit pojavljuje još i bainit te martenzitno austenitna mikrostruktura. Također se mogu uočiti uključci koji predstavljaju mjesta nukleacije acikularnog ferita.



Slika 5.21 Mikrostruktura uzorka 2 – minimalni udio acikularnog ferita



Slika 5.22 Mikrostruktura uzorka 21 – maksimalni udio acikularnog ferita

5.5. Analiza rezultata dobivenih analizom mikrostrukture – udio acikularnog ferita

Rezultati prikazani u tablici 5.9 statistički su obrađeni u svrhu dobivanja matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara zavarivanja na udio acikularnog ferita u zavarenom spoju, odnosno pomoću kojeg će biti moguće računskim putem ovisno o postavljenim parametrima izračunati udio acikularnog ferita. Provedbom analize varijance, za model koji najbolje opisuje ovisnost udjela acikularnog ferita o variranim parametrima odabran je reducirani kubni model. Analiza varijance odabranog modela prikazana je u tablici 5.11.

Tablica 5.11 Analiza varijance matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio acikularnog ferita

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	*P*-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	124,05	4	310,51	193,61	<0,0001	DA
A: % CO_2	918,75	1	918,75	572,85	<0,0001	DA
B: $v_ž$	140,08	1	140,08	87,34	<0,0001	DA
C: prijenos metala	169,14	1	169,14	105,46	<0,0001	DA
AC	14,08	1	14,08	8,78	<0,0001	DA
Ostatak	0,48	17	1,60	-	-	-
Odstupanje od modela	0,28	13	1,74	1,49	0,3765	NE
Čista greška	0,20	4	1,17	-	-	-
Ukupno	3,00	21	-	-	-	-

F-vrijednost modela od 193,61 upućuje na to da je model značajan. Postoji vjerojatnost od samo 0,01 % da je ta vrijednost rezultat pojave šuma.

Značajnost pojedinih elemenata modela definira se pomoću vrijednosti Prob>F i to na način da ukoliko je ta vrijednost manja od 0,05 element se smatra značajnim. Prema podacima iz tablice 5.11 vidljivo je da su faktori A, B, C, kao i interakcija AC značajni.

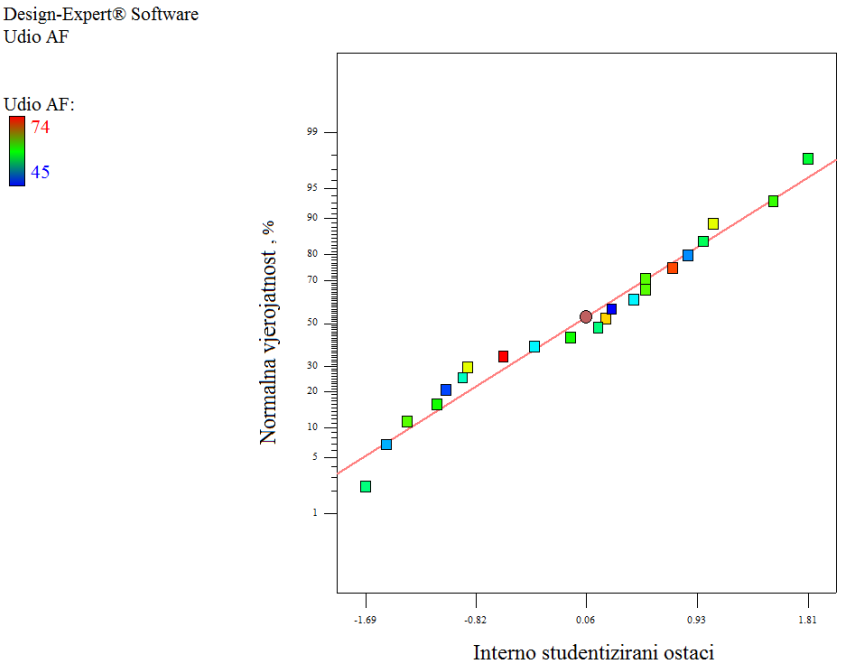
F-vrijednost odstupanja od modela u iznosu od 1,49 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu grešku. Postoji vjerojatnost od 37,65 % da dobivena F-vrijednost odstupanja modela nastaje zbog pojave šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, moguće je nastaviti s analizom prema izradi matematičkog modela. Vrijednosti veličina koje opisuju kvalitetu izrađenog reduciranog kubnog matematičkog modela prikazane su u tablici 5.12.

Tablica 5.12 Vrijednosti koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela za izračun udjela acikularnog ferita

Procijenjeno standardno odstupanje	1,27
Aritmetička sredina	58,59
Koeficijent varijacije, %	2,16
Predviđena suma kvadrata odstupanja	43,80
R^2 – koeficijent determinacije	0,9785
R^2_{adj} – prilagođeni koeficijent determinacije	0,9735
R^2_{pre} – predviđeni koeficijent determinacije	0,9655
Adekvatna preciznost	49,489

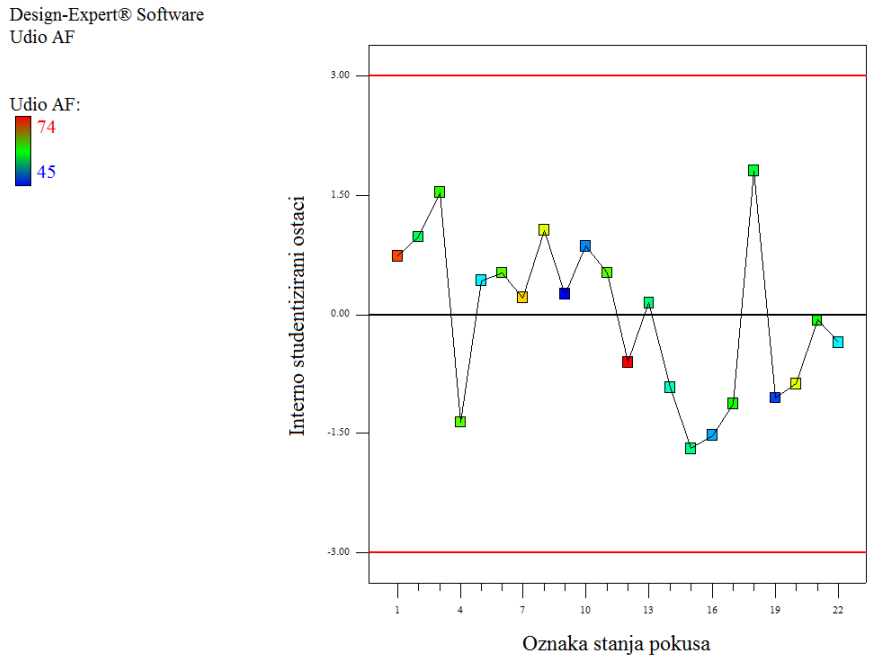
Vrijednosti R^2_{adj} i R^2_{pre} usklađene su. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 49,489 veći od minimalne vrijednosti koja iznosi 4, očito je da postoji primjeren signal i da iz tog razloga odabrani i modificirani model može služiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka ispituje normalnost izmjerenih vrijednosti za pojedina stanja pokusa. Slika 5.23 prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa. Normalizirani papir vjerojatnosti ostataka u odnosu na vrijednosti predviđenog odziva ukazuje na problem ukoliko postoji neki obrazac razdiobe prikazanih ostataka u odnosu na vrijednosti izračunatog (predviđenog) odziva. U ovom slučaju vidljivo je da ne postoji obrazac razdiobe već da su podaci raspoređeni po normalnoj razdiobi.

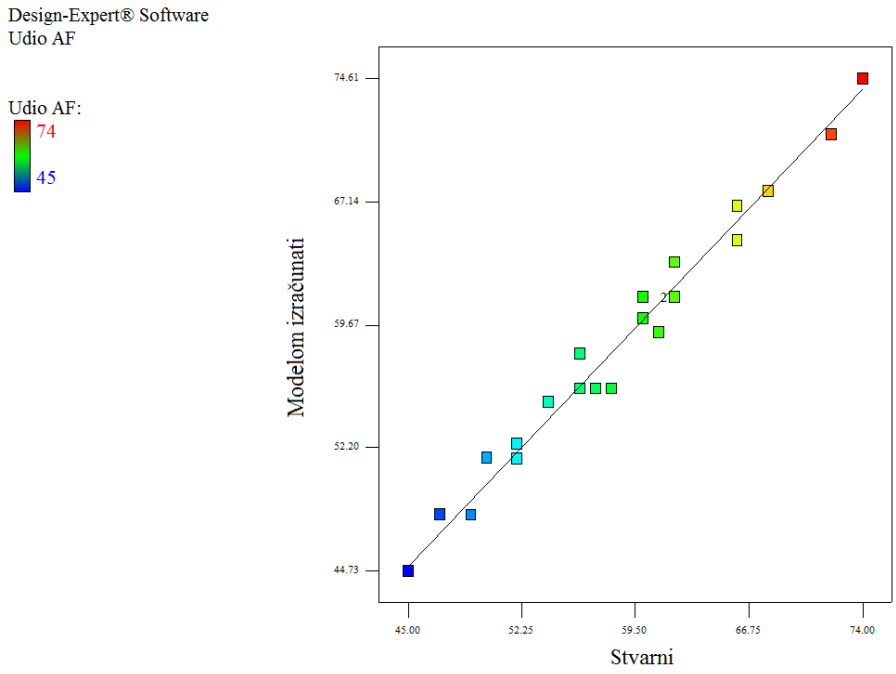


Slika 5.23 Normalizirani papir ostataka za model za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara

Dijagram ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa provjerava postojanje sustavne pogreške koja je mogla utjecati na odziv tijekom provođenja eksperimenta. Slika 5.24 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa na kojoj je vidljivo da ne postoji sustavna pogreška u pozadini, odnosno da se svi podaci nalaze unutar postavljenih granica vjerojatnosti (± 3). Slika 5.25 prikazuje odnos stvarnih i modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti. Vidljivo je da se obje vrijednosti dobro podudaraju što upućuje na adekvatnost izrađenog modela.



Slika 5.24 Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za model za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara



Slika 5.25 Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati za model za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara

Matematički model s kodiranim vrijednostima glasi:

$$Udio\ AF = 58{,}59 + 8{,}75A + 3{,}42B - 2{,}77C - 1{,}08AC \quad (10)$$

Iz kodiranog matematičkog modela moguće je izvesti 2 krajnja matematička modela, ovisno o kategorijskom faktoru načinu prijenosa metala – riječ je o modelima u slučaju konvencionalnog MAG zavarivanja kratkim spojevima i CBT MAG zavarivanja.

Krajnji matematički model za izračun udjela acikularnog ferita konvencionalnim MAG zavarivanjem (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) s pravim vrijednostima glasi:

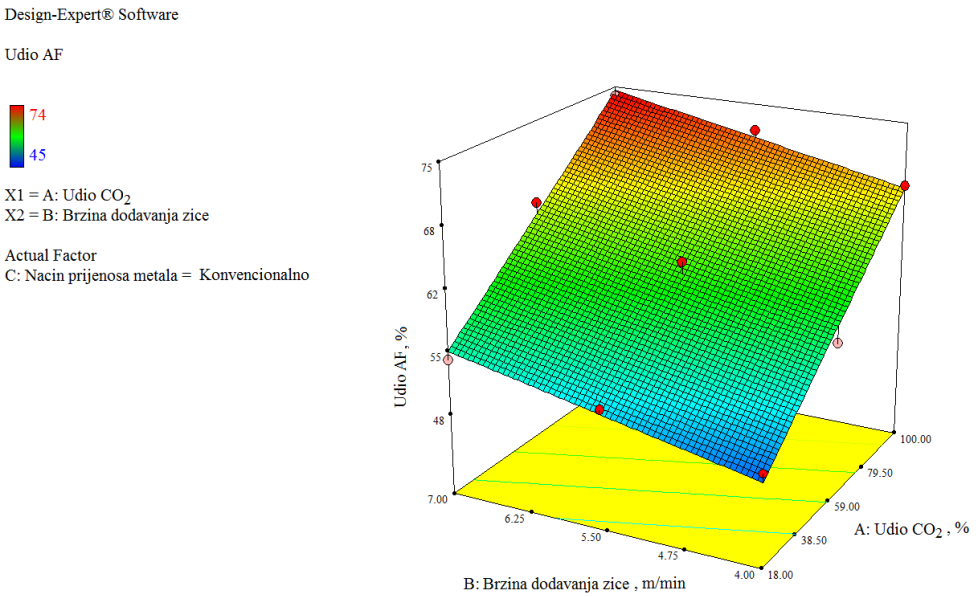
$$Udio\ AF = 36{,}68545 + 0{,}23984A + 2{,}7778B \quad (11)$$

gdje je:

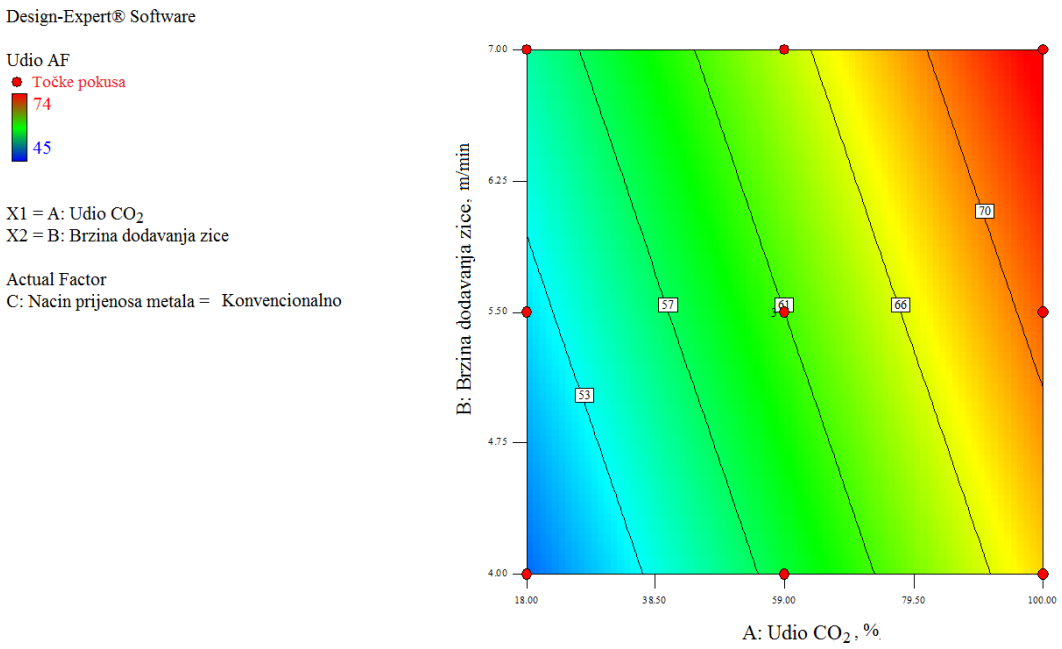
A – udio CO_2, %

B – brzina dodavanja žice, m/min

3D grafički prikaz odzivne površine udjela acikularnog ferita za slučaj konvencionalnog MAG zavarivanja (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) dan je na slici 5.26, dok je konturni prikaz dan na slici 5.27.



Slika 5.26 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna acikularnog ferita u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju



Slika 5.27 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju

Prema izrazu (10) i sa slika 5.26 i 5.27 vidljivo je da najveći utjecaj na udio acikularnog ferita u metalu zavara ima udio aktivne komponente (CO_2) u zaštitnom plinu. Osim faktora A (udio CO_2 u zaštitnom plinu), prema podacima iz tablice 5.11 utjecaj imaju i ostala dva faktora, faktor B (brzina dobave žice) i faktor C (način prijenosa metala). Slika 5.26 ukazuje na maksimalnu vrijednost udjela acikularnog ferita u uvjetima konvencionalnog MAG zavarivanja pri zaštitnoj atmosferi sačinjenoj od 100 % CO_2 te brzinom dodavanja žice od 7 m/min. Iz razloga što je faktor C (način prijenosa metala) kategorijski, nije ga moguće prikazati u 3D prikazu već se on drži konstantnim uz promjene ostalih numeričkih parametara. Osim glavnih efekata, značajan utjecaj ima i interakcija prvog reda između načina prijenosa metala i zaštitnog plina. Razlog većem udjelu acikularnog ferita kod konvencionalnog MAG zavarivanja moguće je pronaći u jednom od utjecajnih čimbenika za formiranje acikularnog ferita i to onog koji se odnosi na koeficijente toplinskih naprezanja. Naime, s većim unosom topline konvencionalnim MAG zavarivanjem (spram CBT MAG zavarivanja) zbog velikih razlika u toplinskim koeficijentima određenih uključaka spram austenita dolazi do pojave većih toplinskih naprezanja koja pogoduju nastanku acikularnog ferita. Isto tako, povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu pogoduje se i nastanku nemetalnih uključaka koji potiču nastanak acikularnog ferita.

Krajnji matematički model za izračun udjela acikularnog ferita CBT MAG zavarivanjem s pravim vrijednostima glasi:

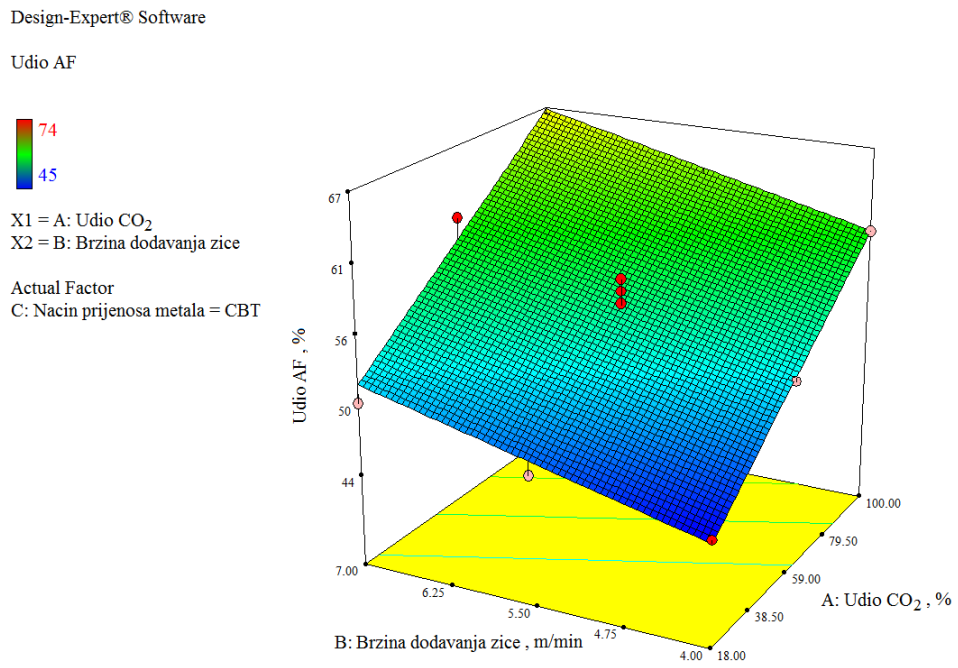
$$Udio\ AF = 32{,}25788 + 0{,}18699A + 2{,}7778B \quad (12)$$

gdje je:

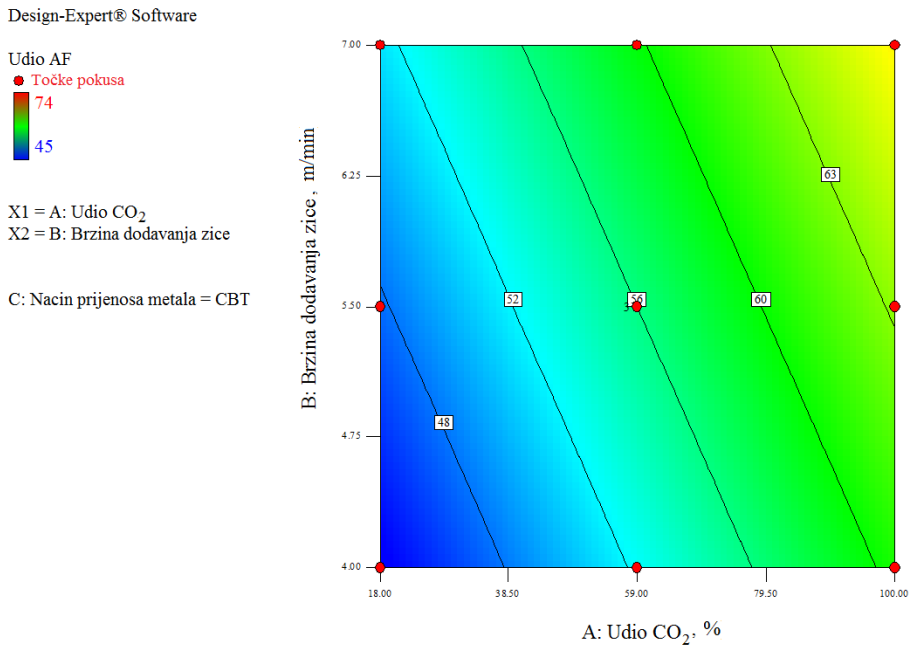
A – udio CO_2, %

B – brzina dodavanja žice, m/min

3D grafički prikaz odzivne površine udjela acikularnog ferita za slučaj CBT MAG zavarivanja dan je na slici 5.28, dok je konturni prikaz dan na slici 5.29.



Slika 5.28 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela acikularnog ferita u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju



Slika 5.29 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela acikularnog ferita u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju

Uspoređujući odzivne površine za slučajeve konvencionalnog MAG (Slika 5.26) i CBT MAG zavarivanja (Slika 5.28), vidljivo je da se maksimalne vrijednosti udjela acikularnog ferita postižu za iste parametre zavarivanja. No, za slučaj CBT MAG zavarivanja se ipak postiže nešto niža vrijednost udjela acikularnog ferita. Zbog karakteristične dinamičke karakteristike (opisane u poglavlju 3.3.5 i analizirane u poglavlju 5.1) kod CBT načina prijenosa metala postižu se za isto definirane brzine žice manje jakosti struje i napona koje rezultiraju manjim unosom topline spram konvencionalnog MAG zavarivanja. Iako je to u praksi većinom poželjna karakteristika, zbog specifičnosti nastanka i formiranja acikularnog ferita (djelovanje toplinskih naprezanja), manji unos topline predstavlja otežavajuće uvjete za formiranje acikularnog ferita. Iako je kritični prag ekvivalenta kisika iznad i ispod kojeg dolazi do smanjenja udjela acikularnog ferita u metalu zavara definiran na 2 % volumnog udjela [98], prema rezultatima ovog rada, kritični prag nije određen. Razlog tome leži u činjenici da je prema dobivenim izmjerenim vrijednostima udjela acikularnog ferita u metalu zavara uočen kontinuirani rast i to u ovisnosti o udjelu CO_2 u mješavini tj. ekvivalentu kisika. Do nepoklapanja rezultata vjerojatno dolazi zbog činjenice da je riječ o korištenju različitih zaštitnih plinova gdje je u literaturi korišten zaštitni plin s maksimalnim udjelom CO_2 od 18 % dok su u ovom eksperimentu korišteni zaštitni plinovi s rasponom udjela aktivne

komponente od 18 % do 100 %. Zbog saznanja o drugačijem trendu rasta udjela acikularnog ferita spram ekvivalenta kisika zaštitnog plina upućuje se na činjenicu da utjecaj ekvivalenta kisika zaštitnog plina s većim udjelima aktivne komponente na stvaranje acikularnog ferita još nije dovoljno istražen.

Na osnovu dobivenog matematičkog modela (10) Monte Carlo metodom simulirana je funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine AF_{max} koja predstavlja stanje pokusa s najvećim udjelom acikularnog ferita u metalu zavara. Izlazna veličina simulirana je na temelju izraza (11) u koji je dodan još jedan faktor, faktor analize slike. Konačni izraz na temelju kojeg je izvršena Monte Carlo simulacija dan je:

$$AF_{maxi} = 34{,}68545 + 0{,}23984\delta CO_i + 2{,}2777\delta BZ_i + \delta AS_i \quad (13)$$

gdje je:

AF_{maxi} – izlazna veličina, %

δCO_i – udio CO_2 u zaštitnom plinu, %

δBZ_i – brzina dodavanja žice, m/min

δAS_i – analiza slike, %

Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5.13.

Tablica 5.13 Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine AF_{max}

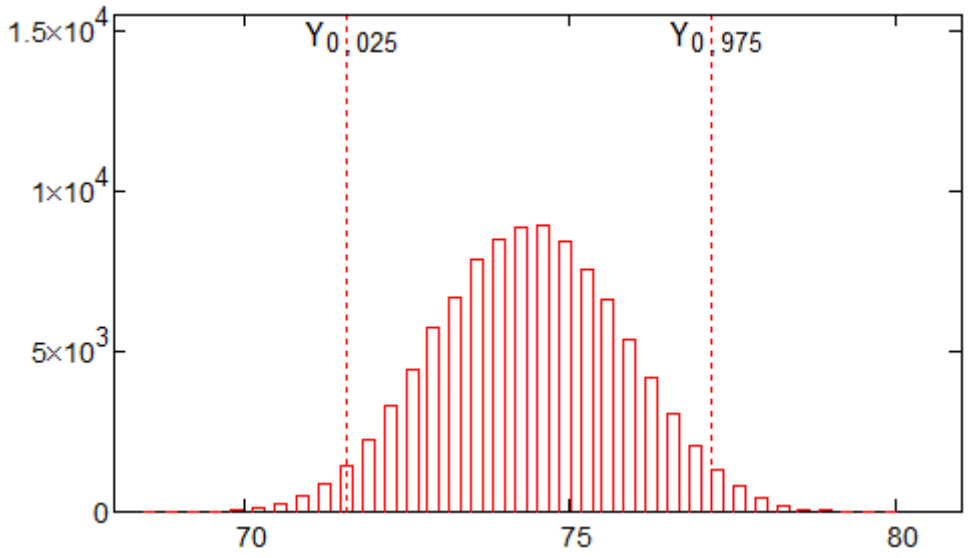
Ulazna veličina, x_i	**Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$**
Udio CO_2 u zaštitnom plinu, δCO_i	Pravokutna razdioba (M, 98 %, 100 %)
Brzina dodavanje žice, δBZ_i	Pravokutna razdioba (M, 6,3 m/min, 7,7 m/min)
Analiza slike, δAS_i	Normalna razdioba (M, 0 %, 1,1 %)

Budući da se mjerenje udjela acikularnog ferita temelji na analizi slike gdje postoji veliki utjecaj čovjeka kao mjeritelja te da to uvelike utječe na mjernu nesigurnost rezultata odlučeno je dodati u izraz (11) faktor analize slike (δAS_i). Rezultati o udjelu acikularnog ferita

dobiveni su temeljem ponovljenog mjerenja 30 puta. na temelju dobivenih rezultata utvrđeno je da procijenjena standardna devijacija iznosi 1,1 %. Raspon ulazne veličine udjela CO_2 u zaštitnom plinu definiran je shodno certifikatu prema kojem je moguće odstupanje od ± 2 % od traženog sastava. Definiranje raspona ulazne veličine brzina dodavanja žice definirana je prema normi HRN EN 60974-5:2009 Oprema za elektrolučno zavarivanje – 5. dio: Napajanja žice koja propisuje maksimalno odstupanje u brzini dodavanja žice od 10 % ukoliko je riječ o brzini dodavanja žice u rasponu od 25 % – 100 % maksimalne dobave žice. Za korišteni dodavač žice, maksimalna brzina dodavanja žice je 22 m/min. U ovom slučaju je riječ o brzini dodavanja žice od 7 m/min što znači da se maksimalno odstupanje računa kao 10 % od 7 m/min što rezultira vrijednošću od 0,7 m/min.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(AF_{max})$ dobivena je uz M = 100000 simulacija. Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine AF_{max} iznosi 1,44 %. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine AF_{max} prikazana je na slici 5.30. Konvolucijom razdioba ulaznih veličina definiranih u tablici 5.13 ostvarena je normalna razdioba. Izlazna veličina nalazi se unutar intervala:

($Y_{0,025}$ = 71,59 %; $Y_{0,975}$ = 77,16 %) uz P= 95 %.



Slika 5.30 Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(AF_{max})$

5.6. Prikaz rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja

Rezultati dobiveni kemijskom analizom metala zavara dani su u tablici 5.14. Navedene vrijednosti rezultat su srednje vrijednosti mjerenja ponovljenih tri puta za svako stanje pokusa.

Tablica 5.14 Kemijska analiza metala zavara za sva stanja pokusa

Oznaka uzorka	**%, maseni udio**									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
1	0,09	**0,69**	1,60	0,026	0,018	0,51	0,51	0,25	0,10	ostatak
2	0,08	0,65	1,59	0,017	0,014	0,55	0,51	0,26	0,10	ostatak
3	0,08	0,58	1,67	0,017	0,011	0,46	0,40	0,21	0,09	ostatak
4	0,07	0,53	**1,74**	0,017	0,009	0,40	0,31	0,17	0,07	ostatak
5	0,08	0,62	1,66	0,017	0,012	0,51	0,46	0,24	0,09	ostatak
6	0,08	0,63	1,68	0,018	0,012	0,51	0,46	0,24	010	ostatak
7	0,09	0,60	1,54	0,019	0,013	0,54	0,50	0,26	0,10	ostatak
8	0,08	0,56	1,47	0,018	0,013	0,55	0,51	0,26	0,10	ostatak
9	0,08	0,58	1,56	0,018	0,013	0,54	0,48	0,25	0,10	ostatak
10	0,08	0,58	1,54	0,018	0,013	0,53	0,49	0,25	0,10	ostatak
11	0,08	0,58	1,56	0,017	0,013	0,53	0,48	0,25	0,10	ostatak
12	0,08	0,55	1,61	0,017	0,011	0,47	0,41	0,21	0,09	ostatak
13	0,08	0,57	1,56	0,018	0,012	0,51	0,45	0,24	0,09	ostatak
14	0,07	0,52	1,68	0,017	0,010	0,43	0,34	0,18	0,08	ostatak
15	0,08	0,58	1,55	0,018	0,013	0,54	0,49	0,25	0,10	ostatak
16	0,08	0,58	1,56	0,017	0,013	0,53	0,48	0,25	0,10	ostatak
17	0,09	0,57	1,45	0,018	0,014	0,57	0,54	0,27	0,10	ostatak

Nastavak tablice 5.14.

Oznaka uzorka	%, maseni udio									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
18	0,08	0,55	**1,44**	0,019	0,014	0,56	0,52	0,27	0,10	ostatak
19	0,09	0,57	1,50	0,018	0,014	0,56	0,51	0,27	0,10	ostatak
20	0,08	**0,54**	1,58	0,018	0,012	0,49	0,43	0,23	0,09	ostatak
21	0,08	0,55	1,55	0,018	0,012	0,51	0,46	0,24	0,09	ostatak
22	0,08	0,56	1,53	0,018	0,013	0,53	0,48	0,25	0,10	ostatak

U tablici su minimalne vrijednosti silicija i mangana označene zelenom bojom, dok su maksimalne dobivene vrijednosti za iste elemente označene crvenom bojom.

5.7. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja – udio silicija

Rezultati prikazani u tablici 5.14 statistički su obrađeni u svrhu dobivanja matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara zavarivanja na kemijski sastav metala zavara – udio silicija, odnosno pomoću kojeg će biti moguće računskim putem ovisno o postavljenim parametrima izračunati udio silicija u metalu zavara. Provedbom analize varijance, za model koji najbolje opisuje ovisnost udjela silicija o variranim parametrima odabran je reducirani kubni model. Analiza varijance odabranog modela prikazana je u tablici 5.15.

F-vrijednost modela od 10,57 upućuje na to da je model značajan. Postoji vjerojatnost od samo 0,01 % da je ta vrijednost rezultat pojave šuma.

Pomoću vrijednosti Prob>F definira se značajnost pojedinih elemenata modela i to na način da ukoliko je ta vrijednost manja od 0,05 element se smatra značajnim. Prema podacima iz tablice 5.15 vidljivo je da su značajni faktori C, B^2 i AB^2. Faktori A i B nisu značajni za model no zbog značajnih interakcija i kvadratnih članova u svrhu podržavanja hijerarhije u modelu ipak su zadržana inače dva samostalno neznačajna faktora A i B.

Tablica 5.15 Analiza varijance matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio silicija u metalu zavara

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	*P*-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	2,52	7	0,36	10,57	0,0001	DA
A: % CO_2	$1{,}614 \times 10^{-4}$	1	$1{,}614 \times 10^{-4}$	$4{,}733 \times 10^{-3}$	0,9461	NE
B: $v_ž$	0,046	1	0,046	1,35	0,2647	NE
C: prijenos metala	0,36	1	0,36	10,52	0,0059	DA
AB	0,037	1	0,037	1,08	0,3164	NE
BC	0,10	1	0,10	2,98	0,1063	NE
B^2	0,63	1	0,63	18,39	0,0008	DA
AB^2	0,47	1	0,47	13,63	0,0024	DA
Ostatak	0,48	14	0,034	-	-	-
Odstupanje od modela	0,28	10	0,028	0,57	0,7854	NE
Čista greška	0,20	4	0,049	-	-	-
Ukupno	3,00	21	-	-	-	-

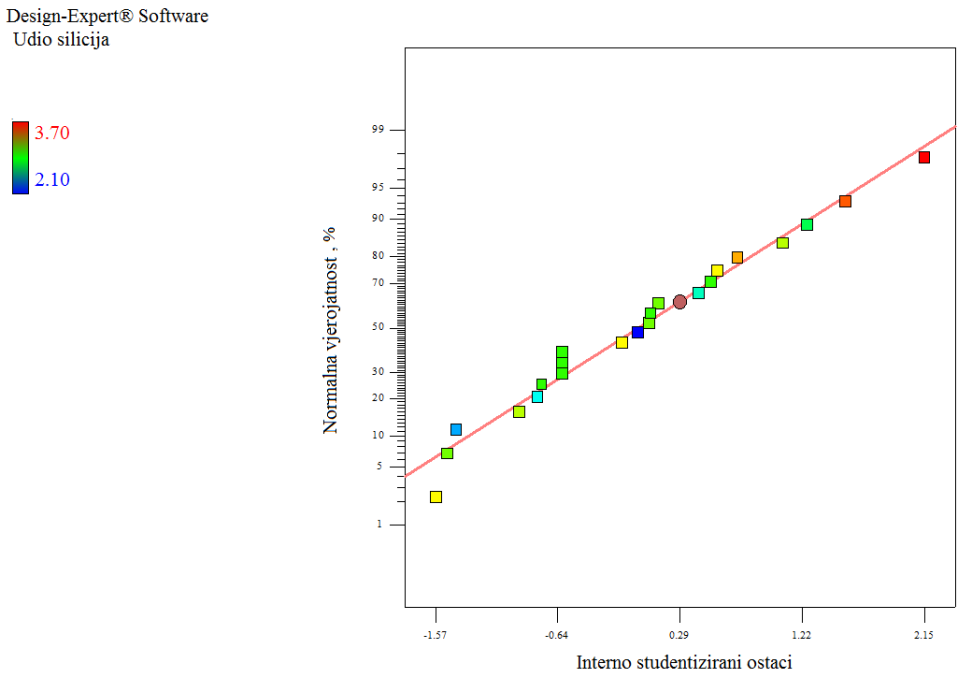
F-vrijednost odstupanja od modela u iznosu od 0,57 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu grešku. Postoji vjerojatnost od 78,54 % da dobivena F-vrijednost odstupanja modela nastaje zbog pojave šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, moguće je nastaviti s analizom prema izradi matematičkog modela. Vrijednosti veličina koje opisuju kvalitetu izrađenog reduciranog kubnog matematičkog modela prikazane su u tablici 5.16.

Tablica 5.16 Vrijednosti koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara

Procijenjeno standardno odstupanje	0,18
Aritmetička sredina	3,02
Koeficijent varijacije, %	6,12
Predviđena suma kvadrata odstupanja	1,15
R^2 – koeficijent determinacije	0,8409
R^2_{adj} – prilagođeni koeficijent determinacije	0,7613
R^2_{pre} – predviđeni koeficijent determinacije	0,6164
Adekvatna preciznost	12,549

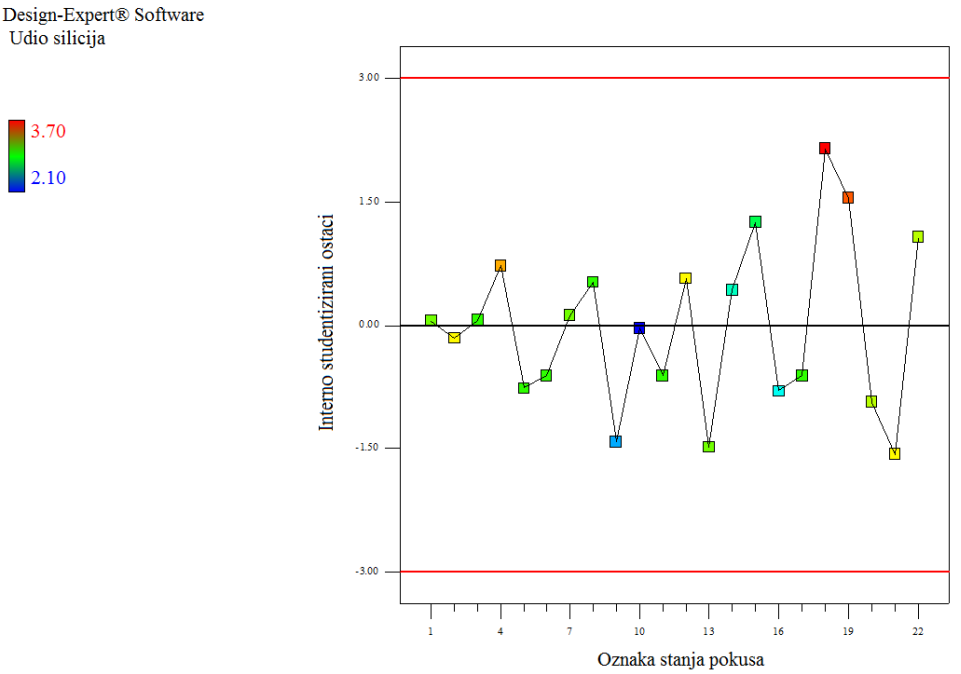
Vrijednosti R^2_{adj} i R^2_{pre} usklađene su. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 12,549 veći od minimalne vrijednosti koja iznosi 4, očito je da postoji primjeren signal i da iz tog razloga odabrani i modificirani model može služiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Slika 5.31 prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa. Vidljivo je da ne postoji obrazac razdiobe već da su podaci jednoliko raspoređeni po normalnoj razdiobi i da nema značajnih odstupanja.



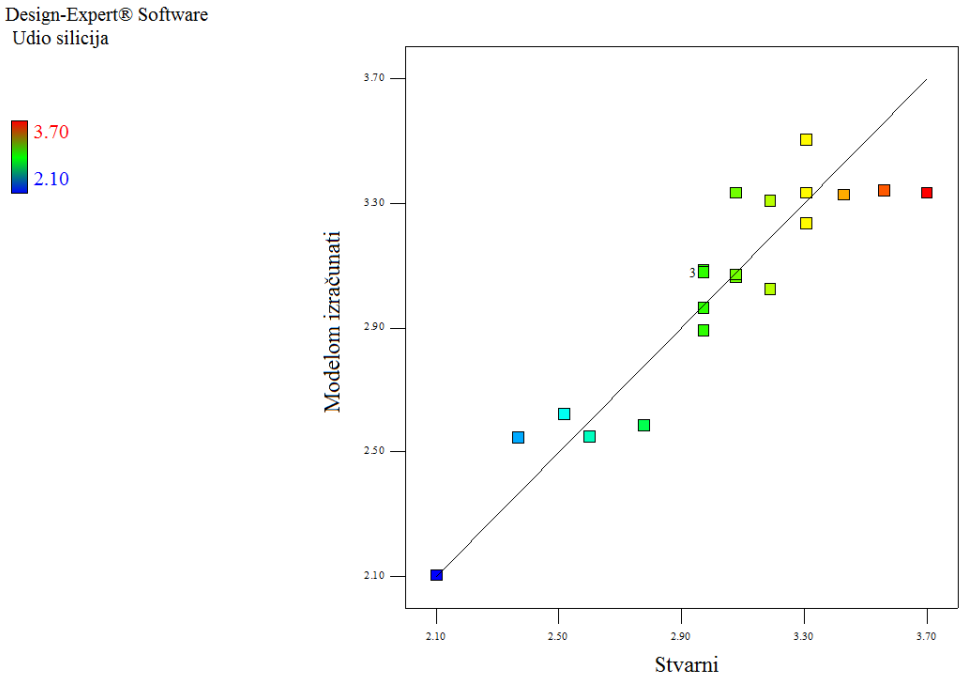
Slika 5.31 Normalizirani papir ostataka za model za izračun udjela silicija u metalu zavara

Slika 5.32 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja pokusa te je vidljivo da ne postoje odstupanja odnosno sustavna greška budući da se ne može uočiti pravilnost u prikazanim podacima.



Slika 5.32 Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za model za izračun udjela silicija u metalu zavara

Slika 5.33 prikazuje odnos stvarnih i modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti. Vidljivo je s grafa da se obje vrijednosti dobro podudaraju.



Slika 5.33 Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati za model za izračun udjela silicija u metalu zavara

Matematički model s kodiranim vrijednostima glasi:

$$Udio\ silicija = (3{,}20 - 6{,}353 \times 10^{-3}A + 0{,}062B + 0{,}13C - 0{,}068AB - 0{,}092BC - 0{,}34B^2) + 0{,}42AB^2)^{-0{,}5} \quad (14)$$

Iz kodiranog matematičkog modela moguće je izvesti 2 krajnja matematička modela, ovisno o kategorijskom faktoru načinu prijenosa metala.

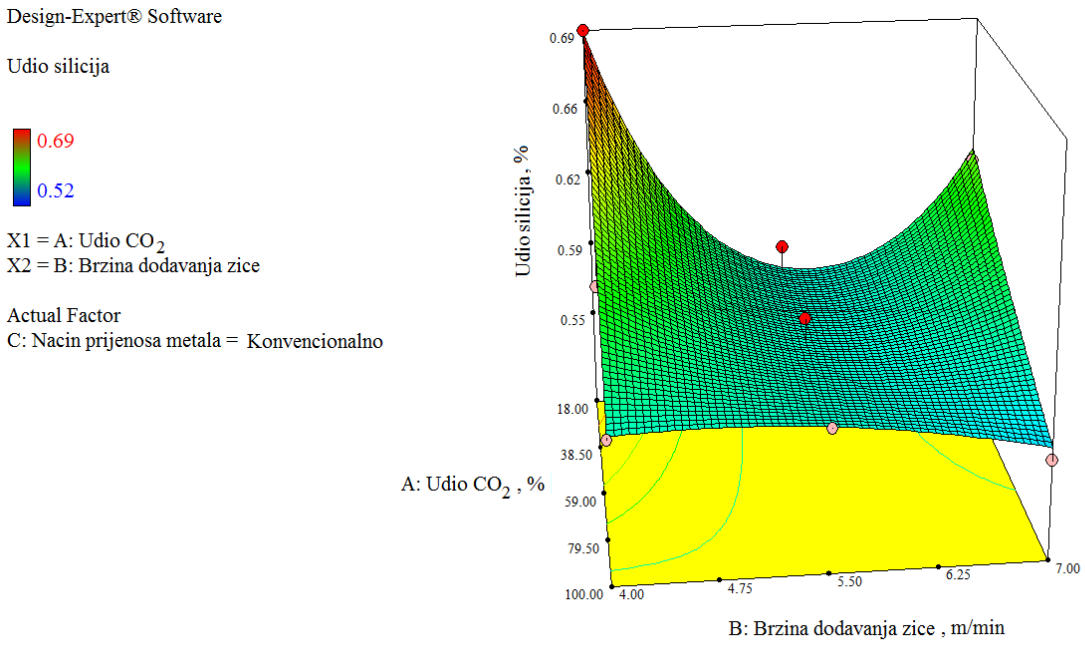
Krajnji matematički model za izračun udjela silicija u metalu zavara konvencionalnim MAG zavarivanjem (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) s pravim vrijednostima glasi:

$$Udio\ silicija = (-10{,}47555 + 0{,}14285A + 4{,}76352\ B - 0{,}050898\ AB - 0{,}41780\ B^2 + 4{,}52682 \times 10^{-3}\ AB^2)^{-0{,}5} \quad (15)$$

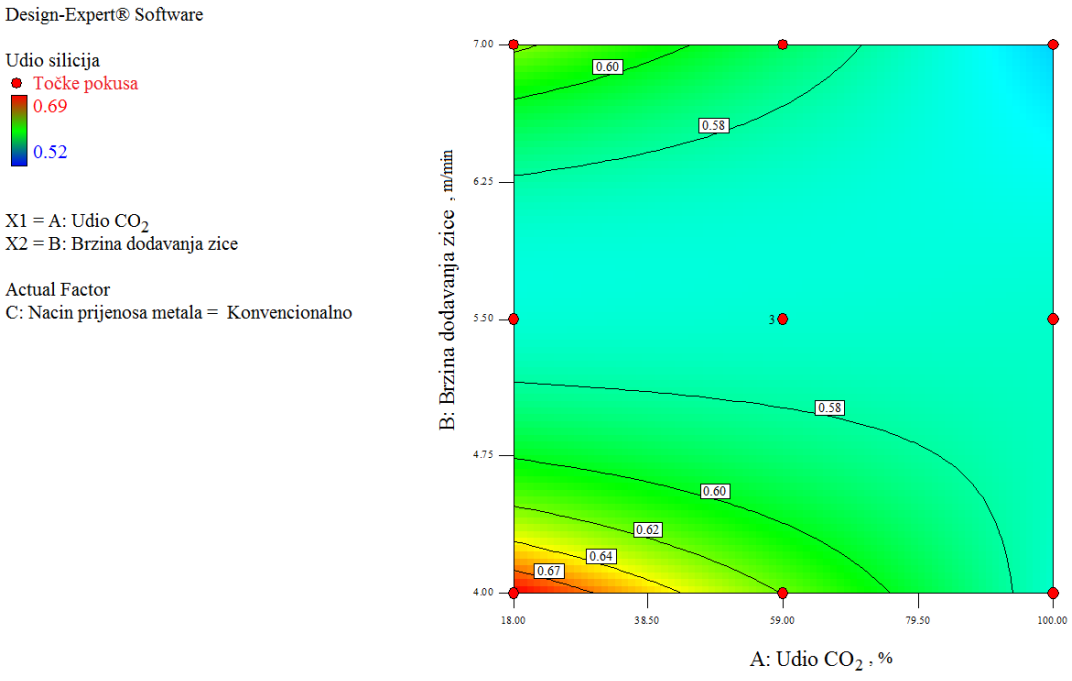
gdje je:

A – udio CO_2, %; B – brzina dodavanja žice, m/min

3D grafički prikaz odzivne površine udjela silicija u metalu zavara za slučaj konvencionalno MAG zavarivanja (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) dan je na slici 5.34, dok je konturni prikaz dan na slici 5.35.



Slika 5.34 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela silicija u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju



Slika 5.35 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju

Odzivna površina i konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju prikazuje da je najveće vrijednosti moguće dobiti pri zavarivanju s brzinom žice od 4 m/min i zaštitnim plinom s 18 % CO_2. Drugim riječima, s najmanjim unosom topline i najmanjim udjelom aktivne komponente u zaštitnom plinu dolazi do najmanje odgaranja silicija iz metala zavara. Vidljivo je također da su najveće razlike u dobivenim vrijednostima postignute kod zavarivanja s 18 % CO_2 zaštitnom atmosferom, dok kod zavarivanja sa 100 % CO_2 gotovo da i nema razlike kod variranja brzine dodavanja žice.

Krajnji matematički model za izračun udjela silicija u metalu zavara CBT MAG zavarivanjem s pravim vrijednostima glasi:

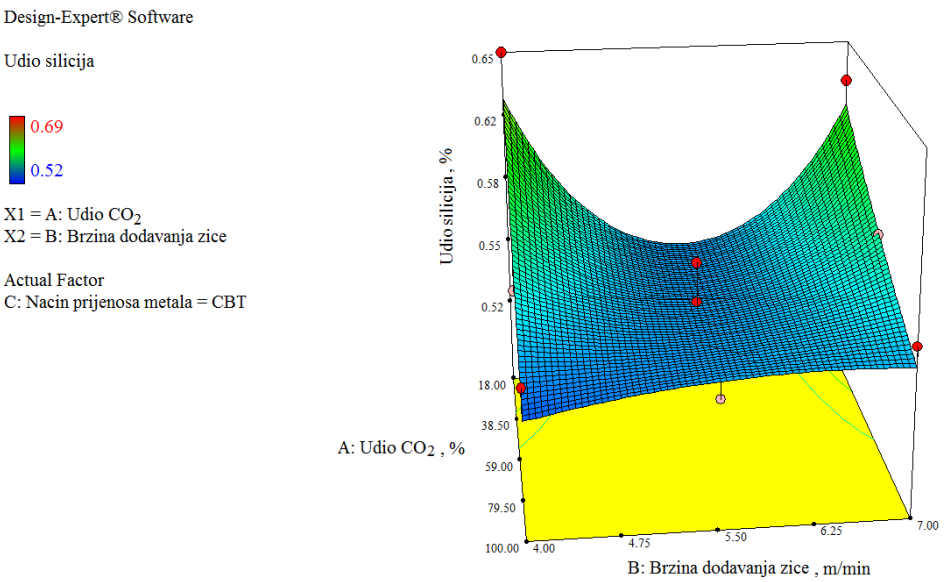
$$Udio\ silicija = (-\ 9{,}54531 + 0{,}14285A + 4{,}64082\ B - 0{,}050898\ AB - 0{,}41780\ B^2 + 4{,}52682 \times 10^{-3}\ AB^2)^{-0{,}5} \quad (16)$$

gdje je:

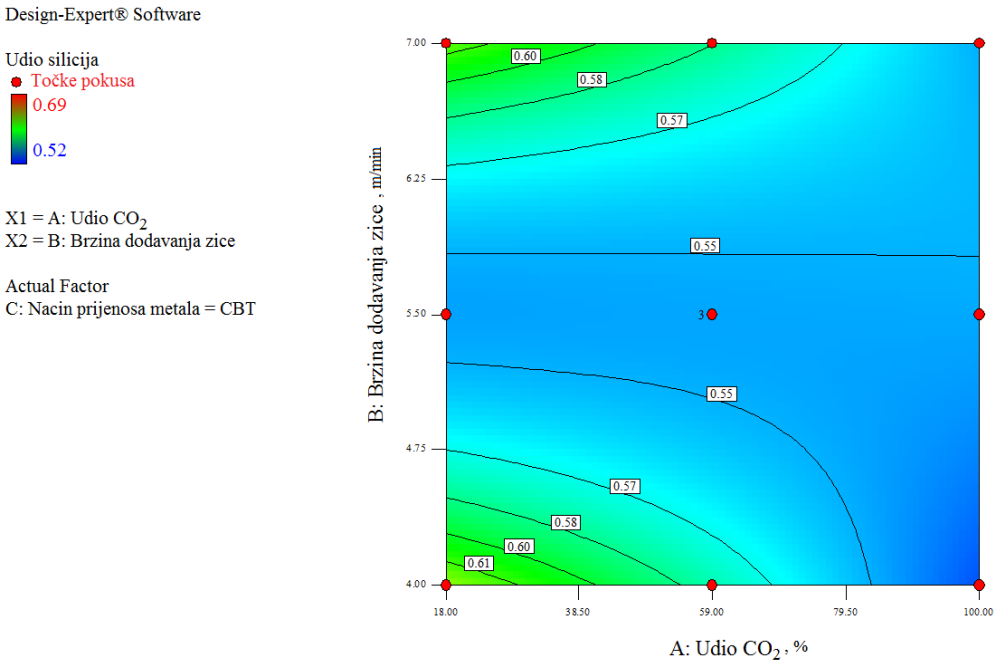
A – udio CO_2, %

B – brzina dodavanja žice, m/min

3D grafički prikaz odzivne površine udjela silicija u metalu zavara za slučaj konvencionalnog MAG zavarivanja dan je na slici 5.36, dok je konturni prikaz dan na slici 5.37.



Slika 5.36 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela silicija u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju



Slika 5.37 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela silicija u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju

Analizom 3D prikaza odzivne površine sa slike 5.36 uočava se sličnost ponašanja u udjelima silicija u metalu zavara u poredbi s konvencionalnim MAG zavarivanjem prikazanom na slici 5.36 što znači da su najveće vrijednosti udjela silicija postignute s

brzinom dodavanja žice od 4 m/min i zaštitnim plinom s udjelom CO_2 od 18 %. Ono u čemu je moguće uočiti razliku je u simetričnosti odzivne površine gledano na razini od 18 % CO_2 što ukazuje na to da je gubitak silicija zanemariv iako dolazi do povećanog unosa topline Isto tako je nešto drukčiji nagib plohe u području zavarivanja sa 100 % CO_2 gdje je uočen blagi porast vrijednosti udjela silicija (spram konvencionalnog MAG zavarivanja). Ove dvije razlike u odzivnim površinama idu u prilog CBT MAG zavarivanju jer je na taj način moguće postići manja odgaranja silicija tijekom procesa zavarivanja.

Na osnovu dobivenog matematičkog modela (16) Monte Carlo metodom simulirana je funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Si_{max} koja predstavlja stanje pokusa s najvećim udjelom silicija u metalu zavara. Konačni izraz na temelju kojeg je izvršena Monte Carlo simulacija dan je:

$$Si_{maxi} = (-\ 9{,}54531 + 0{,}14285\delta CO_i + 4{,}64082\delta BZ_i - 0{,}050898\delta CO_i\ \delta BZ_i - 0{,}41780\ \delta BZ_i^2 + 4{,}52682 \times 10^{-3}\ \delta CO_i\, \delta BZ_i^2\ )^{-0{,}5} \quad (17)$$

gdje je:

Si_{maxi} – izlazna veličina, %

δCO_i – udio CO_2 u zaštitnom plinu, %

δBZ_i – brzina dodavanja žice, m/min

Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5.17.

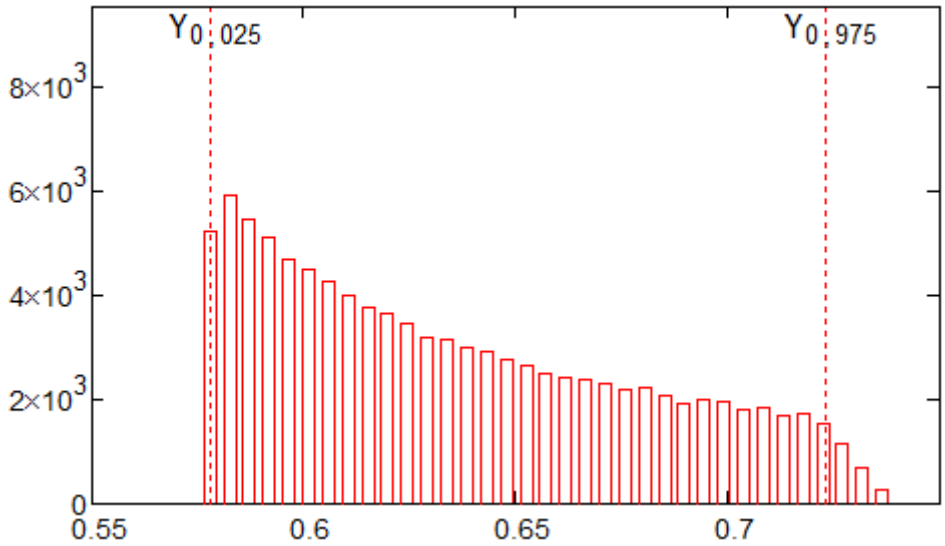
Tablica 5.17 Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine Si_{max}

Ulazna veličina, x_i	**Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$**
Udio CO_2 u zaštitnom plinu, δCO_i	Pravokutna razdioba (*M*, 16 %, 20 %)
Brzina dodavanje žice, δBZ_i	Pravokutna razdioba (*M*, 3,45 m/min, 4,55 m/min)

Rasponi razdioba ulaznih veličina definirani su na isti način kao i u prethodnom slučaju – MC simulacija AF_{maxi}. Budući da je u ovom slučaju riječ o brzini dodavanja žice koja je ispod 25 % maksimalne brzine dodavača žice, dopušteno odstupanje računa se kao 2,5 % od 22 m/min (maksimalna brzina dodavanja žice) što rezultira odstupanjem od 0,55 m/min.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(Si_{max})$ dobivena je uz M = 100000 simulacija. Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine Si_{max} iznosi 0,04 %. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Si_{max} prikazana je na slici 5.38. Konvolucijom razdioba ulaznih veličina definiranih u tablici 5.17 nije ostvarena normalna razdioba. Izlazna veličina nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 0{,}58\ \%;\ Y_{0,975} = 0{,}72\ \%) \text{ uz } P = 95\ \%.$$



Slika 5.38 Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(Si_{max})$

5.8. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja – udio mangana

Rezultati prikazani u tablici 5.14 statistički su obrađeni u svrhu dobivanja matematičkog modela kojim je moguće izračunati udio mangana, odnosno opisati utjecaj variranih parametara zavarivanja na udio mangana u metalu zavara. Provedbom analize varijance, za model koji najbolje opisuje ovisnost udjela silicija o variranim parametrima odabran je kvadratni model. Analiza varijance odabranog modela prikazana je u tablici 5.18.

Tablica 5.18 Analiza varijance matematičkog modela koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio mangana u metalu zavara

Izvor varijacije	Suma kvadrata odstupanja	Stupanj slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	*P*-vrijednost Prob > F	Značajnost
Model	0,017	8	$2{,}083 \times 10^{-3}$	8,89	0,0004	DA
A: % CO_2	0,010	1	0,010	44,55	< 0,0001	DA
B: $v_ž$	$2{,}612 \times 10^{-3}$	1	$2{,}612 \times 10^{-3}$	11,14	0,0053	DA
C: prijenos metala	$4{,}648 \times 10^{-4}$	1	$4{,}648 \times 10^{-4}$	1,98	0,1826	NE
AB	$4{,}545 \times 10^{-5}$	1	$4{,}545 \times 10^{-5}$	0,19	0,6669	NE
AC	$9{,}305 \times 10^{-6}$	1	$9{,}305 \times 10^{-6}$	0,040	0,8452	NE
BC	$1{,}356 \times 10^{-4}$	1	$1{,}356 \times 10^{-4}$	0,58	0,4605	NE
A^2	$9{,}282 \times 10^{-4}$	1	$9{,}282 \times 10^{-4}$	3,96	0,0681	NE
B^2	$2{,}655 \times 10^{-3}$	1	$2{,}655 \times 10^{-3}$	11,33	0,0051	DA
Ostatak	$3{,}047 \times 10^{-3}$	13	$2{,}344 \times 10^{-4}$	-	-	-
Odstupanje od modela	$1{,}884 \times 10^{-3}$	9	$2{,}093 \times 10^{-4}$	0,72	0,6880	NE
Čista greška	$1{,}164 \times 10^{-3}$	4	$2{,}909 \times 10^{-4}$	-	-	-
Ukupno	0,020	21	-	-	-	-

F-vrijednost modela od 8,89 upućuje na to da je model značajan. Postoji vjerojatnost od samo 0,04 % da je ta vrijednost rezultat pojave šuma.

Vrijednost Prob>F definira značajnost pojedinih elemenata modela i to na način da ukoliko je ta vrijednost manja od 0,05 element se smatra značajnim. Prema podacima iz tablice 5.18 vidljivo je da su značajni faktori A, B i B^2.

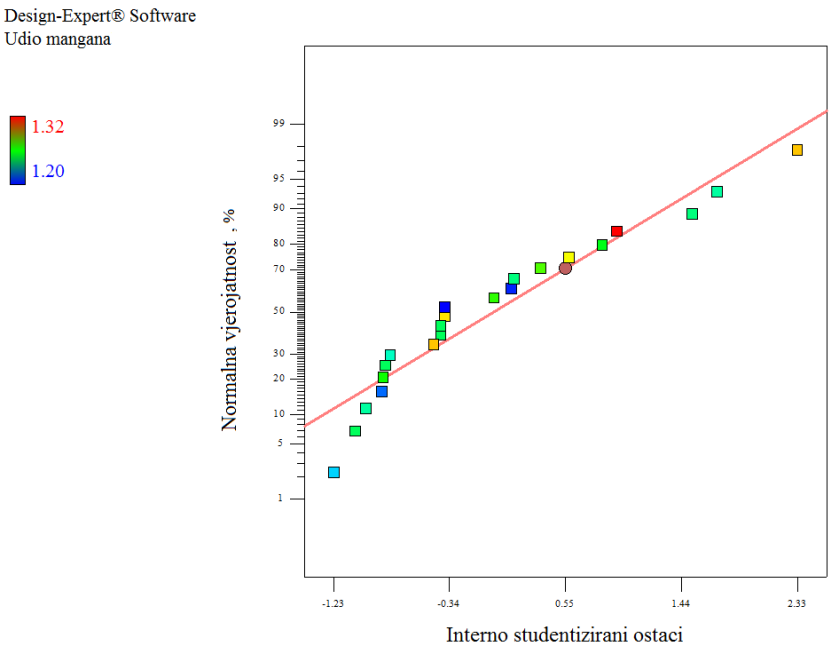
F-vrijednost odstupanja od modela u iznosu od 0,72 znači da ova veličina nije značajna u odnosu na čistu grešku. Postoji vjerojatnost od 68,80 % da dobivena F-vrijednost odstupanja modela nastaje zbog pojave šuma. S obzirom da odstupanje od modela nije značajno, moguće je nastaviti s analizom prema izradi matematičkog modela. Vrijednosti veličina koje opisuju kvalitetu izrađenog kvadratnog matematičkog modela prikazane su u tablici 5.19.

Tablica 5.19 Vrijednosti koje opisuju kvalitetu izrađenog matematičkog modela za izračun udjela mangana u metalu zavara

Procijenjeno standardno odstupanje	0,015
Aritmetička sredina	1,25
Koeficijent varijacije, %	1,22
Predviđena suma kvadrata odstupanja	$7{,}807 \times 10^{-3}$
$\boldsymbol{R^2}$ **– koeficijent determinacije**	0,8454
$\boldsymbol{R^2_{adj}}$ **– prilagođeni koeficijent determinacije**	0,7513
$\boldsymbol{R^2_{pre}}$ **– predviđeni koeficijent determinacije**	0,6040
Adekvatna preciznost	10,708

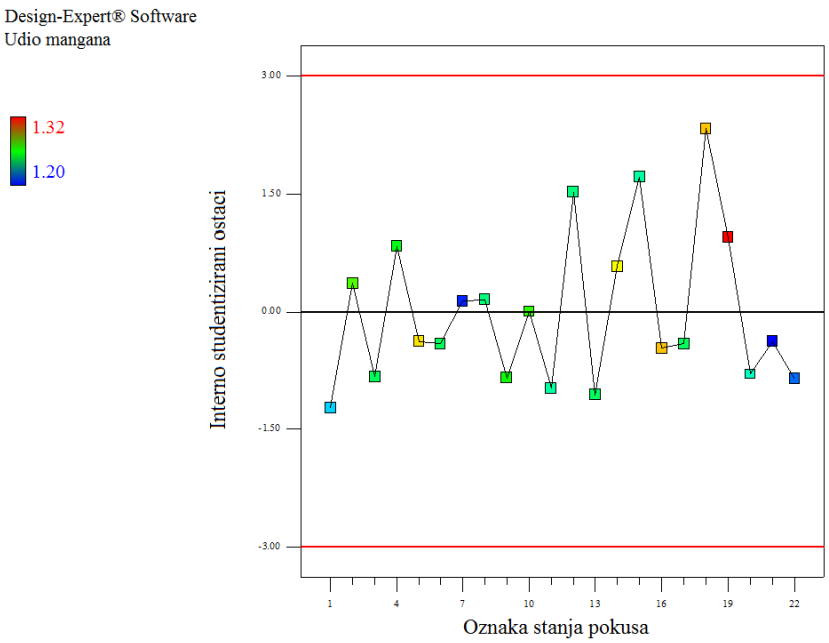
Vrijednosti R^2_{adj} i R^2_{pre} usklađene su. Adekvatna preciznost mjeri odnos veličina signala u odnosu na šum, a kako je omjer 10,708 veći od minimalne tražene vrijednosti koja iznosi 4, očito je da postoji primjeren signal i da se iz tog razloga odabrani kvadratni model može služiti za analizu u eksperimentalnom prostoru.

Slika 5.39 prikazuje normalizirani papir vjerojatnosti ostataka za pojedino stanje pokusa za model izračuna udjela mangana u metalu zavara. Vidljivo je da nema velikih odstupanja niti obrasca raspodjele ostataka.



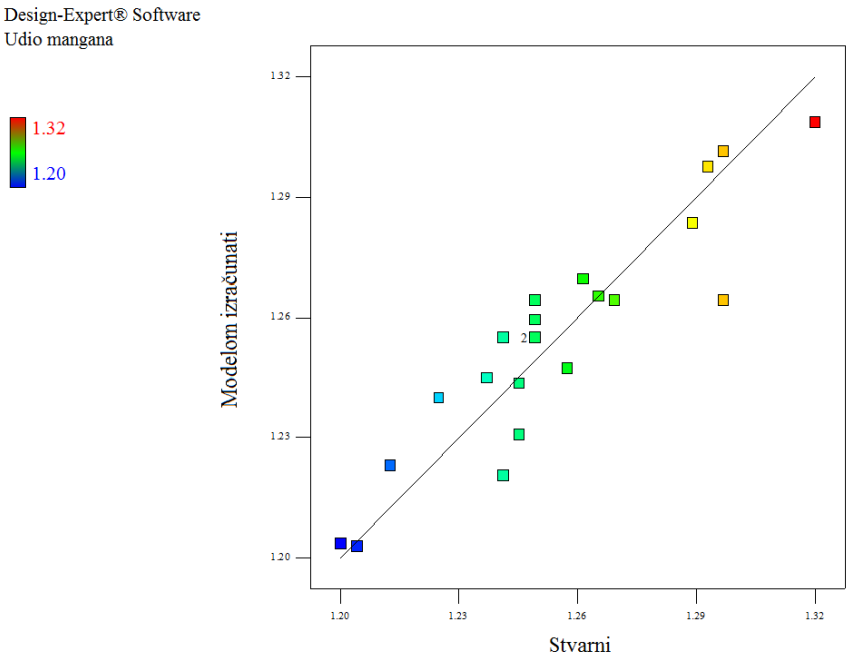
Slika 5.39 Normalizirani papir ostataka za model za izračun udjela mangana u metalu zavara

Slika 5.40 prikazuje slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa iz koje je moguće vidjeti da ne postoji sustavna pogreška u pozadini.



Slika 5.40 Slučajno rasipanje ostataka u odnosu na redoslijed izvođenja plana pokusa za model za izračun udjela mangana u metalu zavara

Slika 5.41 prikazuje odnos stvarnih i modelom izračunatih (predviđenih) vrijednosti što omogućava uočavanja eventualnih područja koja se teže predviđaju izrađenim modelom. Vidljivo je da takvih područja nema i da se vrijednosti poklapaju.



Slika 5.41 Stvarni odziv u odnosu na modelom izračunati za model za izračun udjela mangana u metalu zavara

Matematički model s kodiranim vrijednostima glasi:

$$Udio\ mangana = (1{,}26 - 0{,}029A + 0{,}015B + 4{,}596 \times 10^{-3}\,C + 2{,}383 \times 10^{-3}\,AB - 8{,}806 \times 10^{-4}\,AC + 3{,}362 \times 10^{-3}\,BC + 0{,}14A^2 - 0{,}023B^2)^2 \quad (18)$$

Iz kodiranog matematičkog modela moguće je izvesti 2 krajnja matematička modela, ovisno o kategorijskom faktoru načinu prijenosa metala.

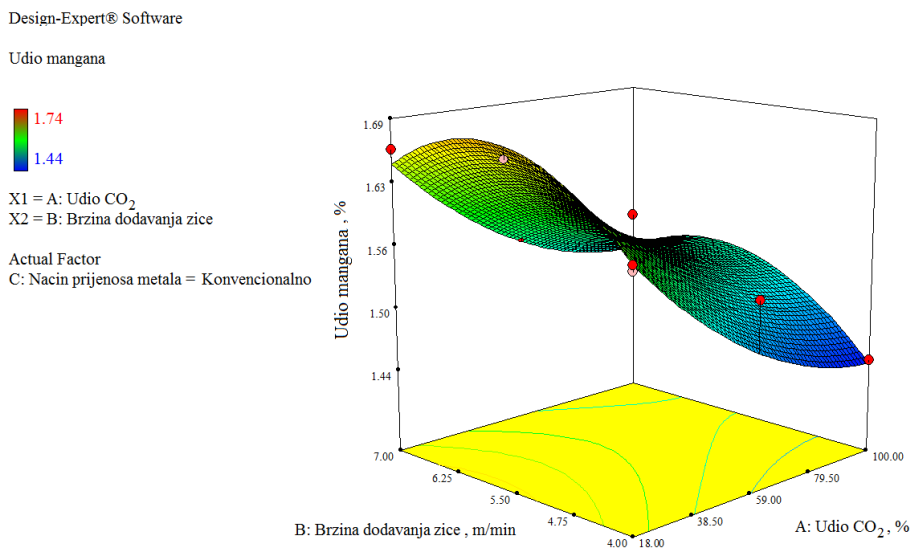
Krajnji matematički model za izračun udjela mangana u metalu zavara konvencionalnim MAG zavarivanjem (kratkim spojevima i prijelaznim lukom) s pravim vrijednostima glasi:

$$Udio\ mangana = (0{,}98684 - 1{,}86127 \times 10^{-3}A + 0{,}11722B + 3{,}87546 \times 10^{-5}\,AB + 8{,}05176 \times 10^{-6}\,A^2 - 0{,}010174B^2)^2 \quad (19)$$

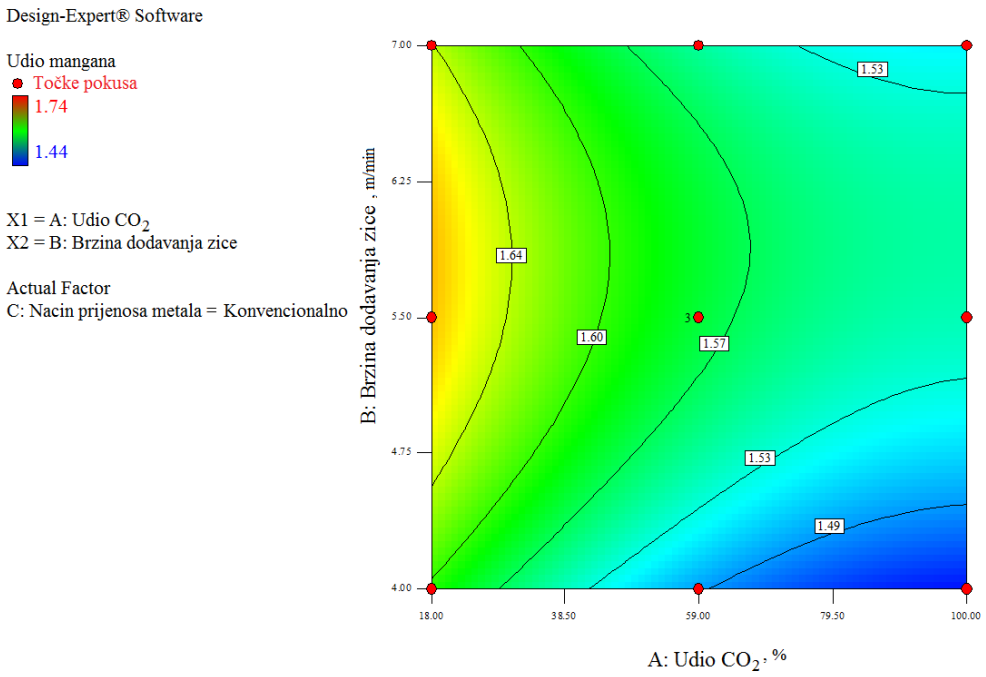
gdje je:

A – udio CO_2, %; B – brzina dodavanja žice, m/min

3D grafički prikaz odzivne površine udjela mangana u metalu zavara za slučaj zavarivanja kratkim spojevima dan je na slici 5.42, dok je konturni prikaz dan na slici 5.43.



Slika 5.42 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela mangana u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju



Slika 5.43 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela mangana u metalu zavara pri konvencionalnom MAG zavarivanju

Prema odzivnoj površini prikazanoj na slici 5.43 moguće je zaključiti da je najveće vrijednosti udjela mangana u metalu zavara moguće postići kod zavarivanja s brzinom žice od 5,5 m/min i kod korištenja zaštitnog plina s 18 % CO_2. Za razliku od udjela silicija koji je pokazivao trend pada vrijednosti udjela za brzinu žice od 5,5 m/min, udio mangana postiže maksimalne vrijednosti upravo za te parametre zavarivanja. Nadalje, povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu dolazi do očekivanog pada udjela mangana zbog sve veće količine oksidacijskih procesa tijekom zavarivanja.

Krajnji matematički model za izračun udjela mangana u metalu zavara CBT MAG zavarivanjem s pravim vrijednostima glasi:

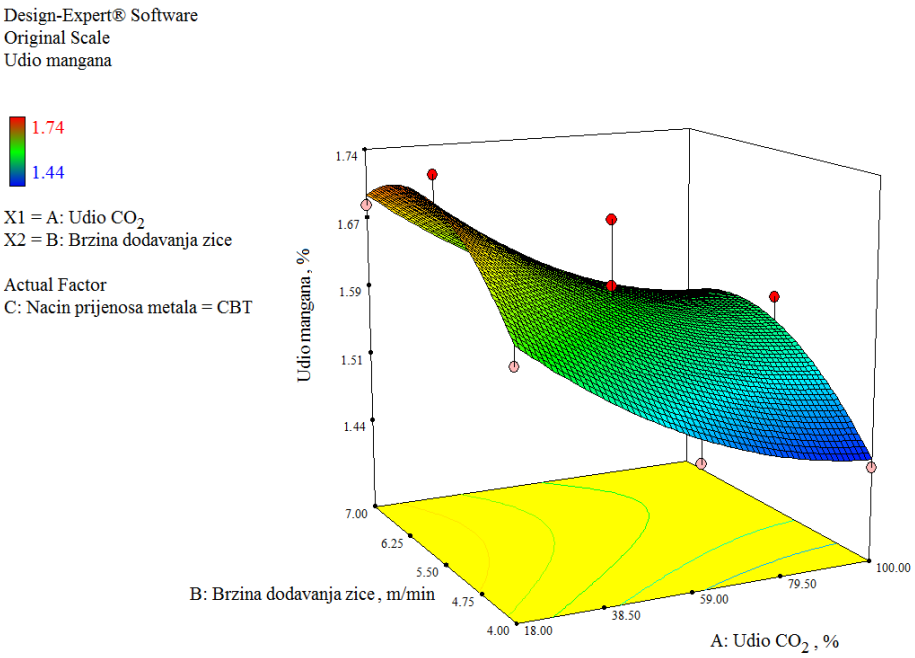
$$\textit{Udio mangana} = (0{,}97392 - 1{,}90423 \times 10^{-3}A + 0{,}12171B + 3{,}87546 \times 10^{-5}\,AB + 8{,}05176 \times 10^{-6}\,A^2 - 0{,}010174B^2)^2 \quad (20)$$

gdje je:

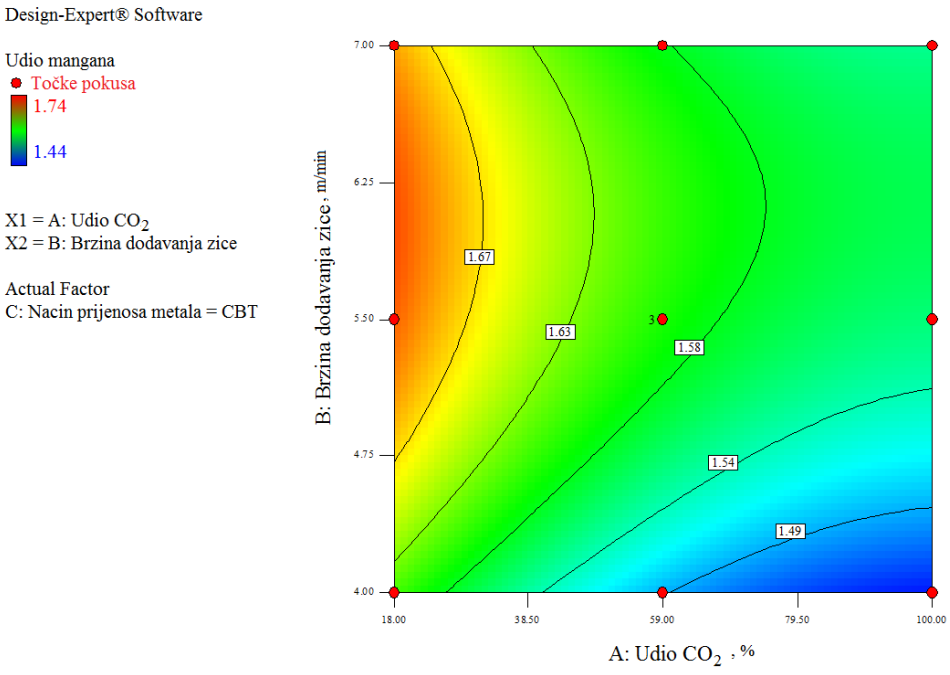
A – udio CO_2, %

B – brzina dodavanja žice, m/min

3D grafički prikaz odzivne površine udjela mangana u metalu zavara za slučaj zavarivanja prijenosa metala kratkim spojevima dan je na slici 5.44, dok je konturni prikaz dan na slici 5.45.



Slika 5.44 3D prikaz odzivne površine za matematički model izračuna udjela mangana u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju



Slika 5.45 Konturni prikaz matematičkog modela za izračun udjela mangana u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju

Slika 5.44 prikazuje odzivnu površinu udjela mangana u metalu zavara za slučaj CBT MAG zavarivanja. Sa slike je vidljivo da je navedena odzivna površina vrlo slična onoj kod konvencionalnog MAG zavarivanja. Takvo saznanje upućuje na činjenicu da faktor načina prijenosa metala nema značajan utjecaj na udio mangana u metalu zavara što je analizom varijance modela i dokazano.

Na osnovu dobivenog matematičkog modela (20) Monte Carlo metodom simulirana je funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Mn_{max} koja predstavlja stanje pokusa s najvećim udjelom mangana u metalu zavara. Konačni izraz na temelju kojeg je izvršena Monte Carlo simulacija dan je:

$$Mn_{maxi} = (0{,}97392 - 1{,}90423 \times 10^{-3}\delta CO_i + 0{,}12171\delta BZ_i + 3{,}87546 \times 10^{-5}\delta CO_i\, \delta BZ_i + 8{,}05176 \times 10^{-6}\, \delta CO_i^2 - 0{,}010174\, \delta BZ_i^2)^2 \quad (21)$$

gdje je:

Mn_{maxi} – izlazna veličina, %

δCO_i – udio CO_2 u zaštitnom plinu, %

δBZ_i – brzina dodavanja žice, m/min

Ulazne veličine x_i definirane su funkcijama gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici 5.20.

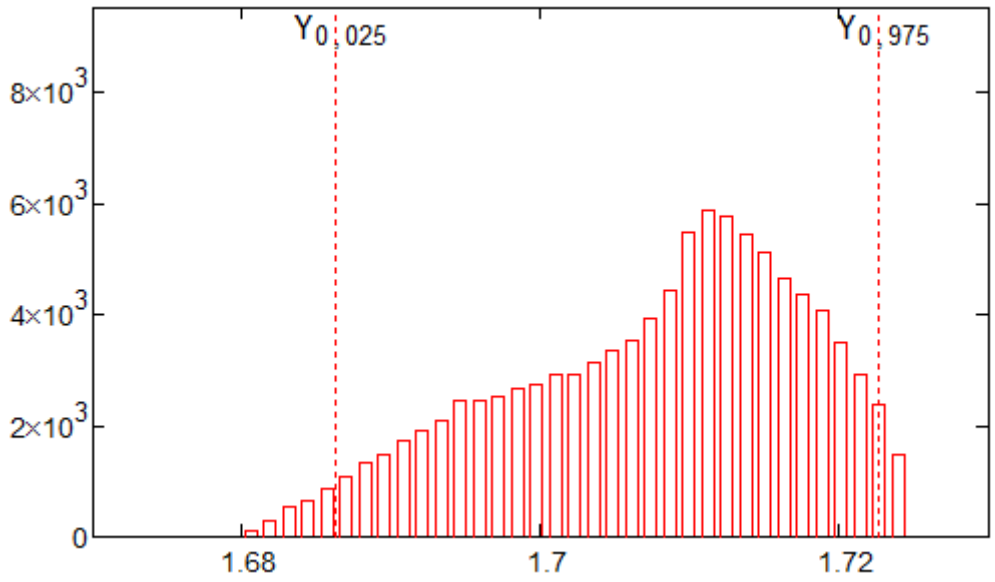
Tablica 5.20 Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine Mn_{max}

Ulazna veličina, x_i	**Funkcija gustoće vjerojatnosti, $g(x_i)$**
Udio CO_2 u zaštitnom plinu, δCO_i	Pravokutna razdioba (M, 16 %, 20 %)
Brzina dodavanje žice, δBZ_i	Pravokutna razdioba (M, 4,95 m/min, 6,05 m/min)

Rasponi razdioba ulaznih veličina definirani su na isti način kao i u prethodnom slučaju – MC simulacija Si_{max}. Budući da je u ovom slučaju riječ o brzini dodavanja žice koja je na 25 % maksimalne brzine dodavača žice, dopušteno odstupanje računa se kao 10 % od odabrane vrijednosti brzine dodavanja žice što rezultira odstupanjem od 0,55 m/min.

Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(Mn_{max})$ dobivena je uz M = 100000 simulacija. Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine Mn_{max} iznosi 0,01 %. Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine Mn_{max} prikazana je na slici 5.46. Konvolucijom razdioba ulaznih veličina definiranih u tablici 5.20 nije ostvarena normalna razdioba. Izlazna veličina nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 1{,}69\ \%;\ Y_{0,975} = 1{,}72\ \%) \text{ uz } P = 95\ \%.$$



Slika 5.46 Funkcija gustoće vjerojatnosti izlazne veličine $g(Mn_{max})$

5.9. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom zavarenog spoja

Kemijski sastav metala zavara definiran je kemijskim reakcijama koje se odvijaju na povišenim temperaturama te je kao takav podložan utjecajima dodatnog materijala (npr. kombinacija dodatnog materijala, troske i zaštitnog plina), kemijskog sastava osnovnog materijala kao i parametara zavarivanja. Čak i najmanje promjene u kemijskom sastavu npr. zaštitnog plina mogu odigrati značajnu ulogu u konačnom kemijskom sastavu metala zavara. Prema [18] postoji 2 faze u reakcijama koje se odvijaju u talini metala zavara. U prvoj fazi, koja se odvija u području gdje je temperatura oko 2000°C, dolazi do razlaganja kisika. Budući da silicij i mangan nemaju dezoksidacijsko djelovanje na tako visokim temperaturama u ovoj fazi ne dolazi do formiranja oksida. Hlađenjem taline metala zavara prelazi se do druge faze u kojoj silicij i mangan počinju djelovati dezoksidacijski tvoreći s kisikom mikro čestice odnosno uključke.

Silicij i mangan predstavljaju jake dezoksidante koji zbog toga (a i zbog činjenice da je kisik slabo topiv u željezu te se iz tog razloga lakše veže uz druge elemente formirajući okside) reagiraju s kisikom tvoreći oksidne uključke zbog čega dolazi do smanjenja njihovih udjela u metalu zavara. Oksidacijske reakcije u talini metala zavara koje uzrokuju gubitke spomenutih elemenata odvijaju se prema sljedećim izrazima:

$$Si + 2\,[O] \rightarrow SiO_2 \tag{22}$$

$$2\,Mn + 2\,[O] \rightarrow 2MnO \tag{23}$$

Osim navedenih kemijskih reakcija, uzrok gubitka silicija je moguće objasniti i prisutnošću ugljičnog monoksida na granici između zaštitnog plina i metala zavara što potiče nastajanje SiO prema izrazu:

$$SiO_2 + CO \rightarrow SiO + CO_2 \tag{24}$$

Rezultat toga je pojava troske na površini zavarenog spoja. Dodatno do daljnjeg gubitka mangana moguće dolazi zbog njegovog isparavanja koje se odvija radi visoke temperature i vrijednosti tlaka isparavanja.

Analizom dobivenih rezultata kemijskog sastava metala zavara uočeno je da način prijenosa ima značajan utjecaj na odgaranje silicija. Uočeno je da u slučaju CBT MAG zavarivanja dolazi do većeg odgaranja silicija što potvrđuje i snimljena dinamička karakteristika. Naime, uspoređujući grafičke prikaze odnosa trajanja impulsa i kratkih spojeva (Slike 5.12 – 5.14) spram dobivenih vrijednosti kemijskog sastava (Tablica 5.14) dolazi se do zaključka da je kod CBT MAG postupka zavarivanja omjer trajanja kratkog spoja spram cijelog impulsa manji nego kod konvencionalnog MAG zavarivanja. Analogno tome, trajanje električnog luka je dulje što uzrokuje više dezoksidacijskih procesa u talini metala zavara rezultirajući smanjenjem udjela legirnog elementa silicija. S obzirom da do gubitka mangana dolazi zbog dezoksidacijskih procesa i zbog njegovog tlaka isparavanja, način prijenosa metala nema značajan utjecaj.

Za razliku od silicija i mangana, udio ugljika ostaje relativno nepromijenjen kroz sva stanja pokusa. Takva stabilnost udjela ugljika u metalu zavara povezuje se s termodinamičkim silama koje potiču procese oksidacije. Zbog svog slabijeg afiniteta prema kisiku spram drugih legirnih elemenata, ugljik omogućuje pojedinim drugim elementima češće i dulje reakcije s kisikom što posljedično rezultira smanjenjem reakcije ugljika i kisika u metalu zavara.

5.10. Prikaz rezultata dobivenih kemijskom analizom uključaka u metalu zavara

Rezultati dobiveni kemijskom analizom uključaka u metalu zavara dani su u tablici 5.21. Ispitivanja su provedena pomoću EDS detektora kojim je utvrđeno postojanje globularnih (koji čine otprilike 95 % ukupnih uočenih uključaka) i izduženih uključaka (otprilike 5 %). Za mikroanalizu kemijskog sastava uključaka korištena je točkasta analiza.

Tablica 5.21 Kemijska analiza uključaka u metalu zavara

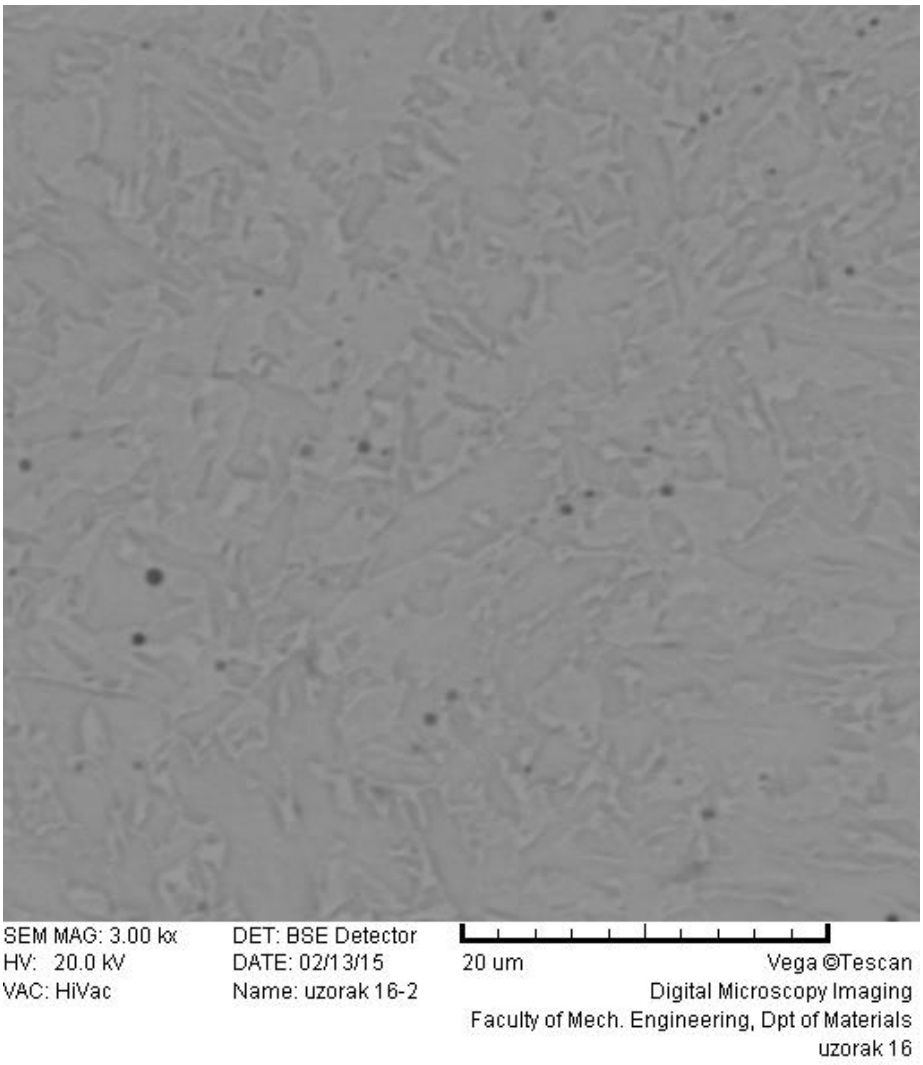
Uzorak - mjerenje	Promjer uključaka, µm	Kemijski sastav (maseni udio), %								
		C	O	Al	Si	S	Cr	Ti	Mn	Fe
1-1	**4,7**	6,56	37,25	13,37	13,98	-	-	-	-	19,5
1-2	1,3	7,45	20,27	2,62	6,84	0,54	-	0,54	13,15	48,59
1-3	0,8	8,15	9,37	1,11	3,56	0,53	-	0,17	6,38	70,73
1-4	0,79	7,61	6,69	0,47	2,12	3,18	0,85	0,08	8,32	70,67
1-5	0,52	12,38	3,57	0,07	1,18	4,05	-	0,14	8,92	69,69
2-1	0,78	8,17	3,75	0,26	1,79	0,46	0,63	0,07	3,22	81,66
2-2	0,97	8,24	6,03	0,14	2,61	0,40	0,43	-	5,41	76,74
2-3	0,85	8,17	6,70	0,26	2,45	0,42	0,57	-	3,78	77,66
3-1	0,67	12,71	1,19	-	0,67	-	0,41	-	1,77	83,25
4-1	0,69	4,72	9,17	0,65	3,42	0,69	0,59	0,13	5,67	74,91
4-2	0,48	7,66	12,59	0,90	4,69	0,72	0,42	0,31	7,39	65,32
5-1	0,88	12,76	14,68	0,97	5,47	0,40	0,49	0,11	11,58	53,54
5-2	1,08	11,02	2,98	0,18	0,66	-	0,53	0,10	1,67	82,86
5-3	0,62	14,00	6,63	0,20	2,23	0,75	0,41	-	5,46	70,32
6-1	1,15	6,79	12,72	0,33	4,85	0,61	-	0,23	8,66	65,82
6-2	0,99	6,47	6,81	0,16	2,95	4,64	0,57	-	10,19	68,21
6-3	0,78	6,16	12,70	0,33	4,47	2,84	0,51	0,17	9,98	62,85
6-4	0,87	7,69	5,96	0,12	2,00	0,96	0,42	-	4,82	78,04
7-1	0,64	9,04	17,84	3,41	5,17	0,44	0,50	0,31	8,43	54,86
8-1	0,81	10,95	4,02	0,09	1,14	7,78	0,37	-	15,26	60,39
8-2	0,7	8,94	9,54	0,17	3,76	0,93	0,43	-	7,06	69,18
8-3	0,59	8,85	2,86	-	1,43	-	0,53	-	2,33	84,00
8-4	0,62	19,96	7,82	0,06	3,16	0,68	0,50	0,16	5,23	62,43
9-1	2,38	9,02	28,81	0,69	10,14	1,02	-	0,80	22,84	26,67
9-2	0,71	24,52	4,84	0,11	1,56	0,27	0,38	0,01	2,49	65,82
9-3	0,55	21,60	5,70	0,24	1,77	0,32	0,52	-	2,55	66,97
10-1	0,68	7,33	9,47	0,25	3,71	-	-	0,12	6,90	70,80
10-2	**0,35**	5,67	7,91	0,28	3,02	0,52	-	0,31	5,97	76,32
10-3	1,08	11,28	13,66	0,52	6,07	-	-	-	10,90	57,57
10-4	0,51	6,22	7,25	-	3,30	-	0,57	-	5,57	77,09
11-1	1,04	7,37	11,16	0,60	3,76	0,56	-	0,06	5,47	71,01
11-2	0,58	7,92	10,66	0,48	4,89	-	-	0,23	8,70	67,11

Nastavak tablice 5.21.

Uzorak - mjerenje	Promjer uključaka, µm	Kemijski sastav (maseni udio), %								
		C	O	Al	Si	S	Cr	Ti	Mn	Fe
12-1	0,57	6,48	13,44	0,36	4,69	0,49	0,49	0,17	7,43	66,46
13-1	0,97	9,07	19,42	0,25	7,54	0,70	0,43	0,32	15,24	47,04
13-2	0,79	6,55	9,39	-	4,11	0,79	0,54	0,01	6,49	72,14
13-3	1,14	6,41	10,45	-	4,74	0,85	-	0,09	9,46	67,98
13-4	1,03	5,79	12,57	0,15	5,20	0,40	0,50	0,10	8,29	66,99
14-1	0,91	6,00	13,82	0,67	5,19	0,50	-	0,27	8,69	64,86
14-2	0,91	5,84	18,32	0,94	6,84	0,51	0,42	0,29	12,71	54,14
15-1	1,14	3,51	17,56	1,13	7,04	0,49	-	0,49	11,02	58,77
15-2	0,58	4,86	11,29	0,74	4,41	-	-	0,29	7,17	69,81
15-3	0,46	5,03	6,76	0,70	3,18	0,59	-	0,18	6,45	77,10
16-1	1,99	5,71	26,99	0,81	11,19	0,84	-	0,12	17,45	36,88
16-2	1,48	12,66	9,26	0,12	15,91	-	-	-	1,20	60,86
16-3	0,79	7,15	12,32	0,19	4,16	1,72	-	0,12	11,40	62,94
16-4	0,66	6,15	13,89	0,09	4,15	0,46	-	-	7,55	67,71
16-5	0,93	7,17	18,97	0,57	7,01	0,84	-	0,15	12,16	53,14
16-6	0,63	5,07	13,83	0,57	4,87	1,27	0,48	0,13	9,51	64,26
17-1	0,74	6,29	8,88	0,22	4,40	-	-	-	9,22	70,99
17-2	0,41	5,16	6,62	-	3,48	0,43	0,47	-	6,03	77,81
17-3	0,39	5,02	5,67	-	2,77	-	-	-	3,64	82,19
18-1	0,88	6,09	15,05	0,33	6,27	0,71	0,69	-	10,36	60,50
18-2	0,85	6,48	9,95	-	4,81	-	-	-	5,35	73,41
18-3	0,91	7,82	6,54	-	2,36	-	-	-	3,43	79,85
19-1	1,26	8,79	19,26	1,27	6,45	-	-	0,18	9,00	53,81
19-2	0,97	5,74	18,94	0,63	7,40	0,66	-	-	12,36	54,28
20-1	1,6	7,12	23,45	0,92	9,05	0,34	-	0,17	15,49	43,45
20-2	0,69	7,50	8,84	-	4,80	0,50	-	-	11,61	66,75
20-3	0,51	6,67	8,54	-	4,03	0,45	0,48	-	7,33	72,49
21-1	0,82	8,98	18,76	0,51	7,01	0,46	-	0,47	14,70	49,11
21-2	1,18	10,92	20,70	0,10	6,87	-	-	0,17	13,46	46,13
21-3	1,01	9,29	16,24	0,33	5,77	0,90	-	-	9,02	58,46
22-1	1,04	5,70	17,56	0,34	6,63	0,62	-	0,29	10,75	58,11
22-2	0,78	10,68	14,49	0,50	6,29	-	-	0,28	19,12	46,77
22-3	1,05	7,99	9,42	0,27	3,35	0,55	-	0,10	6,77	71,56
22-4	0,88	9,01	12,25	0,26	5,73	0,72	0,40	-	13,12	58,51
22-5	0,68	9,13	8,27	-	3,20	0,54	0,52	-	5,90	72,45

S obzirom da EDS detektor mjeri kemijski sastav po dubini uzorka, moguće je da, s obzirom na male dimenzije uključaka, dođe do kontaminacije rezultata s elementima iz veće dubine (ispod uključka). Posljedično, dolazi se do rezultata mjerenja koji u većem omjeru

sadrže kemijske elemente koji su sastavni dio osnovnog materijala. Taj se podatak o tehnici rada EDS detektora pri svakoj točki mjerenja točkastom analizom mora uzeti u obzir, jer se uslijed velike osjetljivosti mjernog uređaja, a manje veličine analiziranog uključka može zahvatiti i osnovni materijal [46]. Slika 5.47 prikazuje mikrostrukturu zavara stanja pokusa 16 snimljenu na SEM mikroskopu.



Slika 5.47 Mikrostruktura uzorka broj 16 snimljena na SEM mikroskopu

5.11. Analiza rezultata dobivenih kemijskom analizom uključaka u metalu zavara

Pregledom dobivenih rezultata prikazanih u tablici 5.21 vidljivo je da su analizirani uključci bogati kisikom, silicijem, manganom i aluminijem te oni s nešto manjim udjelima titana i sumpora. Uzimajući u obzir da su elementi ugljik, željezo i krom sastavni kemijski

elementi osnovnog i dodatnog materijala, analizirani uključci karakteriziraju se kao kompleksni oksidi silicija, mangana i aluminija s manjim koncentracijama titana i sumpora.

Među velikim brojem dezoksidanata, aluminij predstavlja najčešće korišteni u svrhu dezoksidacije čeličnih proizvoda. Iz tog razloga, jednostavni oksid Al_2O_3 se vrlo često uočava u različitim čelicima no kao samostalni oksid ne predstavlja potencijalno mjesto nukleacije acikularnog ferita. No, dodavanjem mangana nastaje kompleksniji mangan-oksid kao npr. $MnO\text{-}Al_2O_3$ koji prema [64] predstavlja potencijalno mjesto za nukleaciju acikularnog ferita.

Za razliku od aluminija, titanovi oksidi u različitim sastavima formiraju povoljne uvjete za nukleaciju acikularnog ferita i to iz sljedećih razloga: uključci s većim udjelom titana ubrzavaju kinetiku formiranja acikularnog ferita u metalu zavara, također spomenut uključci apsorbiraju atome mangana iz svoje okoline formirajući na taj način acikularni ferit. Iz opisanog se može zaključiti da složeni procesi dezoksidacije uz pomoć titana rezultiraju njihovim oksidima koji pak stvaraju povoljne uvjete za formiranje acikularnog ferita.

Osim jednostavnih oksida i neki složeni oksidi imaju povoljan utjecaj na formiranje acikularnog ferita. Aluminij-mangan silikati, koji su uočeni tijekom ispitivanja, zbog najveće razlike u toplinskoj ekspanziji spram austenitne faze (a samim time i najvećih toplinskih naprezanja) predstavljaju područja pogodna za nukleaciju acikularnog ferita.

Uz pojavu oksida kao uključaka, u ispitanim zavarenim spojevima uočeni su i MnS sulfidi koji direktno ne predstavljaju aktivne lokacije za nukleaciju acikularnog ferita. Dva su razloga tome: MnS nekoherentno je organiziran unutar zrna austenita tj. dolazi do pojave naprezanja između MnS i zrna austenita; zbog najmanje razlike u koeficijentu toplinske ekspanzije spram austenita ne predstavljaju pogodne lokacije za nukleaciju acikularnog ferita. No, zbog područja oko MnS koje je osiromašeno manganom indirektno je moguće djelovati pozitivno na nukleaciju acikularnog ferita.

Zbog istovremenog povoljnog djelovanja nekoliko faktora na nukleaciju acikularnog ferita, kompleksni oksi-sulfidi i multifazni uključci, kakvi su uočeni i u analiziranim uzorcima, predstavljaju najčešća područja formiranja acikularnog ferita. Faktori koji povoljno utječu na formiranje acikularnog ferita su: što manje naprezanje uslijed pravilne orijentacije uključaka spram austenitnog ili feritnog zrna, pozitivno djelovanje toplinskih naprezanja uslijed različitih koeficijenata toplinske ekspanzije uključaka spram austenitne matrice koja ih okružuje, nastanak zone smanjenog udjela mangana u matrici koja sadrži MnS. S obzirom da

kod jednostavnih uključaka djeluje po jedan od utjecajnih čimbenika, logično je za zaključiti da su kompleksniji uključci aktivnija mjesta za nukleaciju acikularnog ferita.

Prema [15] središte uključaka koje nastaje u primarnoj fazi dezoksidacije prvenstveno se sastoji od kombinacije oksida titana, mangana, silicija i aluminija u različitim omjerima formirajući vrlo složeni oksidni uključak. Točan kemijski sastav dezoksidacijskih produkata (maseni udio pojedinog elementa) uvelike ovisi o aktivnosti aluminija, titana, silicija, mangana i kisika u metalu zavara te stoga može varirati u širim rasponima kao što je uočeno i u ispitanim uzorcima. Iz tog razloga moguće je uočiti uključke relativno istog promjera kod kojih postoji razlika u kemijskom sastavu. Oko oksidnog središta nemetalnih uključaka formira se omotač na bazi MnS na što upućuju rezultati kemijskog sastava uključaka koji u svom sastavu sadrže mangan i sumpor. Osim MnS, moguće je da omotač sadrži i TiN što nije uočeno u ispitanim uključcima. Formiranje omotača najvjerojatnije nastaje nakon završenog procesa dezoksidacije metala zavara – tijekom procesa solidifikacije.

Što se tiče raspona promjera uočenih uključaka on je varirao između 0,35 i 4,7 μm uz prosječni promjer uključka od 0,8 μm. Kroz analizu dobivenih vrijednosti kemijskog sastava zaključeno je da je isti u korelaciji s izmjerenim vrijednostima promjera uključaka. Naime, s povećanjem promjera uključaka, dolazi i do povećanja udjela dezoksidanata u uključcima. Potrebno je isto tako napomenuti da se ne može precizno aproksimirati pravac korelacije između tih dviju vrijednosti zbog relativnih odstupanja u izmjerenim vrijednostima kemijskog sastava koje su rezultat ranije spomenute aktivnosti dezoksidanata tijekom procesa dezoksidacije metala zavara. Gledajući razlike u promjerima uključaka spram načina prijenosa metala, uočeno je da su kod CBT MAG zavarivanja promjeri uključaka u većini slučajeva (u 7 slučajeva, spram 4 slučaja kod konvencionalnog MAG zavarivanja) za iste parametre zavarivanja postizali veće vrijednosti. Budući da je u prethodnoj analizi udjela acikularnog ferita uočen njegov veći udio pri konvencionalnom MAG zavarivanju dolazi se do zaključka da povećanjem promjera nemetalnih uključaka ne dolazi i do proporcionalnog povećanja udjela acikularnog ferita.

5.12. Prikaz rezultata mjerenja mikrotvrdoće HV 0,2 zavarenog spoja

Mjerenje mikrotvrdoće HV 0,2 izvedeno je prema planu opisanom u poglavlju 4.9. Na svakom uzorku je prema rasteru prikazanom na slici 4.13 načinjeno 15 mjerenja što sve ukupni čini 330 mjernih točaka. Tablica 5.22 prikazuje dobivene vrijednosti mjerenja mikrotvrdoće HV 0,2 za sve mjerne točke.

Tablica 5.22 Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za sve mjerne točke

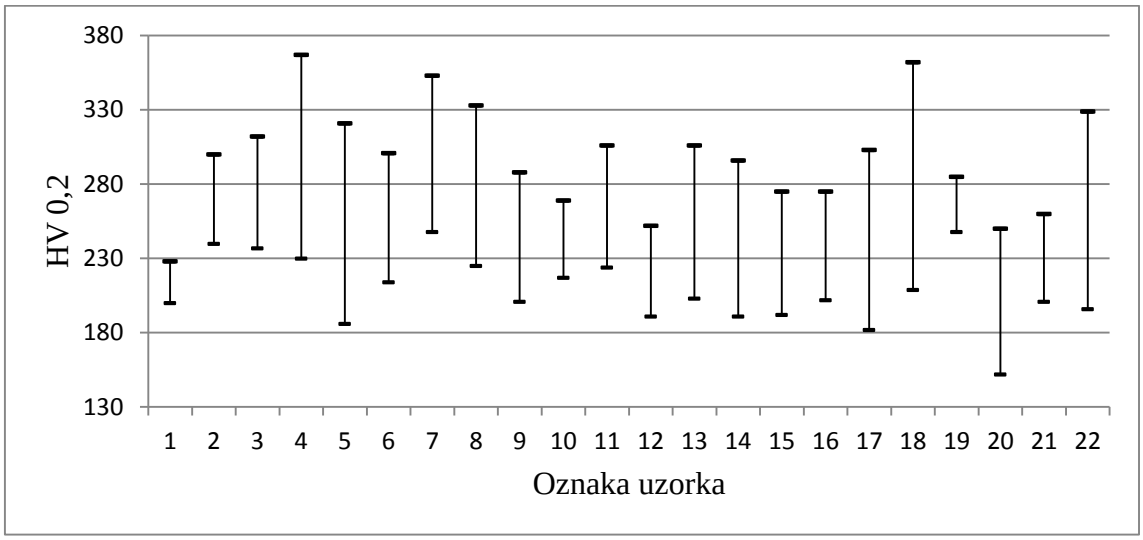
Uz.	Sitnozrnati ZUT						Grubozrnati ZUT						Metal zavara					
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
1	223	208	222	200	228	**216**	156	203	257	252	261	**226**	288	222	288	231	274	**261**
2	261	300	240	243	286	**266**	298	244	257	244	323	**273**	325	323	365	286	308	**321**
3	312	275	265	291	237	**276**	296	228	203	227	262	**243**	303	381	308	277	323	**318**
4	243	241	230	260	367	**268**	288	230	306	273	315	**282**	288	223	296	224	261	**258**
5	321	320	186	243	268	**268**	337	224	215	258	288	**264**	240	323	325	301	353	**308**
6	301	221	254	238	214	**246**	246	249	198	228	258	**236**	301	347	271	258	228	**281**
7	319	248	353	275	285	**296**	361	317	267	215	234	**279**	399	258	294	341	257	**310**
8	252	333	325	245	225	**276**	306	227	288	303	265	**278**	280	252	343	341	220	**287**
9	201	210	222	288	224	**229**	245	217	248	280	245	**247**	238	305	224	221	286	**255**
10	254	269	240	217	269	**250**	248	220	202	260	216	**229**	274	267	238	275	341	**279**

Nastavak tablice 5.22.

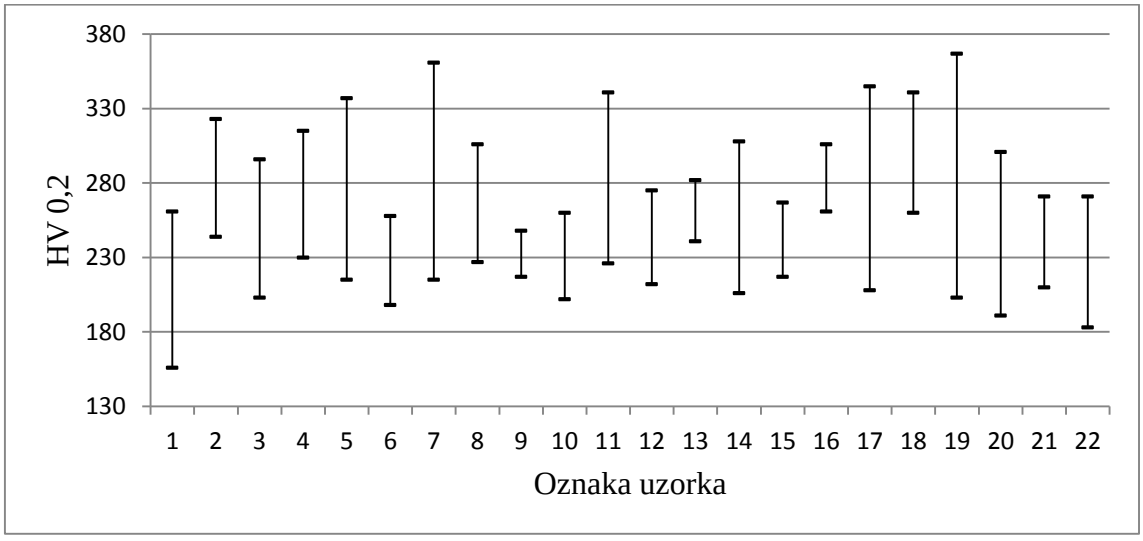
Uz.	Sitnozrnati ZUT						Grubozrnati ZUT						Metal zavara					
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	1	2	3	4	5	$\bar{x}$
11	224	306	271	264	244	**262**	341	226	244	315	284	**282**	298	305	294	356	300	**311**
12	239	252	191	234	223	**228**	274	267	264	212	275	**258**	347	232	286	315	300	**296**
13	232	306	203	203	245	**238**	282	265	244	252	241	**257**	248	306	303	246	248	**270**
14	296	203	191	237	257	**237**	308	256	206	244	256	**254**	303	245	218	212	260	**248**
15	275	192	218	196	198	**216**	217	267	245	217	221	**233**	234	252	264	343	275	**274**
16	226	275	202	233	212	**230**	261	253	238	303	306	**272**	264	238	256	329	291	**276**
17	289	303	182	244	252	**254**	345	253	208	278	234	**264**	317	358	243	325	285	**306**
18	362	233	209	228	319	**270**	341	300	341	260	257	**300**	257	232	223	246	379	**267**
19	271	248	254	285	257	**263**	367	203	337	212	305	**285**	220	268	213	289	351	**268**
20	152	188	220	246	250	**211**	191	257	195	200	301	**229**	224	289	319	383	333	**310**
21	243	221	201	260	245	**234**	271	269	271	238	210	**252**	343	300	345	267	362	**323**
22	196	278	329	234	217	**251**	183	245	200	271	246	**229**	339	198	243	284	337	**280**

5.13. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem mikrotvrdoće HV 0,2 zavarenog spoja

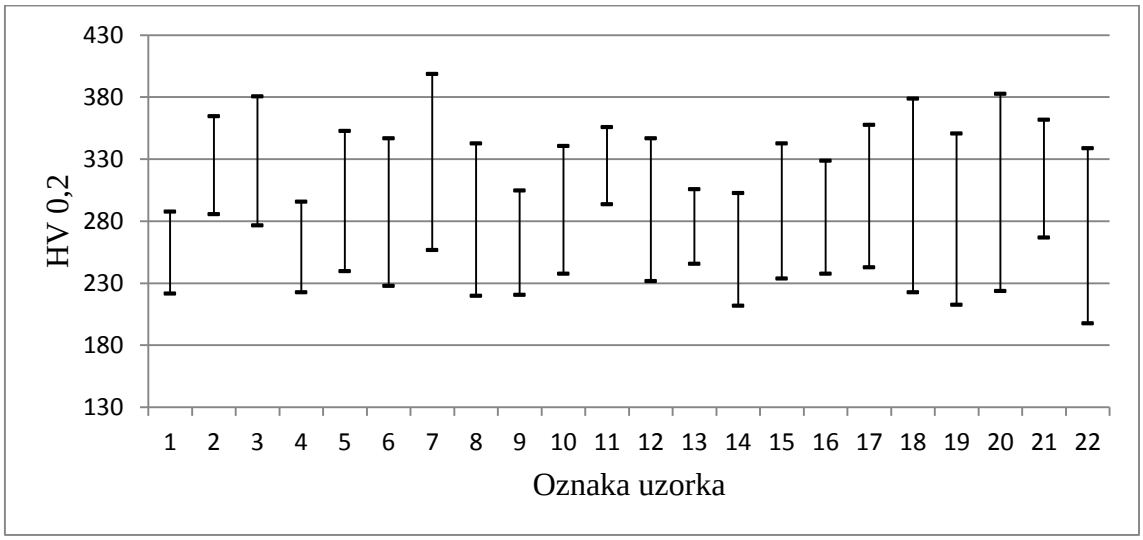
Nakon izvršenog mjerenja mikrotvrdoća HV 0,2, podaci su obrađeni na način da se dobije grafički pregled nad rasipanjem dobivenih vrijednosti za pojedino stanje pokusa i područje mjerenja (sitnozrnati ZUT – SZZUT, grubozrnati ZUT – GZZUT i metal zavara). Dobiveni grafički prikazi dani su na slikama 5.48 – 5.50.



Slika 5.48 Mikrotvrdoća HV 0,2 u području sitnozrnatog ZUT-a

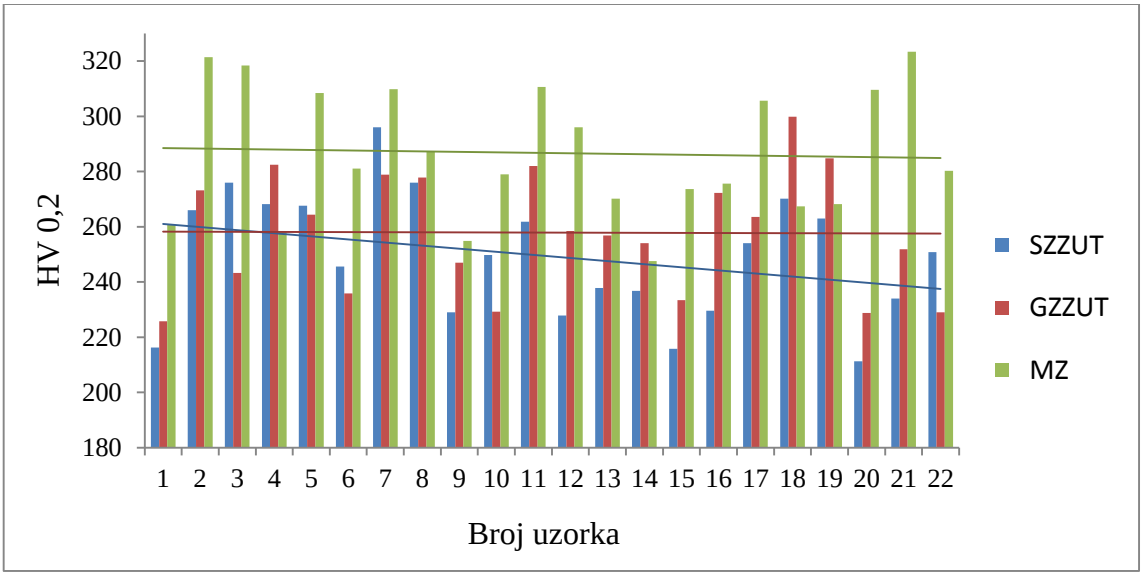


Slika 5.49 Mikrotvrdoća HV 0,2 u području grubozrnatog ZUT-a



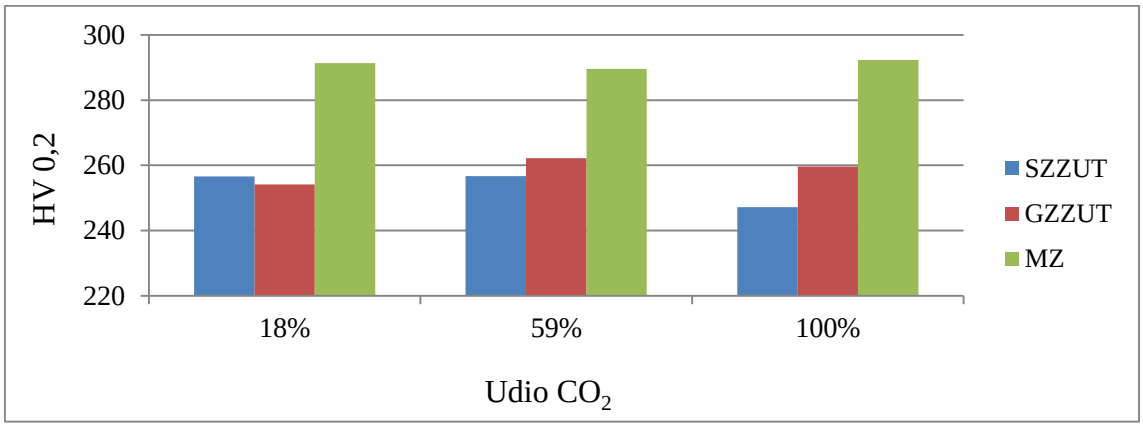
Slika 5.50 Mikrotvrdoća HV 0,2 u području metala zavara

S grafova prikazanih na slikama 5.48 – 5.50 moguće je vidjeti gotovo sinusoidni trend promjena dobivenih vrijednosti mikrotvrdoće u svim područjima mjerenja. Gledajući sve rezultate ukupno može se reći da se podaci bitno ne razlikuju ovisno o variranim parametrima unutar eksperimentalnog prostora tj. da unos topline, način prijenosa metala i vrsta zaštitnog plina nemaju značajan utjecaj na vrijednosti mikrotvrdoća u zonama zavarenog spoja. Toj tvrdnji u prilog ide i slika 5.51 koja prikazuje prosječne vrijednosti izmjerenih vrijednosti mikrotvrdoće za sva stanja pokusa.

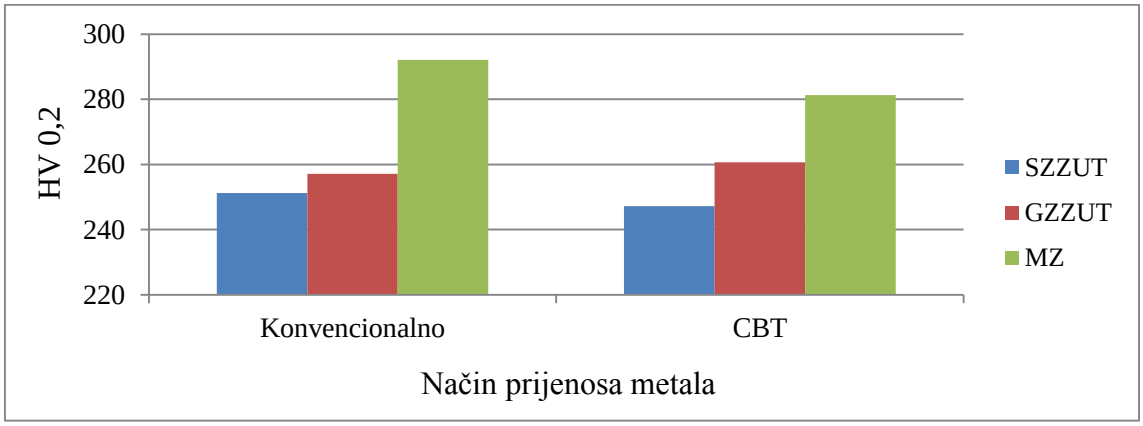


Slika 5.51 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoća za sva stanja pokusa i sva područja mjerenja

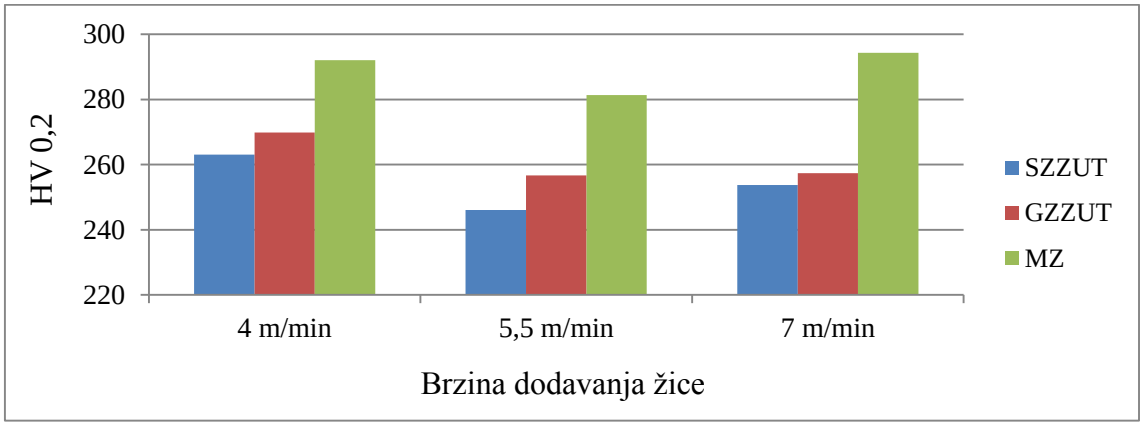
Slike 5.52 – 5.54 prikazuju grafički prikaz prosječnih vrijednosti izmjerenih mikrotvrdoća HV 0,2 za različite varirane parametre.



Slika 5.52 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za različite zaštitne plinove



Slika 5.53 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za različite načine prijenosa metala



Slika 5.54 Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 za različite brzine dodavanja žice

Prema provedenim ispitivanjima i izmjerenim vrijednostima mikrotvrdoće za sva stanja pokusa i za sva područja mjerenja (sitnozrnata zona utjecaja topline, grubozrnata zona utjecaja topline, metal zavara) može se doći do zaključka da varirani parametri u ovom eksperimentalnom prostoru nemaju značajan utjecaj na spomenuto mehaničko svojstvo. Moguće objašnjenje leži u činjenici da je riječ o čeliku dobre zavarljivosti što za posljedicu ima ujednačenu kvalitetu zavarenog spoja. Uočen je trend pada mikrotvrdoće od metala zavara, preko grubozrnate zone utjecaja topline do sitnozrnate zone utjecaja topline što je u dobroj korelaciji s podacima iz literature [14].

Također s obzirom da je riječ o mjerenju mikrotvrdoće, moguće je da su tijekom mjerenja dijelom bili pogođeni različiti mikrokonstituenti koji imaju razlike u tvrdoćama što je u konačnici utjecalo na rasipanje i prosječnu izmjerenu vrijednost za pojedino stanje pokusa. Iz tog razloga dobiveni rezultati su međusobno uspoređeni između izvedenih stanja pokusa.

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog istraživanja opisanog u eksperimentalnom dijelu rada potvrđene su sljedeće postavljene hipoteze:

1. *Variranjem parametara zavarivanja kod CBT načina prijenosa metala pri MAG zavarivanju čelika API 5L X80 moguće je utjecati na gubitak legirnih elemenata i vrstu mikrokonstituenata u zavarenom spoju.*

   Navedena hipoteza potvrđena je na temelju rezultata kemijske analize metala zavara i oksidnih uključaka u metalu zavara kao i mikrostrukturne analize zavarenog spoja. Naime, prema dobivenim podacima uočeno je da način prijenosa metala ima značajan utjecaj na udjele acikularnog ferita i silicija, dok na udio mangana način prijenosa metala nema značajan utjecaj. Značajnost utjecaja načina prijenosa metala na udio acikularnog ferita očituje se u činjenici da kod CBT MAG zavarivanja nastaje mikrostruktura s manjim udjelom acikularnog ferita. Razlog većem udjelu acikularnog ferita kod konvencionalnog MAG zavarivanja spram CBT MAG zavarivanja leži u vrlo značajnom čimbeniku koji potiče formiranje acikularnog ferita – koeficijentu toplinskog naprezanja. Naime, zbog manjeg unosa topline CBT MAG zavarivanjem dolazi i do manjih toplinskih naprezanja uključaka spram austenita koja u ovom slučaju ne pogoduju nastanku acikularnog ferita. Osim značajnog utjecaja načina prijenosa metala, uočen je i utjecaj udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu na udio acikularnog ferita. Povećanjem udjela CO_2 s 18 % na 100 % dolazi i do povećanja volumnog udjela nemetalnih uključaka koji potiču nastanak acikularnog ferita.

   Što se gubitka legirnih elemenata silicija i mangana tiče, variranjem parametara zavarivanja uočeni su određeni značajni utjecajni čimbenici. Kada je riječ o odgaranju silicija tijekom procesa zavarivanja, uočena je značajnost utjecaja načina prijenosa metala. Naime, tijekom CBT MAG zavarivanja dolazi do veće količine odgaranja silicija kao legirnog elementa. Obrazloženje većeg odgaranja silicija potvrđuje i snimljena dinamička karakteristika koja jasno prikazuje da je kod CBT MAG zavarivanja omjer vremena trajanja kratkog spoja spram cijelog impulsa manji nego kod konvencionalnog MAG zavarivanja. Analogno tome, vrijeme trajanja električnog luka je dulje, što je mogući uzrok većeg broja

dezoksidacijskih procesa u talini metala zavara koji u konačnici rezultiraju smanjenjem udjela legirnog elementa silicija.

Za razliku od utjecaja na gubitak silicija u metalu zavara, kod gubitka mangana značajan utjecaj imaju udio CO_2 u zaštitnoj plinskoj mješavini i brzina dodavanja žice tj. unos topline. Povećanjem udjela aktivne komponente u zaštitnom plinu kao i brzine dodavanja žice dolazi do smanjenja udjela mangana. Rezultat je to dezoksidacijskih procesa koji se odvijaju tijekom procesa zavarivanja.

Prema svemu gore navedenom može se zaključiti da je postavljena hipoteza ispravna i da je moguće variranjem parametara zavarivanja utjecati na gubitak legirnih elemenata i vrstu mikrokonstituenata u zavarenom spoju.

2. *Primjenom faktorskog plana pokusa moguće je izraditi matematički model koji opisuje utjecaj variranih parametara na kemijski sastav i mikrostrukturu zavarenog spoja čelika API 5L X80.*

Na temelju rezultata ispitivanja i provedene statističke analize izrađena su 3 matematička modela i to jedan matematički model koji opisuje utjecaj variranih parametara na udio acikularnog ferita kao mikrokonstituenta zavarenog spoja, te dva matematička modela koja opisuju utjecajnost istih variranih parametara na udjele legirnih elemenata silicija i mangana. Svi matematički modeli su prema analizi varijance ocijenjeni kao značajni te su korišteni u daljnjoj statističkoj obradi.

Kod prvog matematičkog modela, definirani su značajni faktori koji su u ovom slučaju bila sva tri varirana parametra (način prijenosa metala, udio CO_2 i brzina dodavanja žice). Izrađeni model daje predviđanje udjela acikularnog ferita u metalu zavara uz koeficijent determinacije u iznosu od 97,85% što predstavlja izuzetno dobar rezultat. Na temelju dobivenog reduciranog kubnog matematičkog modela, vidljivo je da je najveći udio acikularnog ferita moguće postići konvencionalnim MAG zavarivanjem u zaštiti 100 % CO_2 i pri brzini dodavanja žice od 7 m/min.

Druga dva matematička modela također vrlo dobro opisuju utjecaje variranih faktora na udjele legirnih elemenata silicija i mangana u metalu zavara. Reducirani kubni model koji opisuje utjecajnost faktora na udio silicija u metalu zavara predviđa maksimalni udio silicija pri konvencionalnom MAG zavarivanju u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2 i pri brzini dodavanja žice od 4 m/min uz koeficijent determinacije u iznosu od 84,09 %. Kvadratni model koji opisuje utjecajnost faktora na udio mangana u metalu zavara uz koeficijent determinacije u iznosu od 84,54 % predviđa maksimum udjela mangana u metalu zavara pri CBT MAG zavarivanju u zaštitnoj atmosferi s 18 % CO_2 i pri brzini dodavanja žice od 5,5 m/min.

Izrađeni matematički modeli potvrđuju postavljenu hipotezu 2.

3. *Monte Carlo simulacijom izrađenog modela moguće je procijeniti utjecaj varijacije ulaznih veličina na kvalitetu rezultata mjerenja kemijskog sastava i mikrostrukture zavarenog spoja.*

Kako bi se procijenio utjecaj varijacije ulaznih veličina na kvalitetu rezultata mjerenja, provedena je procjena mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja za točke koje predviđaju vrijednosti maksimalnih udjela acikularnog ferita, silicija i mangana. Procjena mjerne nesigurnosti provedena je primjenom Monte Carlo metode uz $M = 100000$ simulacija. Utvrđeno je da se maksimalni udio acikularnog ferita nalazi u intervalu od 71,59 % do 77,16 %, maksimalni udio silicija u intervalu od 0,58 % do 0,72 %, a maksimalni udio mangana u intervalu od 1,69 % do 1,72 % uz vjerojatnost $P = 95$ %. Najveći iznos mjerne nesigurnosti utvrđen je u slučaju rezultata mjerenja udjela acikularnog ferita što je direktna posljedica utjecaja ljudskog faktora. Procjenom mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja kemijskog sastava i mikrostrukture zavarenog spoja utvrđena je razina povjerenja u ostvarene rezultate.

Uz navedeno u radu je utvrđena i korelacija između odgaranja legirnog elementa silicija i dinamičke karakteristike izvora struje koja opisuje ponašanje električnog luka tijekom zavarivanja. Također su utvrđene kombinacije variranih parametara koje rezultiraju najvećim volumnim udjelima acikularnog ferita, silicija i mangana. Bitno je naglasiti da su dobivene optimalne kombinacije parametara primjenjive samo u ovom eksperimentalnom prostoru.

Prema dobivenim rezultatima i njihovim analizama, znanstveni doprinos rada očituje se u sljedećim točkama:

1. Definiran je kritični prag stabilnosti procesa kod CBT MAG zavarivanja dodatnim materijalom LNM MoNi promjera 1,2 mm u zaštitnim plinskim atmosferama 18 % CO_2 / 82 % Ar, 59 % CO_2 / 41 % Ar i 100 % CO_2.

2. Na temelju dobivenih rezultata kemijskih i mikrostrukturnih analiza metala zavara utvrđeni su optimalni parametri zavarivanja koji rezultiraju najvećim udjelima silicija, mangana i acikularnog ferita.

3. Primjenom analize dinamičke karakteristike procesa zavarivanja uspostavljena je direktna korelacija između trajanja kratkog spoja i električnog luka tijekom jednog ciklusa i kemijskog sastava metala zavara.

4. Na temelju dobivenih rezultata analiza kemijskog sastava i mikrostrukture metala zavara izrađeni su matematički modeli koji opisuju utjecaj variranih parametara na kemijski sastav i mikrostrukturu zavarenog spoja čelika API 5L X80.

5. Analizom kemijskog sastava nemetalnih uključaka uočena je pozitivna korelacija između veličine uključaka i udjela nemetalnih kemijskih elemenata.

Na osnovi provedenog istraživanja i dobivenih rezultata preporuča se daljnja istraživanja usmjeriti na određivanje utjecaja udjela aktivne komponente zaštitnog plina na udio acikularnog ferita u metalu zavara API 5L X80 čelika zavarenog CBT MAG postupkom zavarivanja. Korištenjem CBT MAG zavarivanja omogućava se korištenje zaštitnog plina s maksimalnim udjelom aktivne komponente od 100 % volumnog udjela i to bez pojave štrcanja. No, zavarivanjem navedenim parametrima ulazi se u neistraženo područje po pitanju formiranja i rasta acikularnog ferita kao poželjnog mikrokonstituenta u metalu zavara.

Također se preporuča dodatno istražiti mehanizme koji uzrokuju smanjenje udjela elemenata silicija i mangana tijekom MAG i CBT MAG zavarivanja čelika API 5L X80. Nastavak istraživanja uključuje i kvantificiranje prijenosa metala kod konvencionalnog MAG i CBT MAG zavarivanja u smislu trajanja kratkog spoja i električnog luka tijekom ciklusa.

7. LITERATURA

[1] Ouchi, C.: Development of steel plates by intensive use of TMCP and direct quenching processes; ISIJ International, Vol. 41, No. 6, 542-553, Japan, 2001.

[2] Imai, S.: General properties of TMCP steels; Proceedings of the twelfth international offshore and polar engineering conference, Kitakyushu, Japan, 392-396, Japan, 2002.

[3] Sung, H.K; Shin, S.Y. ; Cha, W.; Oh, K.; Lee, S.; Kim, N.J.: Effects of acicular ferrite on charpy impact properties in heat affected zones of oxide-containing API X80 linepipe steels; Materials science and engineering A 528, 3350-3357, 2011.

[4] Mohseni, P.: Brittle and ductile fracture of X80 arctic steel; Doctoral thesis, Norwegian University of science and technology, Trondheim, 2012.

[5] Rosado, D.B.; Waele, W.D.; Vanderschueren, D.; Hertelé, S.: Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels; Proceedings of the Conference Sustainable construction and design, Editor: Jeroen Van Wittenberghe. Vol. 4. Ghent, Belgium: Ghent University, Laboratory Soete, 2013.

[6] Joo, M.S.; Suh, D.W.; Bhadeshia, H.K.D.H.: Mechanical anisotropy in steels for pipelines; ISIJ International, Vol. 53, No. 8, 1305-1314, Japan, 2013.

[7] Shin, S.Y.: Effects of microstructure on tensile, charpy impact, and crack tip opening displacement properties of two API X80 pipeline steels; Metallurgical and materials transactions A, Vol. 44A, 2613-2624, 2013.

[8] Ramirez, J.E.: Examining the mechanical properties of high-strength steel weld metals; Welding journal, USA 88.1, 32-38, 2009.

[9] Morales, E.V.; Silva, R.A.; Bott, I.S.; Paciornik, S.: Strengthening mechanisms in a pipeline microalloyed steel with a complex microstructure; Materials science and engineering A 585, 253-260, 2013.

[10] Zhou, M.; Du, L.; Liu, X.: Microstructure and mechanical properties of X80 pipeline steels in different cooling schedules; Acta metallurgica Sinica, Vol. 23, No. 3, 171-175, 2010.

[11] Lei, Z.; Shan, G.: Production and application of high strength and high toughness pipeline steel with acicular ferrite; Iron and steel 40.11, 688-693, 2005.

[12] Mazancová, E., Rucká, Z., Jandová, D., Mazanec, K.: Evaluation and comparison of microstructural characteristics of acicular ferrite and granular bainite; International Conference on Metallurgy and Materials METAL, Czech Republic, 175-180, 2009.

[13] Terada, Y., Kiyose, A.,Doi, N., Morimoto, H., Kojima, A., Nakashima, T., Hara, T., Sugiyama, M.: High-strength linepipes with excellent HAZ toughness; Nippon steel technical report, No. 90, 88-93, Japan, July 2004.

[14] Gadallah, R., Fahmy, R., Khalifa, T., Sadek, A.: Influence of shielding gas composition on the properties of flux-cored arc welds of plain carbon steel; International journal of engineering and technology innovation, Vol. 2, 1-12, 2012.

[15] Ramirez, J.E.: Characterization of high-strength steel weld metals - chemical composition, microstructure, and nonmetallic inclusions; Welding journal, Vol. 87, 65-75, 2008.

[16] Chhabra, N., Kalsi, N.S., Singh, D.: Effect of shielding gases on micro hardness of FE 410 (AISI 1024) steel welded joint in GMAW process; International journal on emerging technologies 5 (1), 8-13, 2014.

[17] Ebrahiminia, 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; Materials and design 30, 3891-3895, 2009.

[18] Mukhopadhyay, S., Pal, T.K.: Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires; International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 29 Issue 3/4, 262-268, 2006.

[19] Kah, P.: Welding of sheet metal using modified short arc MIG/MAG welding process; Doctoral thesis, Lappeenranta University of technology, Finland, 2007.

[20] Garašić, I., Kožuh, Z., Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju; Zbornik radova konferencije Welding – Zavarivanje, Šibenik, 49-58 2014.

[21] de Miranda, H.C., Ferraresi, V.A., Scotti, A: Identification and control of metal transfer in pulsed GMAW; Proceedings of 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2005, Ouro Preto, MG, November 6-11, 2005.

[22] Kurşun, T.: Effect of the GMAW and the GMAW-P welding processes on microstructure, hardness, tensile and impact strength of AISI 1030 steel joints fabricated by ASP316L austenitic steel filler metal; Archives of metallurgy and materials, Vol. 56, 955-963, 2011.

[23] Egerland, S.: Controlled gas metal arc welding processes an assessment on development; PetroMin Pipeliner Magazine, 34-49, 2012.

[24] Węglowski, M.St., Huang, Y., Zhang, Y.M.: Effect of welding current on metal transfer in GMAW; Archives of materials science and engineering, Vol. 33.1, 49-56, 2008.

[25] Ueyama, T.: Trends in developments in gas shielded arc welding equipment in Japan; Zavarivanje 57, 1/2, 25-30, 2014.

[26] Era, T., Uezono, T., Kadota, K., Hata, S., Ueyama, T.: Leading edge of current waveform control technology on digital inverter controlled welding power source and its peripheral equipment; Zavarivanje 57, 1/2, 5-16, 2014.

[27] Era, T., Uezono, T., Ueyama, T., Yamamoto, H.: Development of AC GMA welding system using controlled bridge transfer process; IIW Doc.No. WII-1937-08, 2008.

[28] Ushio, M.: Development of gas-shielded arc process in automatic welding; 62nd IIW Annual assembly, Singapore, 2009.

[29] Era, T., Ueyama, T., Brooks, M.: Welding steel sheet with modified short circuiting process; Welding journal, 28-33, 2009.

[30] Era, T., Ide, A., Uezono, T., Yamamoto, H., Ueyama, T.: Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, IIW Doc.No. XII-1900-06, 2006.

[31] Felber, S.: Pipeline engineering; Österreichische Gesellschaft für Schweißtechnik, Vienna, 2009.

[32] Alwaranbi, M.S.: Chloride pitting corrosion of API X-80 and X-100 high strength low alloy pipeline steels in bicarbonate solutions; Doctoral thesis, The University of British Columbia, 2006.

[33] Shanmugan, S., Ramisetti, N.K., Misra, R.D.K., Hartman, J., Jansto, S.G.: Microstructure and high strength-toughness combination of a new 700 Mpa Nb-microalloyed pipeline steel; Materials science and engineering A 478, str. 26-37, 2008.

[34] Streisselberger, A., Bauer, J., Flüss, P., Schwinn, V.: TMCP steel plates for sophisticated pipe line projects; Pipeline Technology, Volume 1, Elsevier Science B.V., 357-368, 1995.

[35] Xu, L.: Innovative steels for low carbon economy; Advanced steels, Springer Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, 9-14, 2011.

[36] Hertelé, S.: Coupled experimental-numerical framework for the assessment of strain capacity of flawed welds in pipelines, PhD Thesis, Ghent University, 2012.

[37] Homsher, C.N.: Determination of the non-recrystallization Temperature (T_{nr}) in multiple Microalloyed steels, PhD Thesis, Colorado school of mines, USA, 2013.

[38] Wang, W., Shan, Y., Yang, K.: Study of high strength pipeline steels with different microstructures; Materials science and engineering A 502, 38-44, 2009.

[39] Dong, H., Sun, X., Cao, W., Liu, Z., Wang, M.: On the performance improvement of steels through M^3 structure control; Advanced steels, Springer Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, 35-38, 2011.

[40] Kolednjak, D.: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.

[41] Hodgson, P.D., Timokhina, I.B., Beladi, H., Mukherjee, S.: Nanostructural engineering of TMCP steels; Advanced steels, Springer Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, 309-316, 2011.

[42] ...http://keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=376
TMCP Steel for Offshore Structures

[43] Adamczyk, J.: Development of the microalloyed constructional steels; Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 14.1-2, 9-20, 2006.

[44] Tsuji, N.: Ways to manage both strength and ductility in nanostructural steels; Springer Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, 119-130, 2011.

[45] Weng, Y.: Ultra-fine grained steels; Springer, 2009.

[46] Tomić Kovačević, T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.

[47] Kang, K.B., Kang, J.S., Yoo, J.Y., Seo, D.H., Suh, I.S., An, G.B.: Development of high strength linepipe and shipbuilding steels; Springer Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, 281-288, 2011.

[48] Vervynckt, S.: Control of the Non-recrystallization Temperature in High Strength Low Alloy (HSLA) Steels, PhD Thesis, Ghent University, 2010.

[49] Tamehiro, H., Asahi, H., Hara, T., Terada, Y.: Ultra-high Strength, Weldable Steels with Excellent Ultra-low Temperature Toughness, EXXON Production Research Company and NIPPON Steel, United States Patent 6264760, 1999.

[50] Pirinen, M.: The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures, PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2013.

[51] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[52] Svensson, L.E.: Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds; CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 1994.

[53] Lancaster, J.F.: Metallurgy of welding; Sixth Edition, Abington publishing, Abington, Cambridge, England, 1999.

[54] Farhat, H.: Effects of multiple wires and welding speed on the microstructures and properties of submerged arc welded X80 steel; Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2007.

[55] Lambert-Perlade, A., Gourgues, A.F., Besson, J., Sturel, T., Pineau, A.: Mechanisms and modelling of cleavage fracture in simulated heat-affected zone microstructures of a high-strength low alloy steel, Metallurgical and materials transactions A, Vol. 35A, 1039-1053, March 2004.

[56] Keehan, E.: Effect of microstructure on mechanical properties of high strength steel welds; PhD Thesis, Chalmers University of technology and Göteborg University, Göteborg, Sweden, 2004.

[57] Shanmugam, S., Ramisetti, N. K., Misra, R. D. K., Hartmann, J., Jansto, S. G.: Microstructure and high strength–toughness combination of a new 700MPa Nb-microalloyed pipeline steel; Materials Science and Engineering: A, 478 (1), 26-37, 2008.

[58] Cizek, P., Wynne, B. P., Davies, C. H. J., Muddle, B. C., Hodgson, P. D.: Effect of composition and austenite deformation on the transformation characteristics of low-carbon and ultralow-carbon microalloyed steels; Metallurgical and Materials Transactions A, 33(5), 1331-1349, 2002.

[59] Madariaga I., Gutierrez, I., Bhadeshia, H.K.D.H.: Acicular ferrite morphologies in a medium-carbon microalloyed steel; Metallurgical and Materials Transactions A, 32(9), 2187-2197, 2001.

[60] Babu., S.S., Bhadeshia, H.K.D.H.: Mechanism of the transition from bainite to acicular ferrite; Materials Transactions, JIM, 32(8), 679-688, 1991.

[61] Bhadeshia, H.K.D.H.: The bainite transformation: unresolved issues; Materials Science and Engineering A273-275, 58-66, 1999.

[62] Li, Y., Baker, T.N.: Effect of morphology of martensite-austenite phase on fracture of weld heat affected zone in vanadium and niobium microalloyed steels; Materials Science and Technology, 26(9), 1029-1040, 2010.

[63] Bauer, J., Flüss, P., Amoris, E. Schwinn, V.: Microstructure and properties of thermomechanical controlled processing steels for linepipe applications; Ironmaking and Steelmaking, 32 (4), 325-330, 2005.

[64] Sarma, D.S., Karasev, A.V., Jönsson, P.G.: On the role of non-metallic inclusions in the nucleation of acicular ferrite in steels; ISIJ International, 49 (7), 1063-1074, 2009.

[65] Bhadeshia, H.K.D.H.: Bainite in steels: Transformations, microstructure and properties; IOM Communications, London, 237-276, 2001.

[66] Lee, T.K., Kim, H.J., Kang, B.Y., Hwang, S.K.: Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds; ISIJ International, 40 (12), 1260-1268, 2000.

[67] Zhao, M.C., Yang, K., Shan, Y.: The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel; Materials Science and Engineering A335, 14-20, 2002.

[68] Zheng, L., Gao, S.: Production and application of high strength and high toughness pipeline steel with acicular ferrite, Iron and steel, 40(11), 688-693, 2005.

[69] Morales, E.V., Silva, R.A., Bott, I.S., Paciornik, S.: Strengthening mechanisms in a pipeline microalloyed steel with a complex microstructure, Materials Science and Engineering A585, 253-260, 2013.

[70] Wang, W., Shan, Y., Yang, K.: Study of high strength pipeline steels with different microstructures; Materials Science and Engineering A502, 38-44, 2009.

[71] Easterling, K.: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding; Elsevier, 2013.

[72] Karasev, A.V., Suito, H., Jönsson, P.G.: Effects of Soluble Ti and Zr Content and Austenite Grain Size on Microstructure of the Simulated Heat Affected Zone in Fe–C–Mn–Si Alloy; ISIJ International, 51 (9), 1524-1533, 2011.

[73] Ekengren, J.: Estimating inclusion content in high performance steels; Licentiate thesis, Karlstad University Studies, Sweden, 2008.

[74] Xiao, F., Zhao, M., Shan, Y. Liao, B., Yang, K.: Processing of ultralow carbon pipeline steels with acicular ferrite; Journal of Materials Science and Technology, 20 (6), 779-781, 2004.

[75] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[76] O`Brien, A. (Ed.): Welding handbook (9th edition) Volume 2, Welding processes; American Welding Society, Miami, USA, 2004.

[77] Panić, V.: Utjecaj plinova pri zavarivanju na svojstva zavara; Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

[78] Norrish, J.: Advanced welding processes; Woodhead publishing limited, England, 2006.

[79] Wang, G., Huang, P.G., Zhang, Y.M.: Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding; Metallurgical and materials transactions B, 34B, 345-353, 2003.

[80] Achebo, J.I.: Complex Behavior of Forces Influencing Molten Weld Metal Flow based on Static Force Balance Theory; Physics Procedia 25, 317-324, 2012.

[81] de Sousa LUZ, T., Rodrigues, C.E.A.L., Vilarinho, L.O.: Pinch effect observation in MIG/MAG welding of AWS ER 309l wire; Proceedings of COBEM 2005, 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, 2005.

[82] Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W.: A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding; Journal of materials processing technology 212, 1406-1413, 2012.

[83] Guidelines for Gas Metal Arc Welding; Millerwelds, 2012.

[84] Iordachescu, D., Quintino, L.: Steps towards a new classification of metal transfer in gas metal arc welding; Journal of materials processing technology 202, 391-397, 2008.

[85] Rudan, M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom; 4. Seminar Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici); Pula; 24.05.2007.

[86] Era, T., Ide, A., Uezono, T., Ueyama, T., Hirata, Y.: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining; Welding International, 27(4), 268-273, 2013.

[87] Garašić, I., Kožuh, Z., Kralj, S., Tomić, T., Glogović, Z.: Primjena izmjenične struje kod MAG navarivanja legure Inconel 625, Zbornik radova "Suvremeni proizvodni postupci, oprema i materijali za zavarene konstrukcije i proizvode" / Samardžić, I.; Despotović, B. (ur.). - Slavonski Brod : Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2013.

[88] Garašić, I., Kralj, S., Kožuh, Z.: Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Zavarivanje vol.54, str. 61-67, Zagreb, 2011.

[89] Garašić, I., Remenar, M., Kufrin, T.: Zavarivanje MIG/MAG promijenjivim polaritetom – posebnosti i primjena", Zavarivanje vol.57, 17-23, Zagreb, 2014.

[90] Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V.: Elektrolučno zavarivanje, Mašinski materijali II deo, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2000.

[91] Vilarinho, L.O., Nascimento, A.S.: Effect of Waveform and Shielding Gas on Melting Rate and Bead Geometry for GMAW-VP and Correlation to Kinematics of Metal

Transfer; Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, ASM International, Chicaho, Illinois, USA, 438-447, 2013.

[92] ASM International Handbook Committe: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.

[93] ... http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_2.htm , dostupno

[94] Nadzam, J: GMAW Welding guide, Lincoln Electric, Cleveland, Ohio, USA, 2006.

[95] Zorc. B, Imamović, M., Nagode, A., Stoić, A., Kosec, B., Samardžić, I., Kosec, L.: Effect of nonmetallic inclusions on steel welds metal hot cracking; Metalurgija 53, 171-174, 2014.

[96] Francis, R.E., Jones, J.E., Olson, D.L.: Effect of shielding gas oxygen activitiy on weld metal microstructure of GMA welded microalloyed HSLA steel; Welding research supplement, 408-415, 1990.

[97] Liu, S., Olson, D.L.: The role of inclusions in controlling HSLA steel weld microstructures; Welding research supplement, 139-149, 1986.

[98] Onsøien, M.I., Liu, S., Olson, D.L.: Shielding gas oxygen equivalent in weld metal microstructure optimization; Welding research supplement, 216-224, 1996.

[99] ... http://www.varstroj.si/index.php/370.html

[100] ... http://www.treatrade.hr/pdf/BUG-O/en/mdsbrochure.PDF

[101] ... http://www.otcdaihenasia.com/product-detail.asp?product_id=164

[102] API 5L, Specification for pipelines, 45th edition, 2012.

[103] Certifikat materijala čelika API 5L X80, Voestalpine Grobblech GmbH, EN 10204

[104] Certifikat dodatnog materijala; Lincoln Electric – LNM MoNi

[105] HRN EN ISO 14175:2008; Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke

[106] Cajner, H.: Višekriterijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[107] Prebeg, P.: Višekriterijsko projektiranje složenih tankostijenih konstrukcija; Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[108] Melo, D.N., de Toledo, E.C.V., Hasan, S.D., Rubens Filho, M.: Optimization strategy for maximizing production of cyclohexanol; Dynamics and Control of Process Systems 2004, 607 – 611, 2005.

[109] Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S., Escaleira, L.A.: Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, Talanta, 76(5), 965 - 977, 2008.

[110] HRN EN ISO 15614-1:2007; Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla (ISO 15614-1:2004; EN ISO 15614-1:2004)

[111] Glogović, Z.: Utjecaj parametara plinskog naštrcavanja na svojstva nanešenog sloja; Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

[112] Montgomery, D.C.: Applied Statistics and Probability for Engineers, J. Wiley & Sons, USA, 2003.

[113] Medić, S., Kondić, Ž., Runje, B.: Validation of the realised measurement uncertainty in process of precise line scales calibration; Tehnički vjesnik 19 (2), 333-339, 2012.

[114] Runje, B.: Istraživanje mjernih nesigurnosti u postupcima umjeravanja etalona duljine; Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[115] HRN EN 60974-5:2009; Oprema za elektrolučno zavarivanje – 5. dio: Napajanja žice

[116] HRN EN ISO 16834; Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, žice, šipke i depoziti za elektrolučno zavarivanje u zaštiti plina za čelike povišene čvrstoće

KRATKI ŽIVOTOPIS

Maja Jurica (rođ. Remenar) rođena je 21. kolovoza 1985. godine u Zagrebu. Završila je osnovnu školu u Savskom Marofu, te nakon osnovnoškolskog obrazovanja upisuje jezičnu gimnaziju (XVI.) u Zagrebu. 2003. godine maturira te nakon toga upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirala je 20.11.2008. na Katedri za mjerenje i kontrolu uspješnom obranom Diplomskog rada pod nazivom "Lean Six Sigma".

U srpnju 2009. godine zapošljava se na Katedri za zavarene konstrukcije, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, te iste godine upisuje Poslijediplomski doktorski studij, smjer Strojarske tehnologije. Aktivno sudjeluje u održavanju nastavnih i znanstveno-istraživačkih aktivnosti na Fakultetu. Objavila je 6 radova i poglavlje u knjizi. Članica je Hrvatskog društva za zavarivanje. Aktivno se služi engleskim i njemačkim jezikom. Udana je.

SHORT BIOGRAPHY

Mrs Maja Jurica (née Remenar) was born on 21st August 1985 in Zagreb, Croatia. She finished elementary school ″Ivana Brlić Mažuranić″ in Savski Marof and in 1999 she started her secondary school education, in the XVI Gymnasium in Zagreb. She graduated in 2003. After her graduation, in the same year, she enrolled to Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. In November 2008 she got her B.Sc. degree, on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, in Production Engineering, on the Department of Quality.

In July of 2009 she started working as a young researcher at the Department of welded structures and in academic year 2009/2010 she started postgraduate studies, specialization "Engineering Technologies" on the Faculty of Mechanical Engineering, University of Zagreb. She published 6 papers and a chapter in a book. In her work she participates in academic and scientific activities and is an active member of Croatian Welding Society. She speaks English and German. She is married.