MAG-STT zavarivanje nehrđajućih čelika

Princip, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2010

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:235:102612

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor
Prof. dr. sc. Slobodan Kralj

Marko Princip

Zagreb, 2010.

SAŽETAK

Diplomski rad je podijeljen u dva dijela, teoretski i eksperimentalni dio. U teoretskom dijelu objašnjen je postupak MIG/MAG – STT zavarivanja te njegova usporedba sa konvencionalnim MIG/MAG postupkom. Zavarivanje nehrđajućih čelika također je opisano zajedno s karakteristikama istih. Opisan je postupak zavarivanja tankih i debelih limova te cijevi MIG/MAG – STT postupkom.

U eksperimentalnom dijelu provedeni su pretpokusi navarivanja i pokusi zavarivanja MIG/MAG – STT postupkom, definirani su optimalni parametri te su provedena ispitivanja mehaničkih, mikrostrukturnih i makrostrukturnih svojstava zavarenih spojeva.

- SADRŽAJ -

POPIS SLIKA…… IV
POPIS TABLICA…… VII
POPIS OZNAKA I KRATICA…… IX

1 UVOD……1
2 OSNOVE MIG/MAG – STT POSTUPKA ZAVARIVANJA……3
3 USPOREDBA MIG/MAG – STT POSTUPKA I MIG/MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA……10
4 NEHRĐAJUĆI ČELICI……12
4.1 Austenitni nehrđajući čelici……12
5 ZAVARIVANJE AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA……19
5.1 Moguće primjene MIG/MAG – STT postupka……21
6 EKSPERIMENTALNI DIO……22
6.1 Osnovni materijal……23
6.2 Dodatni materijal……24
6.3 Oprema za navarivanje i zavarivanje……25
6.4 Plan pretpokusa i pokusa……27
6.5 Pretpokus navarivanja……28
6.6 Pokusi zavarivanja……32
6.6.1 Pokus P1A……39
6.6.2 Pokus P2A……40
6.6.3 Pokus P3A……41
6.6.4 Pokus P4A……42
6.6.5 Pokus P5A……43
6.6.6 Pokus P1M……44
6.6.7 Pokus P2M……45
6.6.8 Pokus P3M……46
6.6.9 Pokus P4M……47
6.6.10 Pokus P5M……48
7 POSTUPAK ISPITIVANJA SVOJSTAVA ZAVARENIH SPOJEVA……49
7.1 Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva……50

7.2 Postupak izrade i analiza uzoraka za mikro i makrostrukturna ispitivanja 56
7.2.1 Mikrostrukturna ispitivanja.....56
7.2.2 Makrostrukturna ispitivanja.....63
8 ZAKLJUČAK.....72
9 LITERATURA 74

POPIS SLIKA

Slika 1. Utjecaj vršne struje na geometriju zavara....3
Slika 2. Utjecaj osnovne struje na geometriju zavara....4
Slika 3. Promjene parametara MIG/MAG – STT zavarivanja....6
Slika 4. Prijenos dodatnog materijala kod MIG/MAG – STT postupka....8
Slika 5. Prijenos dodatnog materijala kratkim spojevima kod MIG/MAG postupka....9
Slika 6. Štrcanje materijala kod MAG i MAG – STT postupka zavarivanja....10
Slika 7. Automat BUG – O Systems, MOD. BUG – 5300....25
Slika 8. Lincoln Electric Invertec STT II i LF 37....26
Slika 9. CNC plazma rezačica VANAD PROXIMA 10/200....26
Slika 10. Određivanje optimalnih parametara navarivanjem....28
Slika 11. Čišćenje pločica....29
Slika 12. IC termometar....29
Slika 13. Pozicioniranje pištolja....31
Slika 14. Navareni uzorci....31
Slika 15. Priprema spoja za zavarivanje....33
Slika 16. Priprema žlijeba za zavarivanje....34
Slika 17. Pokusi zavarivanja....34
Slika 18. Ručno zavarivanje uzoraka, pogled 1....35
Slika 19. Ručno zavarivanje uzoraka, pogled 2....36
Slika 20. Zavareni uzorci....36
Slika 21. Četkanje uzoraka....37
Slika 22. Pokus P1A, lice zavara....39
Slika 23. Pokus P1A, korijen zavara....39
Slika 24. Pokus P2A, lice zavara....40
Slika 25. Pokus P2A, korijen zavara....40
Slika 26. Pokus P3A, lice zavara....41
Slika 27. Pokus P3A, korijen zavara....41
Slika 28. Pokus P4A, lice zavara....42
Slika 29. Pokus P4A, korijen zavara....42
Slika 30. Pokus P5A, lice zavara....43
Slika 31. Pokus P5A, korijen zavara....43

Slika 32. Pokus P1M, lice zavara 44
Slika 33. Pokus P1M, korijen zavara 44
Slika 34. Pokus P2M, lice zavara 45
Slika 35. Pokus P2M, korijen zavara 45
Slika 36. Pokus P3M, lice zavara 46
Slika 37. Pokus P3M, korijen zavara 46
Slika 38. Pokus P4M, lice zavara 47
Slika 39. Pokus P4M, korijen zavara 47
Slika 40. Pokus P5M, lice zavara 48
Slika 41. Pokus P5M, korijen zavara 48
Slika 42. Plan rezanja uzoraka.....49
Slika 43. Postupak savijanja prema normi EN 910.....50
Slika 44. Naprava za savijanje uzoraka.....51
Slika 45. Uzorci za savijanje 51
Slika 46. Savijanje uzoraka 52
Slika 47. Maksimalno savijen uzorak 52
Slika 48. Savijeni uzorak P1A na korijen zavara.....53
Slika 49. Savijeni uzorak P4A na korijen zavara.....53
Slika 50. Skidanje srha sa uzoraka.....56
Slika 51. Zalijevanje uzoraka 57
Slika 52. Zaliveni uzorci 57
Slika 53. Brušenje i poliranje uzoraka 58
Slika 54. Postupak izazivanja strukture.....59
Slika 55. Invertni svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX 51.....59
Slika 56. Mikrostruktura osnovnog materijala 60
Slika 57. Primjer mjerenja geometrijskih veličina na uzorcima.....63
Slika 58. Pripremljeni uzorci za mjerenje geometrije lica i korijena zavara.....64
Slika 59. Histogram širine lica zavara, 100 % Ar.....66
Slika 60. Histogram širine lica zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.....66
Slika 61. Histogram širine korijena zavara, 100 % Ar.....67
Slika 62. Histogram širine korijena zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.....68
Slika 63. Histogram nadvišenja lica zavara, 100 % Ar.....68
Slika 64. Histogram nadvišenja lica zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.....69
Slika 65. Histogram nadvišenja korijena zavara, 100 % Ar.....70

Slika 66. Histogram nadvišenja korijena zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 70

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba MIG/MAG i MIG/MAG – STT postupka zavarivanja.....11
Tablica 2. Utjecaj pojedinih kemijskih elemenata na svojstva austenitnih Cr – Ni čelika.....13
Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala.....23
Tablica 4. Mehanička svojstva osnovnog materijala.....23
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala.....24
Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala.....24
Tablica 7. Parametri navarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 100 % Ar.....30
Tablica 8. Parametri navarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.....30
Tablica 9. Parametri zavarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 100 % Ar.....32
Tablica 10. Parametri zavarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.....32
Tablica 11. Pokus br. P1A, P2A, P3A, P4A i P5A.....33
Tablica 12. Pokus br. P1M, P2M, P3M, P4M i P5M.....33
Tablica 13. Izmjereni i izračunati podaci za P1A za korijen zavara.....39
Tablica 14. Izmjereni i izračunati podaci za P1A za popunu žlijeba.....39
Tablica 15. Izmjereni i izračunati podaci za P2A za korijen zavara.....40
Tablica 16. Izmjereni i izračunati podaci za P2A za popunu žlijeba.....40
Tablica 17. Izmjereni i izračunati podaci za P3A za korijen zavara.....41
Tablica 18. Izmjereni i izračunati podaci za P3A za popunu žlijeba.....41
Tablica 19. Izmjereni i izračunati podaci za P4A za korijen zavara.....42
Tablica 20. Izmjereni i izračunati podaci za P4A za popunu žlijeba.....42
Tablica 21. Izmjereni i izračunati podaci za P5A za korijen zavara.....43
Tablica 22. Izmjereni i izračunati podaci za P5A za popunu žlijeba.....43
Tablica 23. Izmjereni i izračunati podaci za P1M za korijen zavara.....44
Tablica 24. Izmjereni i izračunati podaci za P1M za popunu žlijeba.....44
Tablica 25. Izmjereni i izračunati podaci za P2M za korijen zavara.....45
Tablica 26. Izmjereni i izračunati podaci za P2M za popunu žlijeba.....45
Tablica 27. Izmjereni i izračunati podaci za P3M za korijen zavara.....46
Tablica 28. Izmjereni i izračunati podaci za P3M za popunu žlijeba.....46
Tablica 29. Izmjereni i izračunati podaci za P4M za korijen zavara.....47
Tablica 30. Izmjereni i izračunati podaci za P4M za popunu žlijeba.....47
Tablica 31. Izmjereni i izračunati podaci za P5M za korijen zavara.....48

Tablica 32. Izmjereni i izračunati podaci za P5M za popunu žlijeba.....48
Tablica 33. Izgled korijena i lica zavara nakon pokusa savijanjem.....54
Tablica 34. Mikrostrukture zavarenih spojeva.....60
Tablica 35. Geometrijske karakteristike lica zavara.....65
Tablica 36. Geometrijske karakteristike korijena zavara.....65

POPIS OZNAKA I KRATICA

LATINSKE OZNAKE

Oznaka	*Opis*	*Jedinica*
U_z	Napon zavarivanja	V
I_z	Struja zavarivanja	A
Q_z	Unos topline prilikom zavarivanja	kJ/cm
v_z	Brzina zavarivanja	cm/min
s_z	Prijeđeni put zavarivanja	cm
t_z	Vrijeme zavarivanja	s
l_z	Dužina zavarenog spoja	mm
E_z	Energija zavarivanja	J
P_z	Snaga zavarivanja	J/s
Q_{zk}	Unos topline prilikom zavarivanja korijena	kJ/cm
I_{zk}	Struja zavarivanja korijena	A
U_{zk}	Napon zavarivanja korijena	V
t_{zk}	Vrijeme zavarivanja korijena	s
v_{zk}	Brzina zavarivanja korijena	cm/min
Q_{zp}	Unos topline prilikom popune žlijeba	kJ/cm
I_{zp}	Struja zavarivanja popune žlijeba	A
U_{zp}	Napon zavarivanja popune žlijeba	V
t_{zp}	Vrijeme zavarivanja popune žlijeba	s
v_{zp}	Brzina zavarivanja popune žlijeba	cm/min
h_L	Nadvišenje lica zavara	mm
b_L	Širina lica zavara	mm
h_K	Nadvišenje korijena zavara	mm
b_K	Širina korijena zavara	mm
A_5	Istezljivost	%
Z	Suženje (kontrakcija) poprečnog presjeka	%
KV	Udarni rad loma po Charpy – ju za "V" izrez	J
HV	Tvrdoća po Vickersu	-

HB	Tvrdoća po Brinellu	-
R_e	Granica tečenja	N/mm^2
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm^2
$Rp_{0,2}$ ($Rp_{0,1}$)	Konvencionalna granica tečenja	N/mm^2

GRČKI SIMBOLI

Oznaka	*Opis*	*Jedinica*
Ø	Promjer elektrode (žice)	mm
η	Koeficijent korisnog djelovanja el. luka	-
α	Kut savijanja	^{o}

KRATICE

Oznaka	*Opis*
STT	eng. Surface Tension Transfer
MIG	eng. Metal Inert Gas
MAG	eng. Metal Active Gas
TIG	eng. Tungsten Inert Gas
IKK	Interkristalna korozija
ELC	eng. Extra Low Carbon
ZUT	Zona Utjecaja Topline
ZT	Zona Taljenja
ASME	eng. American Society of Mechanical Engineers
AISI	eng. American Iron and Steel Institute
PG	Položaj zavarivanja, vertikala prema dolje
BW	Sučeljeni spoj
DIN	njem. Deutsches Institut für Normung
W. Nr.	njem. Werkstoffnummer
UNS	eng. Unified Numbering System
EN	njem. Europäische Norm

IZJAVA

Izjavljujem pod punom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno uz potrebne konzultacije i savjete, koristeći znanja stečena tijekom studija te uz pomoć raspoložive literature.

Marko Princip

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Slobodanu Kralju na vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem na korisnim savjetima, stručnoj pomoći i vođenju tijekom izrade ovog diplomskog rada, dr. sc. Zlatku Glogoviću, Jozefu Tuniću mag. ing. mech., dr. sc. Ivici Garašiću, djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije koji su obavili eksperimentalno navarivanje, zavarivanje i savijanje zavarenih uzoraka i djelatnicima Laboratorija za materijalografiju koji su obavili pripremu i snimanje mikro i makrostrukture zavarenih uzoraka.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Anti i Nadi te mojoj supruzi Jeleni na pomoći, podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

1 UVOD

Tema diplomskog rada je određivanje pogodnosti MAG – STT postupka zavarivanja prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika. Prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika osim upotrebe raznih mješavina inertnih plinova s aktivnim plinovima (npr. Ar + CO_2) često se koriste i inertni zaštitni plinovi (npr. 100 % Ar) kao što je to primjer i u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Stoga u daljnjem tekstu će se upotrebljavati oznaka MIG/MAG – STT postupak zavarivanja koja ukazuje na primjenu zaštitnog inertnog plina ili zaštitne mješavine plinova prilikom STT postupka zavarivanja nehrđajućih čelika.

Teoretski dio rada bavi se mogućom primjenom MIG/MAG – STT postupka zavarivanja nehrđajućih čelika što je bio glavni motiv za izradu ovog rada. Također posebna pažnja je posvećena upoznavanju problematike zavarivanja nehrđajućih čelika te je provedena usporedba MIG/MAG – STT postupka zavarivanja s konvencionalnim MIG/MAG postupkom.

Bitan dio rada posvećen je pravilnom odabiru parametara za zavarivanje nehrđajućih čelika MIG/MAG – STT postupkom kao i odabiru zaštitnih plinova za zavarivanje.

Eksperimentalni dio prikazuje pretpokuse navarivanja MIG/MAG – STT postupkom te definira optimalne parametre za pokuse zavarivanja. Pokusi zavarivanja su provedeni na odgovarajućim uzorcima s definiranim optimalnim parametrima u kombinaciji s različitim plinskim zaštitnim mješavinama na temelju kojih se je pristupilo daljnjim ispitivanjima. Na temelju ispitivanja mikrostrukturnih, makrostrukturnih i mehaničkih svojstava zavarenog spoja donijeti su zaključci o pogodnosti MIG/MAG – STT postupka zavarivanja pri zavarivanju nehrđajućih čelika.

STT (eng. Surface Tension Transfer) postupak je patentiran od strane proizvođača "Lincoln Electric Company" još davne 1988. godine, ali je prvi komercijalni uređaj napravljen tek 1994. godine. U današnje vrijeme ovaj postupak se koristi gotovo u svim tvrtkama koje se bave montažom cjevovoda, ali također ovaj postupak ima i sve veću primjenu i u ostalim granama industrije kao npr. u automobilskoj industriji.

Jedna od važnijih prednosti ovoga postupka je da se zavarivanje tanjih limova i provarivanje korijenskih zavara može usporediti sa zavarivanjem istih pomoću TIG postupka. U odnosu na TIG postupak zavarivanja, MIG/MAG – STT postupak ima četiri puta veću brzinu zavarivanja te stoga veću produktivnost. U usporedbi s klasičnim MIG/MAG postupkom MIG/MAG – STT postupak znatno smanjuje štrcanje dodatnog materijala,

skraćuje se vrijeme potrebno za čišćenje zavara i osnovnog materijala te znatno smanjuje nastanak dimova i metalnih para prilikom zavarivanja jer žica (elektroda) nije pregrijana kod zavarivanja. Štrcanje i nastanak metalnih para također je smanjeno i kod upotrebe CO_2 zaštitnog plina i žica većih promjera. Smanjena je brzina odvođenja topline te zračenje u okoliš što znači da su uvjeti rada povoljniji za zavarivača u usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja. Isto tako, manji unos topline smanjuje deformacije i zaostala naprezanja uslijed zavarivanja.

Prijenos površinskom napetošću (eng. Surface Tension Transfer) je kontrolirani prijenos materijala kratkim spojevima koji prilagođuje oblik strujnog vala i napona fizici zavarivačkog luka i prijenosa metala u istom. MIG/MAG – STT postupak zavarivanja objedinjuje invertorsku tehnologiju visoke frekvencije s naprednim tehnologijama upravljanja električnim lukom koje zamjenjuju klasičnu MIG/MAG tehnologiju zavarivanja. Iskorištavanjem tehnologije upravljanja oblikom strujnog vala (eng. Waveform Control Technology) MIG/MAG – STT postupak zavarivanja omogućuje dopremu i promjenu struje u žici (elektrodi) za zavarivanje unutar mikrosekunde. Točno upravljanje strujom zavarivanja tijekom cijelog ciklusa zavarivanja značajno smanjuje ili uklanja štrcanje metalnih kapljica dodatnog materijala što je normalna pojava kod MIG/MAG postupka zavarivanja električnim lukom kratkog spoja. Zbog svega navedenoga MIG/MAG – STT postupak zavarivanja nalazi sve veću primjenu u praksi.

Eksperimentalni dio diplomskog rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje, FSB, I. Lučića 1., Zagreb, u kojem su izvedeni pretpokusi navarivanja, pokusi zavarivanja i ispitivanja savijanjem uzoraka te u Laboratoriju za materijalografiju, FSB, I. Lučića 1., Zagreb gdje su pripremljeni i analizirani uzorci za mikro i makrostrukturna ispitivanja.

2 OSNOVE MIG/MAG – STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

STT uređaj za zavarivanje na osnovu trenutnih zahtjeva električnog luka osigurava izlazne parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica se prenosi pomoću sile površinske napetosti između kapljice i kupke. STT uređaj učestalo i precizno kontrolira struju zavarivanja u svim fazama, a optimalne karakteristike luka održavaju se i kod značajnijih promjena dužine slobodnog kraja žice. STT uređaj je u stanju promijeniti i postići zahtijevanu struju zavarivanja u mikrosekundama [1,2].

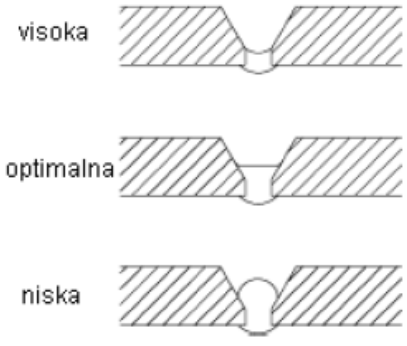
Konstruiran je za poluautomatsku primjenu gdje se brzina zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice mijenjaju. Osim poluautomatske primjene koristi se i za automatska zavarivanja, a može se prilagoditi i za robotsku primjenu. Moguće je koristiti slijedeće zaštitne plinove i njihove mješavine (100 % CO_2, 82 % Ar + 18% CO_2, 100 % Ar, 97.5 % Ar + 2.5 % CO_2, itd.) ovisno o vrsti materijala koji se zavaruje.

Takav način kontrole i održavanja parametara zavarivanja pomoću izvora za zavarivanje omogućuje ugodniji rad zavarivaču koji ne mora održavati točnu duljinu slobodnog kraja žice. STT uređaj za zavarivanje prvenstveno se koristi za zavarivanje korijenskog zavara u grlu žlijeba te se stoga ovaj postupak često primjenjuje u montaži cjevovoda. Ovim postupkom zavarivanja ostvaruje se vrlo kvalitetan zavareni spoj [1,2].

Parametri koji se podešavaju prilikom MIG/MAG – STT postupka zavarivanja i navarivanja su:

a) Vršna struja (eng. Peak current)

Vršna se struja koristi za definiranje duljine luka, te poboljšava vezivanje i fuziju sa stjenkama osnovnog materijala. Na **slici 1.** je prikazan utjecaj vršne struje na geometriju zavara.



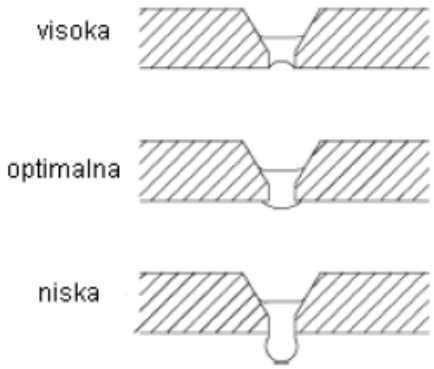
Slika 1. Utjecaj vršne struje na geometriju zavara [3].

Visoka vrijednost vršne struje povećava duljinu električnog luka. Ako je njena vrijednost previsoka kapljice će imati globularni oblik i veći promjer pa je moguća pojava štrcanja materijala. S druge strane, preniska vrijednost vršne struje uzrokuje nestabilnost el. luka. Vrijednost ove struje se mora prilagoditi tako da se postigne minimalno štrcanje i mirnoća luka [3,4].

b) Osnovna struja (eng. Background current)

Osnovna struja osigurava unos topline u zavareni spoj. Ovom se strujom utječe na geometriju zavarenog spoja, gdje će prevelika vrijednost osnovne struje uzrokovati veći promjer kapljice i povećano štrcanje. Ako je opet njena vrijednost niska, električni luk je nestabilan i slabije je kvašenje na stranicama žlijeba [3,4].

To je slično kao kod uređaja s ravnom karakteristikom izvora struje zavarivanja kada se zavaruje s niskom vrijednosti napona. Na **slici 2.** je prikazan utjecaj osnovne struje na geometriju zavara.



Slika 2. Utjecaj osnovne struje na geometriju zavara [3].

c) Topli start (eng. Hot start)

Ovaj parametar kod MIG/MAG – STT postupka zavarivanja omogućuje lakše uspostavljanje električnog luka te povećava unos topline pri uspostavljanju električnog luka kako bi se izbjeglo hladno naljepljivanje, jer je radni komad hladan [4].

d) Brzina pada struje (eng. Tail – out speed)

Osigurava dodatni unos topline, a da pri tome rastaljene kapljice ne postaju prevelike. Duljina električnog luka također se ne mijenja. Povećanjem se omogućuje veća brzina

zavarivanja i poboljšava kvašenje. Za veće vrijednosti parametara brzina pada struje vrijednosti vršne i osnovne struje se smanjuju [4].

e) Brzina dodavanja žice

Utječe na količinu rastaljenog materijala. Neovisna je i posebno se definira, pa ne utječe na vrijednosti vršne i osnovne struje zavarivanja [3].

f) Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, oblik zavara s korijenske strane, naličje zavara je konkavno i uže, a veća je i visina zavara. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi, ima manju visinu, tanak je, a povećava se i štrcanje rastaljenog materijala [3,5].

g) Protok (količina) zaštitnog plina

Ako je premali protok zaštitnog plina koji štiti talinu zavara dolazi do poroznosti u zavaru, prevelik protok zaštitnog plina stvara jaku struju izlazećeg plina čime se razara zaštitni plinski omotač pa je opet moguća pojava poroznosti u zavaru. Protok zaštitnog plina se određuje prema jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, mjestu i uvjetima rada [5].

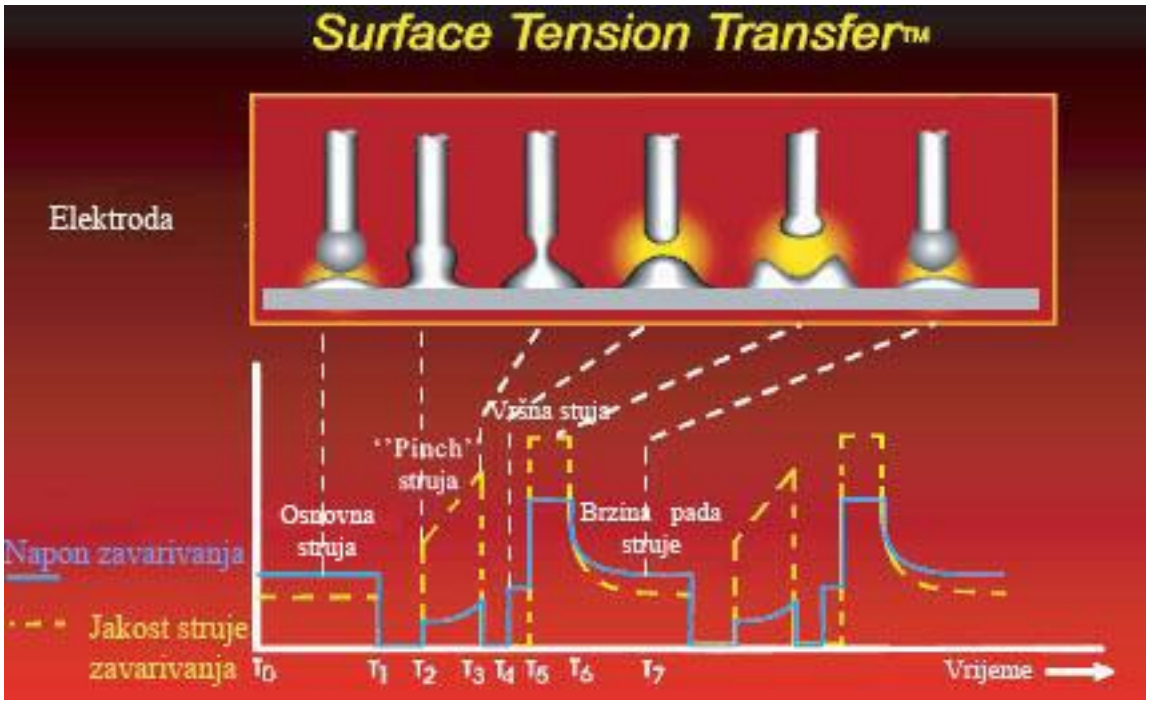
Neke od prednosti MIG/MAG – STT postupka zavarivanja [1,2,6,7]:

- velika brzina zavarivanja, veća produktivnost u usporedbi s ostalim postupcima (posebno u usporedbi s TIG postupkom),
- manji unos topline u usporedbi s TIG postupkom,
- manje deformacije materijala zbog manjeg unosa topline,
- mogućnost zavarivanja različitih vrsta materijala,
- smanjena mogućnost hladnog naljepljivanja,
- manji broj prekida zavarivanja, a time i manja mogućnost pojave grešaka,
- dobra kontrola rastaljene kupke,
- manje štrcanja i kraće vrijeme čišćenja zavara,
- mogućnost korištenja mješavina plinova (100 % CO_2, 82 % Ar + 18% CO_2, itd.)
- smanjena emisija dimnih plinova,
- povoljniji uvjeti rada za zavarivača i brže usavršavanje zavarivača,
- smanjeno odvođenje topline i zračenje zbog manjeg unosa topline u radni komad.

Neki od nedostataka MIG/MAG – STT postupka zavarivanja [1,2]:

- relativno visoka cijena opreme za MIG/MAG – STT zavarivanje u usporedbi s klasičnim MIG/MAG postupkom,
- ograničena primjena zbog samo jednog načina prijenosa metala,
- nemogućnost zavarivanja aluminija,
- prednosti ovog postupka dolaze do punog izražaja tek u odgovarajućoj kombinaciji s ostalim visokoučinskim postupcima zavarivanja za popunu žlijeba za zavarivanje.

Proces zavarivanja odvija se ciklički, a postavljanjem ispravnih parametara zavarivanja osiguravaju se stabilnost električnog luka, stabilnost cjelokupnog procesa zavarivanja te ponovljivost procesa zavarivanja. Kao što je ranije navedeno struja zavarivanja se mijenja u mikrosekundama, ovisno o iznosu napona u električnom luku, a napon ovisi o promjeni veličine kapljice [2]. Na **slici 3.** su prikazane promjene parametara u električnom luku prilikom MIG/MAG – STT postupka zavarivanja.



Slika 3. Promjene parametara MIG/MAG – STT zavarivanja [1,2,6].

Vremenski interval od T_0 do T_7 predstavlja jedan ciklus koji se ponavlja tijekom zavarivanja MIG/MAG – STT postupkom stotinjak puta u sekundi. U svakom tom ciklusu se odvoji po jedna kapljica tj. nastane po jedan kratki spoj.

Slijedećih šest koraka koji su ilustrirani na **slici 3.** prikazuju princip rada MIG/MAG – STT postupka tj. promjene parametara tijekom MIG/MAG – STT postupka zavarivanja [1,2]:

- *Vrijeme T_0 do T_1:* trajanje osnovne struje koja se održava do uspostavljanja kratkog spoja. Iznos osnovne struje iznosi od 50 do 100 A. U ovom koraku elektroda prilazi radnom komadu.
- *Vrijeme T_1 do T_2:* prije nego žica (elektroda) završi kratki spoj uređaj registrira pad napona te automatski smanjuje jakost struje zavarivanja. Osnovna struja se smanjuje na 10 A u vremenskom intervalu od otprilike 0,75 milisekunda. U ovom koraku nastaje rastaljena kapljica.
- *Vrijeme T_2 do T_3:* žica se i dalje dodaje. Da bi se omogućio prijenos rastaljene kapljice u kupku, mora se povećati struja zavarivanja. To se izvodi kontrolirano te ubrzava prijenos rastaljene kapljice u kupku uz pomoć "pinch" efekta te uz pomoć "pinch" struje. U ovom koraku dolazi do odvajanja rastaljene kapljice od elektrode te dolazi do pojave karakterističnog "vrata" na elektrodi.
- *Vrijeme T_3 do T_4:* u točci T_3 kad dU/dT postigne određenu vrijednost, struja zavarivanja se ponovno smanjuje na vrijednost od 50 A u svega nekoliko mikrosekundi. To smanjenje struje zavarivanja događa se prije nego što se je rastaljena kapljica potpuno odvojila od elektrode što sprječava naglo odvajanje kapljice te eksploziju koja izaziva štrcanje rastaljenog metala. U točci T_4 kapljica se je odvojila od elektrode, ali pri nižoj struji te se je ponovno uspostavio električni luk.
- *Vrijeme T_5 do T_6:* ovaj korak slijedi odmah nakon što je kapljica prenesena u rastaljenu kupku uz pomoć sila površinske napetosti. Jakost struje zavarivanja se povećava te se elektroda brzo zagrijava.
- *Vrijeme T_6 do T_7:* u ovom koraku se struja zavarivanja smanjuje s vrijednosti vršne struje na vrijednost osnovne struje zavarivanja. Ovaj korak se naziva još i brzina pada struje (eng. tail – out speed). Nakon toga ciklus je završen pa automatski kreće novi ciklus.

Na **slici 4.** je prikazan MIG/MAG – STT postupak uz objašnjenje svake prikazane slike [1,7].

a) ***b)*** ***c)*** ***d)*** ***e)***

Slika 4. Prijenos dodatnog materijala kod MIG/MAG – STT postupka [7].

a) STT sklopovlje na početku stvara jednoličnu rastaljenu kapljicu koju održava u tom stanju sve dok kapljica ne dođe u kontakt s rastaljenom kupkom,

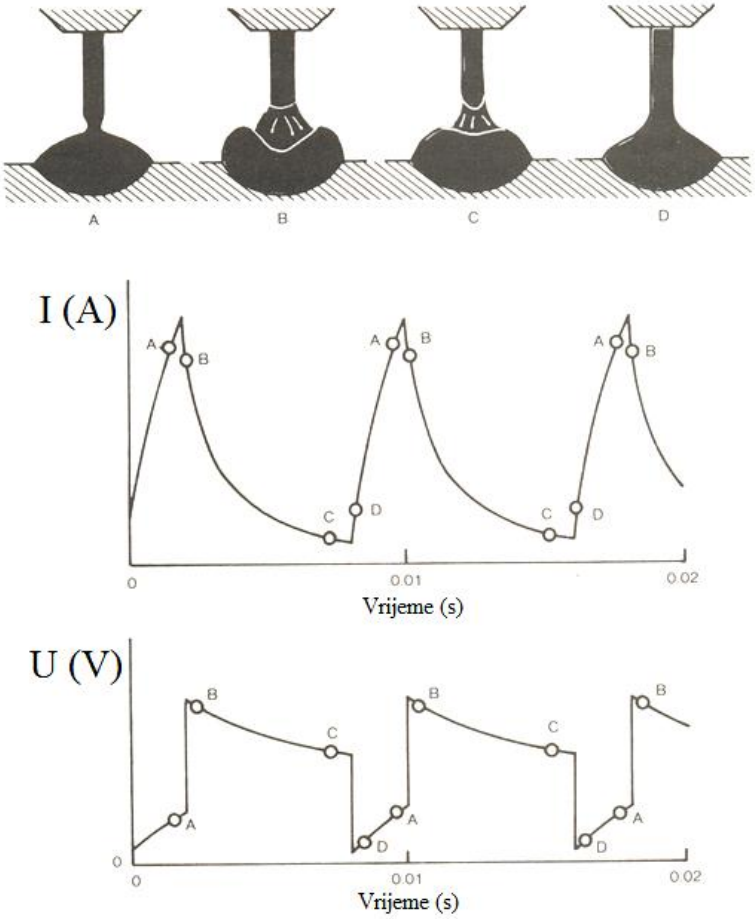
b) Kada kapljica dođe u kontakt s rastaljenom kupkom, struja zavarivanja se smanjuje na niži iznos što omogućuje "mirniji" prelazak rastaljene kapljice u kupku,

c) U ovom koraku se automatski uključuje precizna "pinch" struja (eng. pinch current) koja se primjenjuje kako bi se ubrzao prijenos rastaljene kapljice u kupku, te specijalno sklopovlje osigurava stabilnost luka s istodobnim smanjivanjem štrcanja uz pomoć precizne kontrole struje,

d) STT sklopovlje ponovno uspostavlja električni luk s nižim iznosom struje,

e) STT sklopovlje reagira na ponovno uspostavljeni električni luk te automatski uključuje vršnu struju koja određuje odgovarajuću duljinu električnog luka. Nakon toga sklopovlje automatski prebacuje na osnovnu struju koja služi kao bolji regulator unosa topline.

Da bi se lakše uočila razlika između prijenosa materijala kod MAG postupka zavarivanja kratkim spojevima i MIG/MAG – STT postupka, **slika 5.** prikazuje prijenos dodatnog materijala kratkim spojevima kod MIG/MAG postupka.



Slika 5. Prijenos dodatnog materijala kratkim spojevima kod MIG/MAG postupka [8].

Napon luka prilikom prijenosa dodatnog materijala kratkim spojevima iznosi 13 do 21 V dok jakost struje iznosi 50 do 170 A. Prijenos dodatnog materijala kratkim spojevima karakterizira kratkotrajni prekid električnog luka, odnosno kratkotrajne pojave električnog luka. Takav prijenos odvija se formiranjem kapljice na vrhu žice gdje je promjer kapljice veći od promjera žice. Kapljica raste uz održavanje luka. U određenom trenutku kapljica je tolika da se spoji sa talinom na mjestu zavarivanja. Nastaje kratki spoj s prekidom luka te počinje odvajanje kapljice u talinu zavara s ponovnom pojavom električnog luka. Proces se odvija u dijelovima sekunde. U trenutku kratkog spoja električni luk se gasi, a jakost struje povećava pa se i tako pospješuje odvajanje kapljice u talinu zavara [5,9].

3 USPOREDBA MIG/MAG – STT POSTUPKA I MIG/MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA

Kao što je i ranije bilo navedeno, prednosti MIG/MAG – STT postupka zavarivanja u odnosu na MIG/MAG postupak zavarivanja su velike. Na **slici 6.** je prikazan postupak zavarivanja s istom žicom (Ø 1,2 mm) i istim zaštitnim plinom (100 % CO_2) tj. na slici a) je MAG postupak s prijenosom materijala kratkim spojevima, a na slici b) je MAG – STT postupak zavarivanja. Vidi se da uz pravilno odabrane parametre MAG – STT postupak ima puno manje štrcanja rastaljenog materijala nego MAG postupak, te je samim time potrebno i kraće vrijeme čišćenja radnog komada. Također se smanjuje količina nastalih metalnih para, isijavanja topline i zračenje što povoljnije utječe na zavarivača [1,2,6].

a) MAG postupak b) MAG – STT postupak

Slika 6. Štrcanje materijala kod MAG i MAG – STT postupka zavarivanja [10].

Osim gore navedenog, prednost MIG/MAG – STT postupka je i u manjem unosu topline pa su time pojave deformacija radnog komada puno manje. MIG/MAG – STT postupak u odnosu na MIG/MAG postupak omogućuje preciznije upravljanje strujom zavarivanja koja je neovisna o brzini žice [4]. To omogućuje bolju kontrolu električnog luka te bolju penetraciju. Općenito MIG/MAG – STT postupak ima bolju kvalitetu zavara u odnosu na ostale postupke zavarivanja u svim položajima zavarivanja, a posebno je olakšano zavarivanje korijena cijevi okomito prema dolje npr. prilikom izgradnje cjevovoda. Mogućnost korištenja zaštitnog plina 100 % CO_2 kod konstrukcijskih čelika bez pojave štrcanja i ostalih gore navedenih prednosti također smanjuje troškove zavarivanja. Osim kod konstrukcijskih čelika MIG/MAG – STT postupak je primjenjiv i kod zavarivanja nehrđajućih čelika, legura nikla (petrokemijska i prehrambena industrija), bronci legiranih silicijem

(autoindustrija) te galvaniziranih čelika. Prilagodba robotskom i automatskom načinu rada je moguća što mu povećava upotrebu u različitim granama industrije [1,7,10].

U **tablici 1.** su prikazane sve prednosti i nedostatci MIG/MAG – STT postupka u odnosu na MIG/MAG postupak zavarivanja (zavarivanje kratkim spojevima), kao i ostali podaci vezani za pojedini postupak.

Tablica 1. Usporedba MIG/MAG i MIG/MAG – STT postupka zavarivanja [1].

	MIG/MAG postupak	**MIG/MAG – STT postupak**
Način prijenosa materijala	kratkim spojevima	modificirani el. luk s mogućnosti promjene napona i struje u ovisnosti o luku
Napon zavarivanja	16 V do 22 V	16 V do 22 V
Struja zavarivanja	30 A do 200 A	- vršna struja (do 450 A) - osnovna struja (do 125 A)
Promjer žice za zavarivanje	0,60 mm do 1,20 mm	0,9 mm do 1,20mm
Prednosti	- zavarivanje u svim položajima - niski troškovi	- mali unos topline - kontrolirani unos topline - zavarivanje u svim položajima - minimalno štrcanje - smanjen nastanak metalnih para - niži troškovi zaštitnih plinova - dobra fuzija
Nedostaci	- štrcanje - otežano zavarivanje tanjih materijala	- skuplja oprema - ograničen na modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima
Cijena uređaja	oko 3000 $	oko 6000 $
Materijali koji se mogu zavarivati	- konstrukcijski i nisko legirani čelici - galvanizirani/pocinčani čelici - nehrđajući čelici i niklove legure - bronca legirana silicijem i legure bakra	- konstrukcijski i nisko legirani čelici - galvanizirani/pocinčani čelici (smanjeno izgaranje prevlake) - nehrđajući čelici i niklove legure (sa smanjenim štrcanjem) - bronca legirana silicijem i legure bakra
Primjena u industriji	- automobilska industrija - prehrambena i kemijska industrija - itd.	- automobilska industrija - cjevovodi i posude pod tlakom - prehrambena i kemijska industrija - tanji materijali

4 NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelici predstavljeni su početkom 20. stoljeća kao rezultat istraživanja u Engleskoj i Njemačkoj. Oni sadrže najmanje 12 % Cr sa ili bez dodatka ostalih legirajućih elemenata (Ni, Mo, W, Ti, Al, itd.) [11,12]. Krom je alfageni element koji stabilizira i širi područje ferita, a smanjuje područje austenita. Pored Cr alfageni elementi su i Mo, Si, V, Nb, Ti, Al i W. Gamageni elementi Ni, Mn, C, N i Cu proširuju područje austenita, a smanjuju područje ferita [12]. Svojstva Cr čelika ovise o kemijskom sastavu, režimima toplinske obrade kao i o temperaturi i vijeku eksploatacije. Krhkost pri 475 ^{o}C javlja se pri zagrijavanju čelika s 15 – 70 % Cr na 400 – 540 ^{o}C , a naročito na 475 ^{o}C. Ako se čeliku doda Ti i Nb oslabit će pojava krhkosti kod 475 ^{o}C [12]. Nehrđajući čelici mogu biti austenitni, feritni, martenzitni, dupleks i precipitacijski očvrsnuti čelici [13,14].

4.1 Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni Cr – Ni čelici sadrže 12 do 25 % Cr i 8 do 25 % Ni. Nikl je izrazito γ – geni element. Nema faznih transformacija prilikom hlađenja pa se struktura ne može toplinskom obradom zakaljivati, ni usitnjavati zrno npr. normalizacijom. Austenitni čelici imaju F.C.C. (eng. Face Centered Cubic) kristalnu rešetku što daje materijalu dobru žilavost [12].

Karakterizira ih odlična korozijska otpornost, dobra svojstva kod niskih temperatura, nemagnetičnost, itd. Zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, izvrsne zavarljivosti, dobrih mehaničkih svojstava te estetskih karakteristika najčešće su korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije, u strojarstvu, građevinarstvu, za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta.

Osnovni austenitni nehrdajući čelik je UNS S30400 (AISI 304). To je legura na osnovi željeza koja sadrži nominalno 18 % Cr i 8 % Ni uključujući manje količine C, N, Mn i Si. Od osnovnog austenitnog čelika razvijeno je desetak novih legura, a one se baziraju na dodavanju npr. Mo i N radi bolje otpornosti na koroziju ili Ti, Nb i Ta za postizanje stabilizacije austenitnih čelika [13].

Utjecaj pojedinih kemijskih elemenata u austenitnim Cr – Ni čelicima prikazan je u **tablici 2.**

Tablica 2. Utjecaj pojedinih kemijskih elemenata na svojstva austenitnih Cr – Ni čelika [12].

Kemijski element	Stvara strukturu	Svojstva
C	Austenit	Trideset puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati $Cr_{23}C_6$ i uzrokovati interkristalnu koroziju – IKK.
Cr	Ferit	Poboljšava otpornost prema koroziji i oksidaciji.
Ni	Austenit	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost Ni. (γ – gen)
N	Austenit	Trideset puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povisuje čvrstoću. Pomaže stvaranju ferita.
Nb	-	Dodaje se čeliku min Nb ≥ 8 x % C da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mn	Austenit	Spriječava vruće pukotine stvaranjem MnS. γ – gen
Mo	Ferit	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita (α – gen)
P, S, Se	-	Olakšava obradu odvajanjem čestica. Pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.
Si	Ferit	Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji). Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije. Pomaže stvaranje ferita.
Ti	-	Dodaje se čeliku Ti ≥ 5 x % C da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna. Pomaže stvaranje ferita.

Njihovu upotrebu donekle otežava mogućnost pojave senzibilizacije austenita prilikom postupka zavarivanja tj. stvaranja uvjeta za formiranje $Cr_{23}C_6$ karbida po granicama zrna prilikom ohlađivanja iz temperaturnog intervala od 800 do 550 ^oC. To može imati za posljedicu pojavu interkristalne korozije koja se na zavarenim konstrukcijama javljala često u početnom periodu korištenja ovih materijala te je ograničavala njihovu širu primjenu [14].

Jednako tako, ovi materijali nerijetko su podložni i ostalim lokalnim korozijskim oblicima (rupičasta, napetosna, korozija u procjepu) pa odabir pojedine vrste tj. kvalitete austenitnog nehrđajućeg čelika treba pažljivo provesti [13,14].

Izlučivanje karbida $Cr_{23}C_6$ odnosno interkristalnu koroziju možemo spriječiti [12]:

1) Legiranjem karbidotvornim elementima poput Nb, Ti, Ta, koji tvore stabilne karbide. Ovi elementi imaju veći afinitet prema C od Cr, pa će se oni prvo vezati za C, a Cr će ostati jednoliko raspoređen. Stabilizirajući elementi se dodaju prema sadržaju ugljika:

   $(Ti/C) \geq 5$, $(Nb/C) \geq 8$, $(Ta/C) \geq 16$, ili $(Ta+Nb)/C \geq 8$

   Stabilizatori se dodaju u osnovni ili dodatni materijal. Dodatni materijali se stabiliziraju s Nb, jer Ti u električnom luku pri zavarivanju intenzivno i nekontrolirano odgorijeva, dok Nb odgorijeva vrlo malo.

2) Smanjenjem sadržaja ugljika C < 0,03 % (ELC čelici = Extra Low Carbon), karbidi se stvaraju u malim količinama, pa je nepovoljno djelovanje jako smanjeno. Nije moguća korozija po čitavom presjeku.

3) Gašenjem – toplinskom obradom na 1050 do 1100 °C kada se karbidi rastvore, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850 do 450 °C, zadržava se struktura austenita bez izlučenog kroma na granicama zrna vezanog u krom karbid.

4) Malim unošenjem topline. Zavarivati treba sa što manjim unosom topline u osnovni materijal, što se postiže sljedećim mjerama:

   – ne predgrijavati, osim ako se radi o debljim materijalima,
   – temperatura između prolaza treba biti što niža, npr. max. 100 do 150 °C,
   – unos topline treba biti što niži, za konvencionalne postupke vrijedi širina gusjenice $b \leq$ 2,5 x promjer elektrode.

Ove mjere skraćuju vrijeme zadržavanja u intervalu 850 do 450 °C pri hlađenju, kada se mogu izlučivati Cr karbidi. Za pospješenje hlađenja preporuča se ponekad ulaganje predmeta, koji se zavaruju u vodu ili dodatno hlađenje zavarenih spojeva vodom, npr. hlađenje vlažnim krpama i vlažnim četkama. Međutim, kako bi s vodom na radnom mjestu bilo dosta problema, preporuća se upotreba CO_2 plina za hlađenje.

Toplinske operacije, npr. grijanje zbog toplog oblikovanja treba izbjegavati u području 450 do 850 °C. Svi ovi zahtjevi mogu biti ublaženi ili ih se ne treba pridržavati ako je čelik stabiliziran s Ti, Nb ili Ta ili ima nizak sadržaj ugljika (< 0,03 % C).

Pored karbida i nitrida u nehrđajućim čelicima mogu se izlučivati i intermetalne faze koje imaju drugačiju mikrostrukturu te smanjuju istezljivost i otpornost na koroziju. Sigma faze (FeCr) su spojevi metala – intermetalni spojevi, tetragonalne strukture u kojoj su atomi pravilno raspoređeni. Sigma faza nije feromagnetična. Postoji oko 50 raznih sigma faza od kojih je najpoznatija željezo – krom sigma faza sa kemijskom formulom FeCr i s oko 48 % Cr. Vrlo je tvrda i krhka (HV = 1000 HV). Veći sadržaj Cr, a naročito > 20 % Cr, daje veću vjerojatnost pojave sigma faze. Kinetika izlučivanja sigma faze je veoma važna za svojstva i pouzdananost zavarenog spoja, bilo da se radi o toplinskoj obradi ili o dugotrajnoj eksploataciji na visokim temperaturama. Također i pri hlađenju zavarenog spoja može doći do pojave sigma faze. Vjerojatnija je pojava sigma faza pri zagrijavanju dužem od 20 h u području od 600 do 830 °C i to iz feritne faze, no može nastati i iz čistog austenita. Izlučivanje je brže u feritnoj nego u austenitnoj strukturi. Pri hlađenju se sigma faza izlučuje na temperaturi ispod 830 °C. Na stvaranje sigma faze bitno utječe mogućnost difuzije Cr jer je potrebno da se sadržaj kroma lokalno poveća od oko 20 % Cr na oko 48 %. Kod nehrđajućih čelika sigma faza se izlučuje u pravilu kada je sadržaj Cr veći od 16 %. Sigma faza uzrokuje pad žilavosti i istezljivosti, a može uzrokovati i smanjenje antikorozivnosti. Toplinskom obradom na 1200 °C sigma faza prelazi u austenit ili ferit, no na visokoj temperaturi možemo očekivati pogrubljenje zrna. Već i kratkim zagrijavanjem od samo 10 min na 1050 °C osjetno se smanjuje krhkost. Pogrubljenje zrna se javlja pri većim toplinskim unosima i dugim zadržavanjem na visokim temperaturama, a posebno iznad 1150 ºC [12].

Pored sigma faze javlja se intermetalni spoj χ faza ($Fe_{36}Cr_{12}Mo_{12}$). Veći sadržaj Cr daje veću sklonost stvaranju krhkih faza. Uočavamo da neki elementi čak jače od Cr djeluju na izlučivanje krhkih faza, a jedino Ni i Co djeluju usporavajuće na izlučivanje krhkih faza. Prisustvo C, uzrokuje stvaranje $M_{23}C_6$, pa je okolina osiromašena na Cr, koji je sastavni dio sigma faze. Potrebna je dodatna difuzija Cr u ta osiromašena područja da bi došlo do stvaranja sigma faze. Kod stabiliziranih čelika je usporavajući utjecaj C na stvaranje intermetalnih spojeva smanjen. Stoga su stabilizirani čelici skloniji povećanju krhkosti. Slično je i s čelicima koji sadrže malo C (LC, ELC … < 0,03 % C). Visok sadržaj Cr, vrlo nizak sadržaj

ugljika ili stabiliziran čelik, te visok sadržaj delta ferita pojačavaju izlučivanje sigma faze. Sadržaj dušika djeluje slično kao i sadržaj ugljika [12].

Još jedan problem koji se javlja kod stabiliziranih čelika nakon zagrijavanja u području 500 do 700 ^{o}C (npr. pri toplinskoj obradi) je korozija u oblika ureza nožem (eng. knife line corrosion) [12]. Kod zavarivanja čelika stabiliziranih Ti i Nb u ZUT – u, npr. kod zavarivanja u više prolaza, dolazi do ponovnog otapanja ugljika u krutini koji je bio vezan s Ti i Nb u karbide. Do korozije će doći samo ponovnim zagrijavanjem na 500 do 700 ^{o}C. Korozijski napad se javlja u uskom području ZUT – u koje je bilo zagrijano iznad 1300 ^{o}C. U toj uskoj zoni se raspada Nb ili Ti karbid. Pri brzom hlađenju (brzom prolasku kroz područje 850 do 450 ^{o}C ili uže 700 do 500 ^{o}C ili još uže 650 – 550 ^{o}C) samo će se možda mali dio karbida NbC ili TiC ponovo stvoriti, a ostatak Nb, Ti i C ostaje otopljen u krutini. Ponovnim zagrijavanjem na 500 do 700 ^{o}C zone koja je prethodno bila zagrijana na 1300 ^{o}C izlučivat će se $M_{23}C_6$ kromom bogati karbid. On će uzrokovati interkristalnu koroziju u obliku linije – uske zone, pa se zato naziva "korozija u obliku ureza nožem". Uska zona (> 1300 ^{o}C) se javlja neposredno uz granicu taljenja u ZUT – u, u zoni taljenja (ZT) kod više prolaza, ili u ZUT – u kod jednog prolaza, koji djeluje na drugi, ranije položeni prolaz.

Pojava interkristalne korozije u obliku ureza nožem je moguća samo na čelicima stabiliziranim Nb ili Ti. Izbjeći se može smanjivanjem C < 0,04 % uz istovremeno stabiliziranje više nego je stehiometrijski potrebno (Ti = 8 x C, Nb = 15 x C). Ako je dodatni materijal otporan na noževu koroziju, a osnovni materijal nije, može doći do korozije u obliku ureza nožem u ZUT – u na osnovnom materijalu.

Osim svega gore navedenog postoji opasnost i od vrućih pukotina. Ovisno o kemijskom sastavu, prema Schaefflerovom dijagramu možemo u depozitu postići čistu austenitnu ili austenitno – feritnu strukturu. Preporuča se upotreba takvih austenitnih dodatnih materijala, koji daju depozit s 3 do 12 % δ – ferita (ASME standard 5 do 12 %), čime postižemo veću otpornost vrućim pukotinama. Potpuno austenitna struktura depozita je sklonija pojavi vrućih pukotina.

Vrste vrućih pukotina su [12]:

a) Kristalizacijske pukotine u ZT (eng. solidification cracks) koje nastaju pri skrućivanju ZT kada je između dendritnih kristala još prisutna rastaljena faza.
b) Vruće pukotine ZUT: u osnovnom materijalu ili u ZT kod zavarivanja u više prolaza (eng. liquation cracks, fissures, micro cracks). U ZUT uz ZT dolazi do taljenja niskotaljivih faza izlučenih na granicama zrna kristala. Ista pojava se može dogoditi u ZT pri polaganju više prolaza u donjem prolazu kada se povrh njega polaže drugi prolaz.

Naime, glavni razlog pojave kristalizacijskih pukotina je prisustvo filma niskotaljivih faza na granicama kristala pri primarnoj kristalizaciji. Kod stezanja pri hlađenju javljaju se na granici kristala mikropukotine u unutrašnjosti prolaza, koji se pri daljem hlađenju obično šire i izlaze na površinu kao makro pukotine. Širenje pukotine ovisi o stanju naprezanja i svojstvima materijala uz vrh početne pukotine.

Pukotine zbog korozije uz naprezanje mogu se javiti u eksploataciji, ako su prisutni agresivni mediji. Za austenitne čelike su kloridi najopasniji, stoga sadržaj Cl treba biti nizak. Već nekoliko ppm Cl na površini austenitnog čelika može dovesti do pukotina zbog korozije uz naprezanje.

Sumporni spojevi ili sumporna atmosfera (u peći) pri visokim temperaturama (npr. ZUT) može uzrokovati stvaranje nikl – sulfida Ni_3S_2, eutektika koja uzrokuje vruće pukotine. Treba čistiti površine prije zavarivanja ili toplinske obrade od materija koje sadrže S.

Kemijski sastav austenitnih nehrđajućih čelika je [14]:

- maseni udio ugljika treba biti što niži (< 0,15 % C) jer je onda manja opasnost od stvaranja karbida tipa ($Cr_{23}C_6$),
- maseni udio Cr što viši (više od 18 %), zbog uvjeta antikorozivnosti,
- maseni udio Ni što viši (više od 8 %) jer je Ni gamageni element koji mora prevladati alfageno djelovanje Cr, tako da nastane austenitna mikrostruktura,
- moguće je dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta koji pospješuju pojavu 5 do 10 % ferita u mikrostrukturi ili djeluju stabilizirajuće kod opasnosti od interkristalne korozije,
- povišen maseni udio dušika (0,2 do 0,4 %) djeluje naročito na povišenje čvrstoće te na otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju.

Neka od svojstava austenitnih nehrđajućih čelika su [14]:

- nemagnetični su zbog austenitne strukture,
- dobro oblikovljivi u hladnom stanju (visoka A_5, Z i KV, a niska R_e i R_m), a hladnom deformacijom mogu očvrsnuti (vučena žica ili hladnovaljane trake),
- uz dodatno legiranje s Mo, W i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama > 600 ºC,
- zbog zadovoljavajuće žilavosti pri sniženim temperaturama primjenjuju se teorijski do – 273 ºC,
- otporni na organske i anorganske kiseline, lužine i soli,
- u određenim uvjetima podložni su interkristalnoj koroziji (IKK).

5 ZAVARIVANJE AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Austenitni nehrđajući čelici smatraju se najbolje zavarljivim među postojećim nehrđajućim čelicima. Nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline (ZUT). U odnosu na ostale vrste nehrđajućih čelika imaju znatno veće produljenje i žilavost. Manje se koriste za zavarene konstrukcije, a više u energetici i kemijskoj industriji kod posuda za pripremu ili rezervoara za ukapljene plinove. Od legiranih čelika se razlikuju po tome što imaju lošiju provodljivost i veći koeficijent toplinskog izduženja. To znači da prilikom zavarivanja nastaju veća naprezanja u materijalu. Važno je napomenuti da ih nije potrebno predgrijavati prije zavarivanja. Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije Cr karbida u temperaturnom rasponu od 550 do 800 °C što može dovesti do pojave interkristalne korozije. Zavarljivost ovih čelika traži odgovarajuću tehnološku razinu i disciplinu, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Visoki koeficijent toplinske rastezljivosti te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću deformacijama kao posljedicom zavarivanja. Taj problem se rješava što manjim unošenjem dodatnog materijala, energije i redoslijedom zavarivanja. Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara, što se javlja s jedne strane kao posljedica nečistoća u materijalu, te uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je danas uglavnom riješen pravilnim odabirom dodatnih materijala (4 do 12 % delta ferita) te samom tehnikom rada kao i ostalim uvjetima zavarivanja [12,13].

Preporuke prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika [12,13]:

- izborom dodatnog materijala osigurati sadržaj δ ferita u metalu zavara u području feritnog broja F_N = 5 do 15. Na taj način se praktički uklanja opasnost od nastanka toplih pukotina. Valja napomenuti da δ – ferit, pri temperaturama od 500 ºC lako prelazi u σ – fazu i izaziva pojavu krhkosti,
- sve površine prije zavarivanja moraju se dobro očistiti i odmastiti,
- električni luk držati što kraćim, što osigurava kvalitetan prijenos metala i dobru zaštitu taline,
- voditi brigu o izboru, vrsti i čistoći zaštitnih plinova i njihovih mješavina koje se koriste pri zavarivanju,

- predgrijavanje nije potrebno, kod debljih komada koristiti predgrijavanje od 100 do 150 ºC,
- međuprolazna temperatura do najviše 150 ºC,
- pri zavarivanju u zaštitnoj atmosferi inertnog plina, primijeniti sekundarnu zaštitu za korijenski dio zavara. To je posebno važno za spojeve, kojima se nakon zavarivanja ne može pristupiti,
- primjenjivati gdje je to moguće dodatne materijale za zavarivanje s niskim sadržajem C,
- zbog izrazitih deformacija koje mogu nastati kao posljedica zavarivanja, koristiti odgovarajući način pripajanja, naprave za stezanje, rezanje, zavarivanje, itd.,
- ravnanje plinskim plamenom se ne preporučuje, zbog opasnosti od smanjenja korozijske otpornosti materijala na tim mjestima,
- koristiti zavarivački alat, čekić, četku, itd. isključivo od nehrđajućeg Cr ili Cr – Ni čelika.

Čišćenje površine je vrlo važno za kvalitetu zavarenog spoja i provodi se pomoću [12]:

- četke (obične ili rotirajuće) od nehrđajućeg austenitnog čelika,
- pjeskarenjem čistim pijeskom. Ne treba koristiti isti pijesak kojim je čišćen obični čelik jer sadrži čestice ovog čelika,
- pri obradi odvajanjem čestica ili brušenjem alat ne mora biti od nehrđajućeg austenitnog čelika. Sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor,
- kemijskim čišćenjem – nagrizanje se preporučuje u 10 do 20 % HNO_3, a posebno nakon toplinskih operacija. Odmašćivanje osnovnog i dodatnog materijala prije zavarivanja je neophodno kao i odstranjivanje čestica i tragova od premaza i oznaka bojama i markerima. Posebno su opasni halogeni elementi Cl, F, zatim S i niskotaljive legure (Bi, Pb) i metali zbog moguće pojave pukotina i napetosne korozije.

5.1 Moguće primjene MIG/MAG – STT postupka

Zavarivanje kratkim spojevima je postupak prijenosa materijala kod MIG/MAG postupka zavarivanja, a karakterizira ga nizak napon luka (13 do 21 V) te manja struja el. luka (50 do 170 A) kao što je prije navedeno u tekstu [5]. Time se postiže mali unos topline što rezultira malom penetracijom i nedostatcima u spajanju materijala. Mali unos topline je pogodan za zavarivanje tanjih limova i korijenskog prolaza kod debljih limova i cijevi dok se popunjavanje žlijeba izvodi s većim parametrima zavarivanja. Povećavanjem jakosti struje zavarivanja koja se podešava brzinom dovoda žice, poboljšava se penetracija, ali se povećava unos topline. Takvi parametri zahtijevaju od zavarivača veliko iskustvo da bi dobili odgovarajuću kvalitetu korijenskog zavara. Zavarivač mora paziti da napravi kvalitetni korijenski prolaz, a da materijal ne progori. Ako je ostavljen razmak u grlu žlijeba, korijen zavara se izvodi tako da nema potrebe zavarivanja s druge strane, što je primjer kod zavarivanja cijevi jer je u većini slučajeva nemoguće izvesti zavarivanje u unutrašnjosti cijevi. Ako ne ostavljamo razmak nužno je izvesti zavarivanje sa suprotne strane. Ostavljanje razmaka između cijevi prilikom zavarivanja korijena zavara je ograničeno kod MIG/MAG postupka pa ako postoji vertikalni pomak između spoja neće doći do kvalitetno izvedenog korijenskog prolaza. MIG/MAG – STT postupak dozvoljava veći razmak materijala prilikom zavarivanja korijena do čak 5 mm te tolerira i veći vertikalni pomak između spoja. MIG/MAG – STT postupak zavarivanja radi na način da se vršna struja koristi u strogo određenom intervalu te uspostavlja dužinu luka i zagrijava osnovni materijal. Struja se tada prebaci na osnovnu struju gdje se kontrolira zagrijavanje taline. Ako je talina previše zagrijana, može doći do progaranja materijala što se sprječava kod MIG/MAG – STT postupka te ne dolazi do curenja taline pa se time omogućava rad prilikom zavarivanja cijevi okomito prema dolje. MIG/MAG – STT postupak zavarivanja dozvoljava razmak u korijenskom zavarivanju cijevi, znatno olakšava rad zavarivaču, omogućava bolje spajanje rubova korijena zavara uz manje štrcanja i uz smanjenu emisiju dimnih plinova [10]. Osim gore navedenog, MIG/MAG – STT postupkom može se izvesti zavarivanje korijena brže nego MIG/MAG postupkom, sa smanjenim unosom topline i bez nedostatka fuzije. U praksi, nakon izvedenog korijenskog prolaza MIG/MAG – STT postupkom, popunjavanje žlijeba se izvodi MIG/MAG postupkom. MIG/MAG – STT postupak stvara minimalnu širinu zone utjecaja topline (ZUT). Unos topline kod MIG/MAG – STT postupka zavarivanja iznosi u prosjeku do max. 5 kJ/cm što je 2 do 3 puta manje nego kod ostalih postupaka zavarivanja te se u tome vidi njegova pogodnost prilikom zavarivanja tanjih limova i cijevi te korijenskih prolaza [10].

6 EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela je na odgovarajućim uzorcima odrediti utjecaj pojedinih parametara zavarivanja na svojstva zavarenog spoja u kombinaciji s različitim zaštitnim plinovima i njihovim mješavinama. Također su provedena ispitivanja mikrostrukturnih, makrostrukturnih i mehaničkih svojstava zavarenih spojeva.

Na početku eksperimentalnog dijela obrađen je osnovni i dodatni materijal koji je korišten pri navarivanju i zavarivanju ispitnih uzoraka. Prikazana su mehanička svojstva i kemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala te je svaki posebno opisan. Nakon toga, prikazana je oprema koja se nalazi u Laboratoriju za zavarivanje s kojom su rađeni pokusi navarivanja i zavarivanja. Prije pretpokusa navarivanja i pokusa zavarivanja opisan je plan pretpokusa i pokusa gdje se opisuje što i kako će se raditi u pretpokusima navarivanja i pokusima zavarivanja.

Nakon izvedenog pretpokusa navarivanja odabrani su optimalni parametri za pokuse zavarivanja. Ukupno je izvedeno deset pokusa zavarivanja na temelju kojih su kasnije izvedena ispitivanja mikrostrukturnih, makrostrukturnih i mehaničkih svojstava zavarenih spojeva.

Ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva izvedena su u Laboratoriju za zavarivanje, na napravi sa savijanje, gdje je izvođeno savijanje uzoraka dobivenih nakon izvedenih pokusa zavarivanja na korijen i na lice zavara.

Ispitivanja mikrostrukturnih i makrostrukturnih svojstava zavarenih spojeva izvedena su na odgovarajućim uzorcima u Laboratoriju za materijalografiju.

Nakon provedenih mikrostrukturnih ispitivanja zavarenih uzoraka dobiven je uvid u mikrostrukturu svakog zavarenog spoja te se uz pomoć njih mogu uočiti određene pogreške u zavarenom spoju na mikroskopskom nivou (npr. čvrsti uključci). Makrostrukturna ispitivanja služe za dobivanje geometrijskih karakteristika zavarenih spojeva te kao pomoć pri otkrivanju određenih pogrešaka u zavarenom spoju (npr. pojava ugorina uz zavar).

6.1 Osnovni materijal

Oznake osnovnog materijala su: AISI 316 Ti (UNS S31635) tj. X6CrNiMoTi 17 – 12 – 2 / EN 10028 – 7 ima W. Nr. prema DIN – u: **1.4571** [14, 15].

Kemijski sastav osnovnog materijala prikazan je u **tablici 3.**, a mehanička svojstva osnovnog materijala prikazana su u **tablici 4.**

Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala [15].

KEMIJSKI SASTAV ; X6CrNiMoTi 17 – 12 – 2 / EN 10028-7										
Kemijski element [%]	C	Mn	Si	S	N	P	Cr	Mo	Ni	Ti
Min.	-	-	-	-	-	-	16	2	10	5x%(C+N)
Max.	0,08	2	0,75	0,030	0,10	0,045	18	3	14	0,70

Tablica 4. Mehanička svojstva osnovnog materijala [15].

MEHANIČKA SVOJSTVA ; X6CrNiMoTi 17 – 12 – 2 / EN 10028-7	
Granica tečenja [$Rp_{0,2}$]	≥ 200 [MPa]
Granica tečenja [Rp_1]	≥ 235 [MPa]
Vlačna čvrstoća [*Rm*]	500 do 700 [MPa]
Tvrdoća [*HB* 30]	≤ 215 [HRC]
Istezanje [A_5] (L_o= 5 d_o)	40 uzdužno / 30 okomito [%] *
Udarna radnja loma [*KV*]	100 uzdužno / 30 okomito [J] *

* na smjer valjanja

Austenitni nehrđajući čelik AISI 316 Ti legira se s Ti te ima veću otpornost na opću i jamičastu koroziju od standardnih Cr – Ni austenitnih čelika poput čelika AISI 304. Također, ima bolja mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. Otporniji su na pojavu senzibilizacije austenita tj. stvaranja uvjeta za formiranje $Cr_{23}C_6$ karbida po granicama zrna prilikom ohlađivanja iz temperaturnog intervala od 800 do 550 ^oC što se npr. javlja prilikom ohlađivanja nakon izvedenog postupka zavarivanja [11,14].

Povećana otpornost prema senzibilizaciji austenita dobivena je legiranjem s Ti jer Ti je jači karbidotvorac od Cr pa nastaju Ti – karbidi, a ne opasni $Cr_{23}C_6$ koji bi osiromašio

područja uz granice zrna na kromu nakon čega ta granična područja više ne ispunjavaju nužne uvjete postojanosti na koroziju čime se stvara predispozicija za interkristalnu koroziju [14].

Debljina osnovnog materijala za navarivanje iznosi 5 mm, a dimenzija ploče za navarivanje iznosi 110 x 240 mm. Osnovni materijal za zavarivanje je također debljine 5 mm, a dimenzije ploča za zavarivanje iznose 130 x 180 mm. Ploče su rezane iz table lima na plazma rezačici.

6.2 Dodatni materijal

U eksperimentalnom djelu izvedeni su pokusi navarivanja i zavarivanja sa žicom promjera Ø 1,2 mm Böhler CN 13/4 – IG čija su mehanička svojstva i kemijski sastav prikazani u donjim tablicama. Odabir dodatnog materijala je izveden prema katalošku odabiru, a provjeren je u Schaeffler – ovom dijagramu.

Dodatni materijal kojim su izvedeni pretpokusi navarivanja i pokusi zavarivanja je:

BÖHLER CN 13/4 – IG (EN ISO 14343-A:2007 G 13 4) [16].

Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je u **tablici 5.**, a mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u **tablici 6.**

Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala [16].

KEMIJSKI SASTAV ; BÖHLER CN 13/4 – IG						
Kemijski element [%]	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Metal zavara	0,01	0,65	0,70	12,2	4,8	0,5

Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala [16].

MEHANIČKA SVOJSTVA ; BÖHLER CN 13/4 – IG	
Granica tečenja [*Re*]	950 [MPa]
Vlačna čvrstoća [*Rm*]	1210 [MPa]
Istezanje [*A*] (L_o= 5 d_o)	min. 20 %
Udarna radnja loma ISO – V [*KV*]	+ 20 [°C] 36 [J]

BÖHLER CN 13/4 – IG je žica s udjelom 13 % Cr i 4 % Ni koja se koristi za MIG/MAG postupak zavarivanja pa ju karakterizira nizak udio ugljika. Kemijski sastav žice je pažljivo odabran, tako da dodavanjem odabranih legirajućih elemenata dobivamo dodatni materijal visoke čvrstoće s vrlo dobrom žilavošću te otpornošću na pojavu pukotina [16].

6.3 Oprema za navarivanje i zavarivanje

Navarivanje i zavarivanje je izvedeno s uređajem Lincoln Electric Invertec STT II te s dodavačem žice Lincoln Electric LF 37. Postupak navarivanja je izveden automatom BUG – O Systems, MOD. BUG – 5300. Automat za navarivanje prikazan je na **slici 7.**, a uređaj za navarivanje/zavarivanje s dodavačem žice prikazan je na **slici 8.**

Slika 7. Automat BUG – O Systems, MOD. BUG – 5300.

Slika 8. Lincoln Electric Invertec STT II i LF 37.

Rezanje ploča osnovnog materijala potrebnog za pokuse navarivanja i zavarivanja izvelo se je na CNC plazma rezačici VANAD PROXIMA 10/200 prikazanoj na **slici 9.**

Slika 9. CNC plazma rezačica VANAD PROXIMA 10/200.

6.4 Plan pretpokusa i pokusa

Kod MIG/MAG – STT postupka potrebno je podesiti više parametara prilikom navarivanja i zavarivanja u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak zavarivanja. Parametri zavarivanja se određuju pomoću literature te provedbom pretpokusa. U postupcima navarivanja i zavarivanja korištene su dvije vrste zaštitnih plinova, argon (100 % Ar) i mješavina plinova (97,5 % Ar + 2,5 % CO_2).

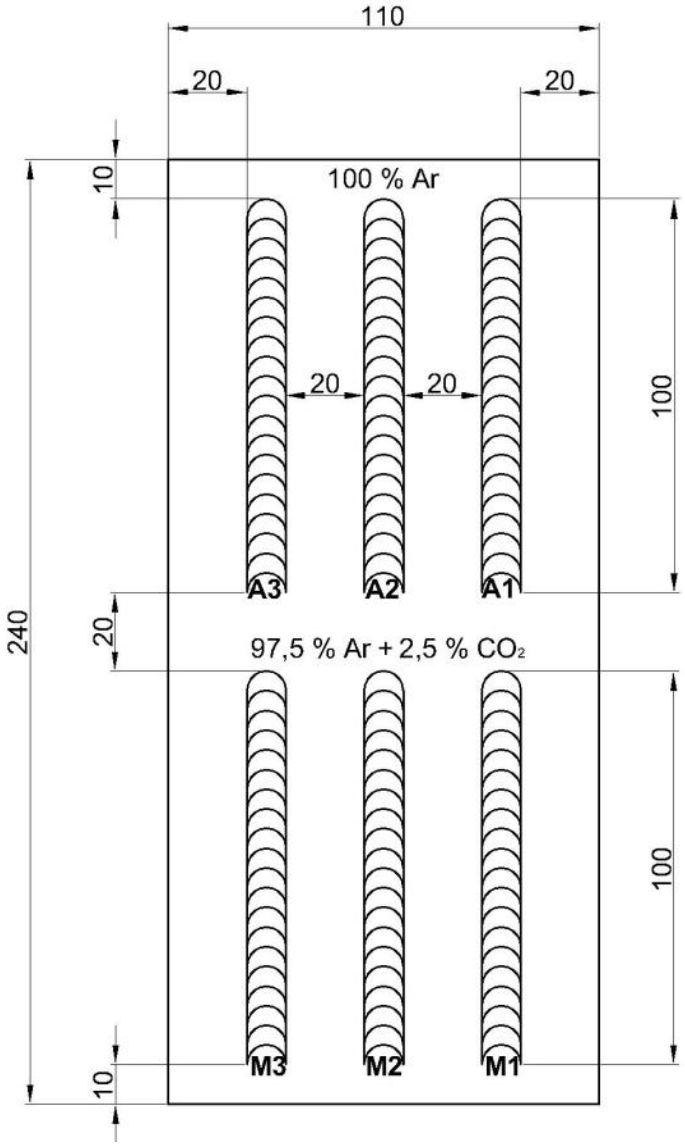
Zbog definiranja optimalnih parametara za zavarivanje prvo je izveden pretpokus navarivanja na pločici 110 x 240 mm debljine 5 mm istog osnovnog materijala koji je korišten i za postupak zavarivanja. Navarivanje je izvedeno sa po tri prolaza sa svakim zaštitnim plinom i plinskom mješavinom od kojih svaki prolaz ima različite parametre koji su određeni uz pomoć literature [5,17], a s obzirom na vrstu i debljinu osnovnog materijala koji je korišten kao i vrstu i promjer dodatnog materijala koji je korišten u pretpokusima navarivanja i pokusima zavarivanja. Pokusi navarivanja izvedeni su na automatu u jednom prolazu.

Nakon provedenog postupka navarivanja prema vizualnom izgledu navara i ponašanju el. luka prilikom navarivanja odabrani su optimalni parametri koji su korišteni za provedbu pokusa zavarivanja. Pokusi zavarivanja su izvedeni ručnim postupkom u dva prolaza sa istim parametrima zavarivanja svakog prolaza (korijenski prolaz i prolaz popune žlijeba). Pločice za zavarivanje odrezane su na dimenzije 130 x 180 mm debljine 5 mm, vrsta spoja je sučeljeni spoj (BW), a izvedena je V priprema spoja za zavarivanje s kutom od 60^o te razmakom od 3 mm između pločica za zavarivanje.

Kod MIG/MAG – STT postupka zavarivanje se većinom izvodi odozgo prema dolje, PG položaj tj. silaznom tehnikom rada pa je zavarivanje u ovim pokusima izvedeno također u PG položaju zavarivanja [10]. U toku pokusa zavarivanja mjerilo se je vrijeme potrebno za zavarivanje korijenskog prolaza (t_{zk}) i prolaza popune žlijeba (t_{zp}). Sa dodavača žice su se očitavale vrijednosti napona (U_{zk} i U_{zp}) i struje (I_{zk} i I_{zp}) zavarivanja na temelju kojih je kasnije izračunata brzina zavarivanja svakog pojedinog prolaza (v_{zk} i v_{zp}) te količine unesene topline pri svakom od prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}).

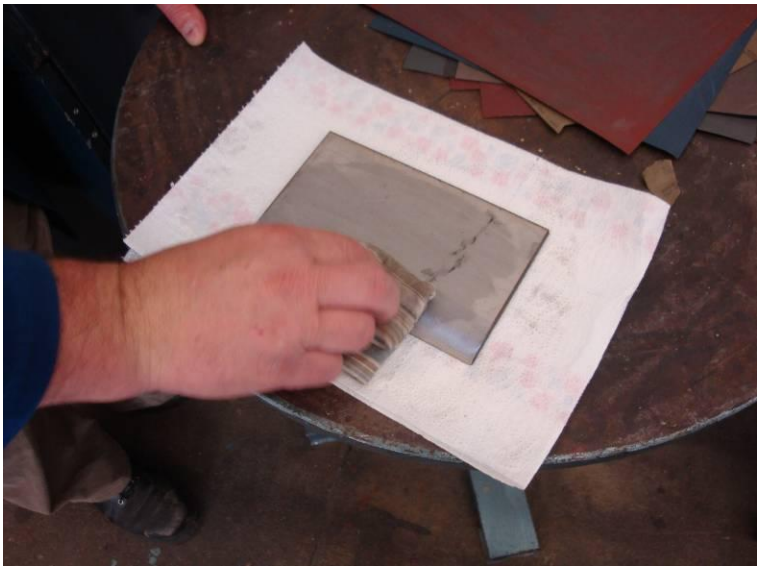
6.5 Pretpokus navarivanja

Pločica za navarivanje je dimenzija 110 x 240 mm, debljine 5 mm te je izrezana na plazma rezačici prije postupka navarivanja. Pločica s planom pretpokusa navarivanja je prikazana na **slici 10.**



Slika 10. Određivanje optimalnih parametara navarivanjem.

Prije postupka navarivanja i zavarivanja pločice su se očistile od prljavština i masnoća pomoću rafiniranog etilnog alkohola (96 % vol.) kao što je prikazano na **slici 11.** To je vrlo važno jer se time sprječava unos nečistoća u navareni/zavareni spoj prilikom postupka navarivanja/zavarivanja.



Slika 11. Čišćenje pločica.

Položaj pištolja za navarivanje je vertikalan pod 90^{o}, a temperatura osnovnog materijala prije svakog prolaza iznosila je 20 ^{o}C. Hlađenje ploča nakon svakog prolaza se je odvijalo prirodnim putem pomoću okolnog zraka. Dužina svakog prolaza iznosi cca. 100 mm, a razmak između osi navara iznosi cca. 30 mm. Navarivanje je izvedeno u jednom prolazu. Mjerenje temperature osnovnog materijala prije svakog sljedećeg prolaza izvedeno je pomoću IC termometra prikazanog na **slici 12.**

Slika 12. IC termometar.

Parametri navarivanja za promjer žice Ø 1,2 mm navedeni su u **tablici 7.** za zaštitni plin 100 % Ar i **tablici 8.** za mješavinu plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2, te su se prije postupka navarivanja podesili na uređaju za navarivanje/zavarivanje, dodavaču žice i automatu.

Tablica 7. Parametri navarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 100 % Ar.

Parametri navarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 100 % Ar			
Oznaka pretpokusa:	**A1**	**A2**	**A3**
Vršna struja (A):	250	300	200
Osnovna struja (A):	80	100	60
Topli start:	5	5	5
Brzina pada struje:	5	5	5
Brzina dodavanja žice (m/min):	3	3	3
Brzina navarivanja (cm/min):	20	20	20
Protok zaštitnog plina (l/min):	15	15	15
Slobodni kraj žice (mm):	12	12	12

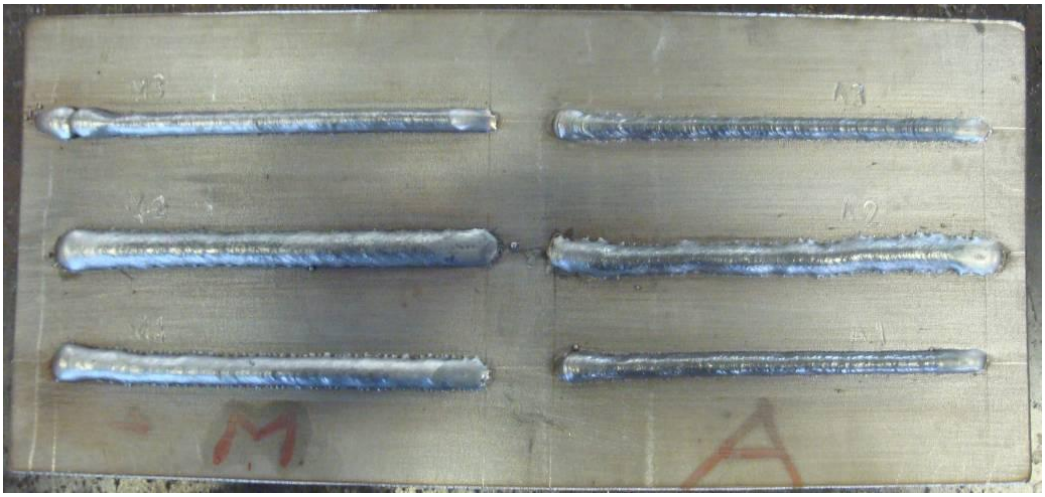
Tablica 8. Parametri navarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.

Parametri navarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2			
Oznaka pretpokusa:	**M1**	**M2**	**M3**
Vršna struja (A):	250	300	200
Osnovna struja (A):	80	100	60
Topli start:	5	5	5
Brzina pada struje:	5	5	5
Brzina dodavanja žice (m/min):	3	3	3
Brzina navarivanja (cm/min):	20	20	20
Protok zaštitnog plina (l/min):	15	15	15
Slobodni kraj žice (mm):	12	12	12

Nakon što su podešeni svi parametri navarivanja pločica za navarivanje je postavljena na radni stol automata te je izvedeno pozicioniranje pištolja prije početka navarivanja kao što prikazuje **slika 13.**

Slika 13. Pozicioniranje pištolja.

Poslije izvedenog postupka navarivanja, pločica je očišćena pomoću žičane četke te su se na temelju oblika navara i ponašanja el. luka prilikom navarivanja odabrali optimalni parametri koji su korišteni kod pokusa zavarivanja. Za pokuse zavarivanja su odabrani parametri iz pokusa A1 i M1, jer su ti parametri pokazali najbolje ponašanje el. luka prilikom navarivanja pa su ti parametri odgovarajući za debljinu materijala koji zavarujemo, položaj i vrstu spoja koju koristimo. Kod zavarivanja pri nižim parametrima struja (A3, M3) dolazilo je do naljepljivanja dodatnog materijala za kontaktnu vodilicu. Viši parametri struja nisu prikladni za zavarivanje korijena žlijeba (A2, M2), a i preporuka je da se zavarivanje nehrđajućih čelika u pravilu obavlja manjim jakostima struje u više prolaza [5]. Prikaz navara nakon navarivanja i čišćenja se vidi na **slici 14.**



Slika 14. Navareni uzorci.

6.6 Pokusi zavarivanja

Nakon provedenog postupka navarivanja odabrani su optimalni parametri za zavarivanje prikazani u sljedećim tablicama koji su isti za oba dva zaštitna plina i za oba dva prolaza zavarivanja, korijenski prolaz i popunu žlijeba.

Tablica 9. Parametri zavarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 100 % Ar.

Parametri zavarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 100 % Ar					
Oznaka pokusa:	**P1A**	**P2A**	**P3A**	**P4A**	**P5A**
Vršna struja (A):	250	250	250	250	250
Osnovna struja (A):	80	80	80	80	80
Topli start:	5	5	5	5	5
Brzina pada struje:	0	4	6	8	10
Brzina dodavanja žice (m/min):	3	3	3	3	3
Protok zaštitnog plina (l/min):	15	15	15	15	15
Slobodni kraj žice (mm):	12	12	12	12	12

Tablica 10. Parametri zavarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.

Parametri zavarivanja za žicu Ø 1,2 mm i 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2					
Oznaka pokusa:	**P1M**	**P2M**	**P3M**	**P4M**	**P5M**
Vršna struja (A):	250	250	250	250	250
Osnovna struja (A):	80	80	80	80	80
Topli start:	5	5	5	5	5
Brzina pada struje:	0	4	6	8	10
Brzina dodavanja žice (m/min):	3	3	3	3	3
Protok zaštitnog plina (l/min):	15	15	15	15	15
Slobodni kraj žice (mm):	12	12	12	12	12

Pokusi zavarivanja su izvedeni ukupno 10 puta, sa 10 pari pločica. Dimenzija svake pločice je 130 x 180 mm debljine 5 mm, a pločice su izrezane na plazma rezačici prije pokusa zavarivanja te očišćene od prljavštine i masnoće kao što je prikazano na **slici 11.** u gornjem tekstu. Podaci o pokusima su prikazani u donjim tablicama.

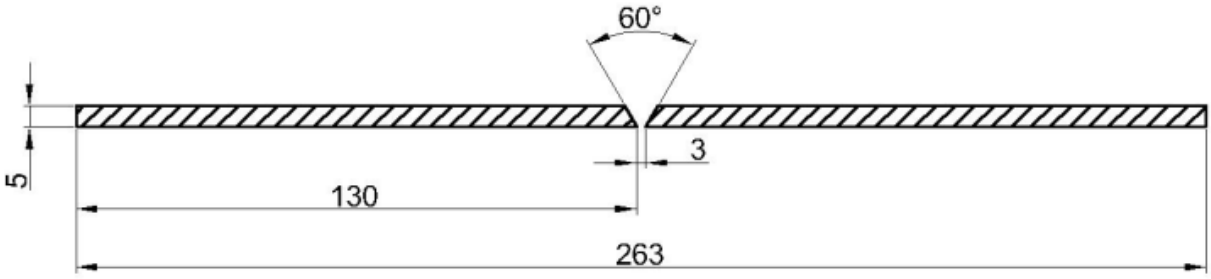
Tablica 11. Pokus br. P1A, P2A, P3A, P4A i P5A.

Pokus br. P1A, P2A, P3A, P4A i P5A	
Proizvođač dodatnog materijala:	BÖHLER
Promjer dodatnog materijala (žica):	Ø 1,2 mm
Oznaka dodatnog materijala:	CN 13/4-IG (EN ISO 14343-A:2007 G 13 4)
Osnovni materijal:	X6CrNiMoTi 17 – 12 – 2 / EN 10028-7
Dimenzije osnovnog materijala:	130 x 180 x 5 mm (2 komada)
Zaštitni plin 1:	100 % Ar

Tablica 12. Pokus br. P1M, P2M, P3M, P4M i P5M.

Pokus br. P1M, P2M, P3M, P4M i P5M	
Proizvođač dodatnog materijala:	BÖHLER
Promjer dodatnog materijala (žica):	Ø 1,2 mm
Oznaka dodatnog materijala:	CN 13/4-IG (EN ISO 14343-A:2007 G 13 4)
Osnovni materijal:	X6CrNiMoTi 17 – 12 – 2 / EN 10028-7
Dimenzije osnovnog materijala:	130 x 180 x 5 mm (2 komada)
Zaštitni plin 2:	97,5 % Ar + 2,5 % CO_2

Priprema spoja prije zavarivanja je izvedena na svakoj pločici prije zavarivanja, tako da je zavarivanje izvedeno na V – spoju s kutom od 60^o s razmakom od 3 mm između pločica, kao što je prikazano na **slici 15.**

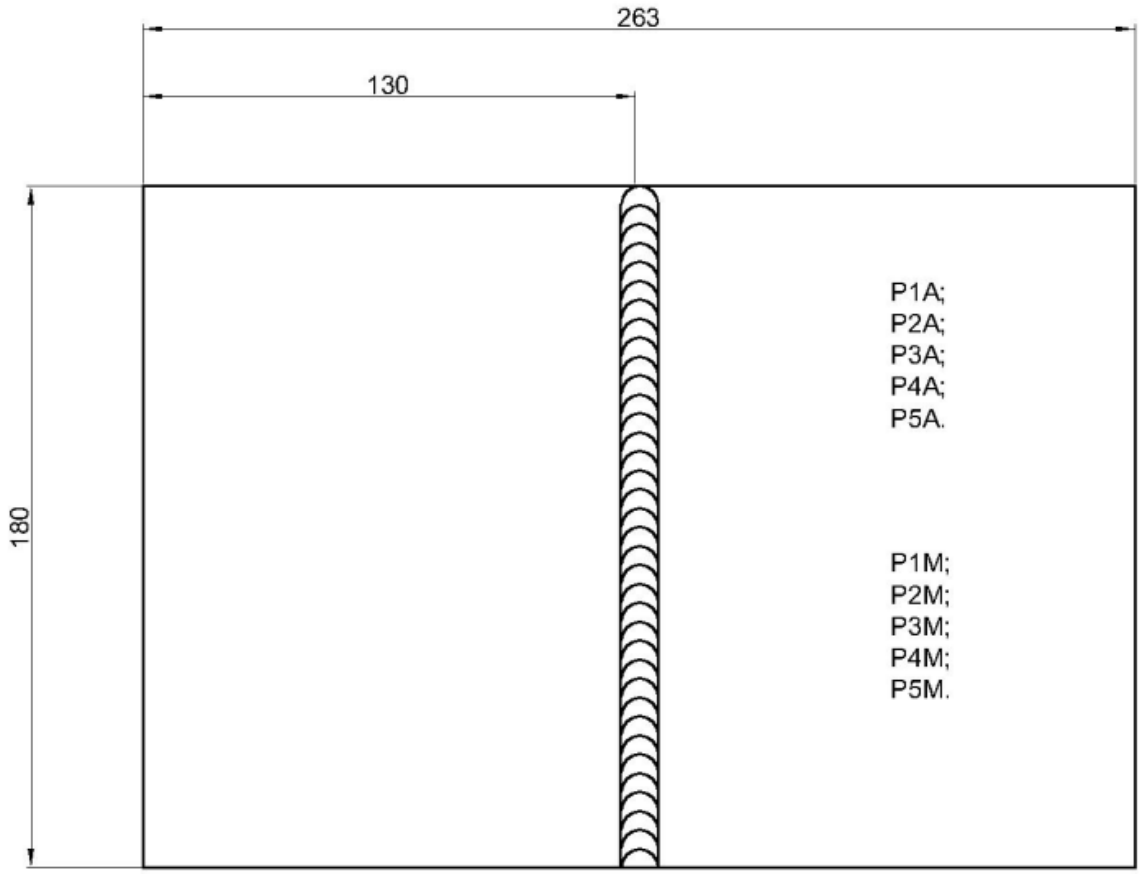


Slika 15. Priprema spoja za zavarivanje.

Vrlo je važno da su u pripremi žlijeba površine čiste, glatke bez zareza, odrezane plazmom ili mehanički obrađene. Priprema spoja je izvedena na plazmi uz kasnije brušenje sa specijalnim brusnim pločama koje su izrađene na bazi aluminijskog oksida, kao što je prikazano na **slici 16.**

Slika 16. Priprema žlijeba za zavarivanje.

Na **slici 17.** je prikazan par pločica sa planom pokusa na kojima su izvedeni pokusi zavarivanja P1A, P2A, P3A, P4A i P5A te P1M, P2M, P3M, P4M i P5M.



Slika 17. Pokusi zavarivanja.

Zavarivanje je izvedeno ručno u dva prolaza, korijenski prolaz i popuna žlijeba, njihanjem pištolja u svakom prolazu s istim parametrima zavarivanja po svakom prolazu. Vrsta spoja je sučeljeni spoj (BW), a položaj zavarivanja je PG vertikala prema dolje. Kut nagiba pištolja za zavarivanje je iznosio 15^{o} u smjeru zavarivanja. Kod svih pokusa su jednaki svi parametri zavarivanja osim parametra brzina pada struje koji će kasnije služiti za usporedbu i analizu dobivenih podataka. Osim te razlike usporedba je rađena i između zaštitnih plinova sa istim parametrima.

Brzina pada struje osigurava dodatni unos topline, a da pri tom rastaljene kapljice ne postaju prevelike. Dužina električnog luka također se ne mijenja. Povećanjem se omogućuje veća brzina zavarivanja i poboljšava se kvašenje. Za veće vrijednosti parametara brzina pada struje, vrijednosti vršne i osnovne struje se smanjuju [4].

Općenito zaštitni plin 100 % Ar ne daje zadovoljavajuću stabilnost električnog luka niti izgled zavara, naročito kod manjih struja zavarivanja. Zavar izveden tim zaštitnim plinom je uzak i nadvišen. Ako se poveća jakost struje zavar postaje širi, ali luk i dalje ostaje nestabilan [5].

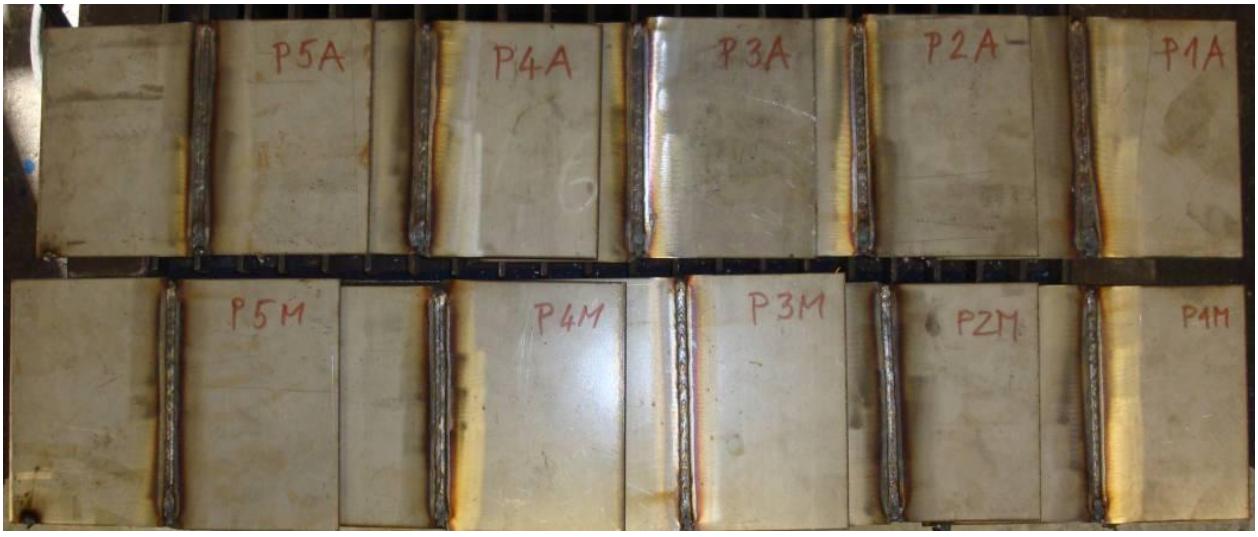
Površina zavara prilikom zavarivanja 100 % Ar izgleda kao oksidirana s tankom tamnom opnom. Prilikom zavarivanja s mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 postižemo lijep izgled zavara, miran luk i smanjeno rasprskavanje. Također se postiže veće usitnjavanje kapljica u luku te bolje razlijevanje taline. Zavar izveden ovom mješavinom je širok zbog boljeg razlijevanja taline te se postiže bolje protaljivanje [5].

Kao što je prije navedeno zavarivanje je izvedeno ručno u dva prolaza, kao što je prikazano na **slici 18.** i **slici 19.** s dvije različite strane pogleda.

Slika 18. Ručno zavarivanje uzoraka, pogled 1.

Slika 19. Ručno zavarivanje uzoraka, pogled 2.

Na **slici 20.** prikazani su uzorci nakon izvedenog postupka zavarivanja, a nakon toga je slijedilo čišćenje uzoraka četkanjem, prikazano na **slici 21.**



Slika 20. Zavareni uzorci.

Slika 21. Četkanje uzoraka.

U daljnjem tekstu bit će prikazani izmjereni i očitani podaci prilikom pokusa zavarivanja, podaci izračunati nakon izvedenih pokusa zavarivanja te uzorci lica i korijena zavarenog spoja.

Izračunata brzina zavarivanja v_z dobivena je iz formule (1) [18]:

$$v_z = \frac{s_z}{t_z} = \frac{18}{t_z} \cdot 60(cm/\min) \quad (1)$$

s_z – prijeđeni put zavarivanja (cm) = dužini ploče što iznosi 180 mm,
t_z – vrijeme zavarivanja (s).

Izračunata količina unesene topline Q_z dobivena je iz formule (2) [19]:

$$Q_z = \frac{U_z \cdot I_z}{v_z} \cdot \eta \cdot \frac{60}{1000}(kJ/cm) \quad (2)$$

U_z – napon zavarivanja (V),
I_z – struja zavarivanja (A),
v_z – brzina zavarivanja (cm/min),
η – koeficijent korisnog djelovanja el. luka, što iznosi približno 0,8 za MIG/MAG – STT postupak.

Ovakav način izračuna količine unesene topline nije potpuno točan već ima odstupanja otprilike oko 10 % u odnosu na vrijednosti dobivene pomoću gornje formule koje se po novoj normi ASME Section IX računaju uz pomoć količine energije E_z (J) unesene u određenu dužinu zavarenog spoja l_z (mm) ili pomoću snage P_z (J/s) koja je u jedinici vremena t_z (s) unesena u određenu dužinu zavarenog spoja l_z (mm) kao što prikazuju formule (3) [20].

$$Q_{zE} = \frac{E_z}{l_z}(J/mm) \qquad Q_{zP} = \frac{P_z \cdot t_z}{l_z}(J/mm) \qquad (3)$$

Taj način izračuna količine unesene topline je posljedica sve snažnijeg razvoja novih tehnologija upravljanja oblikom strujnog vala (eng. Waveform Control Technology) kao što je to primjer kod MIG/MAG – STT postupaka zavarivanja. Ako se koriste novi načini upravljanja oblikom strujnog vala obavezno je koristiti nove formule za izračun količine unesene topline, dok se za klasične tehnologije može koristiti i gore spomenuta formula.

Da bi se mogao očitati unos topline prema novoj normi, ako to već nije implementirano u izvor struje, potrebno je softverski nadograditi izvor struje gdje se onda u stvarnom vremenu mogu pratiti količine unesene topline u zavareni spoj. Pošto prilikom izrade diplomskog rada izvor struje nije bio softverski nadograđen, količina unesene topline izračunata je prema staroj formuli tako da podatke unesene u donjim tablicama treba uzimati kao orijentacijske vrijednosti [20].

6.6.1 Pokus P1A

U *pokusu P1A* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnim plinom 100 % Ar te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 13.** i **tablici 14.**

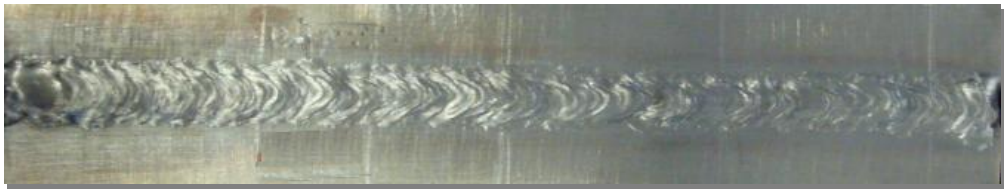
Tablica 13. Izmjereni i izračunati podaci za P1A za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P1A za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
105	15,8	58	18,62	4,28

Tablica 14. Izmjereni i izračunati podaci za P1A za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P1A za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
114	16,1	53	20,37	4,32

Slika 22. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 23.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.



Slika 22. Pokus P1A, lice zavara.

Slika 23. Pokus P1A, korijen zavara.

6.6.2 Pokus P2A

U *pokusu P2A* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnim plinom 100 % Ar te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 15.** i **tablici 16.**

Tablica 15. Izmjereni i izračunati podaci za P2A za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P2A za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
107	16	45	24	3,42

Tablica 16. Izmjereni i izračunati podaci za P2A za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P2A za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
115	16,5	45	24	3,80

Slika 24. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 25.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 24. Pokus P2A, lice zavara.

Slika 25. Pokus P2A, korijen zavara.

6.6.3 Pokus P3A

U *pokusu P3A* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnim plinom 100 % Ar te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 17.** i **tablici 18.**

Tablica 17. Izmjereni i izračunati podaci za P3A za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P3A za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
105	16	55	19,64	4,1

Tablica 18. Izmjereni i izračunati podaci za P3A za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P3A za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
118	16,2	50	21,60	4,25

Slika 26. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 27.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 26. Pokus P3A, lice zavara.

Slika 27. Pokus P3A, korijen zavara.

6.6.4 Pokus P4A

U *pokusu P4A* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnim plinom 100 % Ar te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 19.** i **tablici 20.**

Tablica 19. Izmjereni i izračunati podaci za P4A za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P4A za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
103	15,7	50	21,60	3,59

Tablica 20. Izmjereni i izračunati podaci za P4A za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P4A za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
114	16,5	59	18,30	4,93

Slika 28. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 29.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 28. Pokus P4A, lice zavara.

Slika 29. Pokus P4A, korijen zavara.

6.6.5 Pokus P5A

U *pokusu P5A* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnim plinom 100 % Ar te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 21.** i **tablici 22.**

Tablica 21. Izmjereni i izračunati podaci za P5A za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P5A za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
106	15,9	56	19,29	4,19

Tablica 22. Izmjereni i izračunati podaci za P5A za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P5A za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
116	16,8	52	20,77	4,50

Slika 30. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 31.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 30. Pokus P5A, lice zavara.

Slika 31. Pokus P5A, korijen zavara.

6.6.6 Pokus P1M

U *pokusu P1M* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnom mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 23.** i **tablici 24.**

Tablica 23. Izmjereni i izračunati podaci za P1M za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P1M za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
102	16	50	21,60	3,63

Tablica 24. Izmjereni i izračunati podaci za P1M za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P1M za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
128	16,8	56	19,29	5,35

Slika 32. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 33.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 32. Pokus P1M, lice zavara.

Slika 33. Pokus P1M, korijen zavara.

6.6.7 Pokus P2M

U *pokusu P2M* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnom mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 25.** i **tablici 26.**

Tablica 25. Izmjereni i izračunati podaci za P2M za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P2M za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
102	16,4	55	19,64	4,09

Tablica 26. Izmjereni i izračunati podaci za P2M za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P2M za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
125	16,5	52	20,77	4,77

Slika 34. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 35.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 34. Pokus P2M, lice zavara.

Slika 35. Pokus P2M, korijen zavara.

6.6.8 Pokus P3M

U *pokusu P3M* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnom mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 27.** i **tablici 28.**

Tablica 27. Izmjereni i izračunati podaci za P3M za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P3M za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
105	16	58	18,62	4,33

Tablica 28. Izmjereni i izračunati podaci za P3M za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P3M za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
127	16,4	55	19,64	5,09

Slika 36. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 37.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 36. Pokus P3M, lice zavara.

Slika 37. Pokus P3M, korijen zavara.

6.6.9 Pokus P4M

U *pokusu P4M* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnom mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 29.** i **tablici 30.**

Tablica 29. Izmjereni i izračunati podaci za P4M za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P4M za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
107	16,6	54	20	4,26

Tablica 30. Izmjereni i izračunati podaci za P4M za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P4M za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
128	16,3	48	22,5	4,45

Slika 38. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 39.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 38. Pokus P4M, lice zavara.

Slika 39. Pokus P4M, korijen zavara.

6.6.10 Pokus P5M

U *pokusu P5M* izvedena su dva prolaza istih parametara zavarivanja sa zaštitnom mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 te parametrima definiranim i navedenim u gornjem tekstu. Prvi prolaz je bio zavarivanje korijena zavara, a drugi prolaz popuna žlijeba zavara. Napon (U_{zk} i U_{zp}) i struja (I_{zk} i I_{zp}) prilikom zavarivanja očitani su s dodavača žice, a vrijeme potrebno za zavarivanje (t_{zk} i t_{zp}) izmjereno je prilikom zavarivanja iz kojeg je izračunata brzina zavarivanja (v_{zk} i v_{zp}) te je izračunata i količina unesene topline prilikom zavarivanja svakog prolaza (Q_{zk} i Q_{zp}). Podaci su prikazani u **tablici 31.** i **tablici 32.**

Tablica 31. Izmjereni i izračunati podaci za P5M za korijen zavara.

Izmjereni i izračunati podaci za P5M za korijen zavara				
Struja, I_{zk} (A)	Napon, U_{zk} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zk} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zk} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zk} (kJ/cm)
104	15,6	55	19,64	3,97

Tablica 32. Izmjereni i izračunati podaci za P5M za popunu žlijeba.

Izmjereni i izračunati podaci za P5M za popunu žlijeba				
Struja, I_{zp} (A)	Napon, U_{zp} (V)	Vrijeme zavarivanja, t_{zp} (s)	Brzina zavarivanja, v_{zp} (cm/min)	Količina unesene topline, Q_{zp} (kJ/cm)
126	16,7	53	20,38	4,96

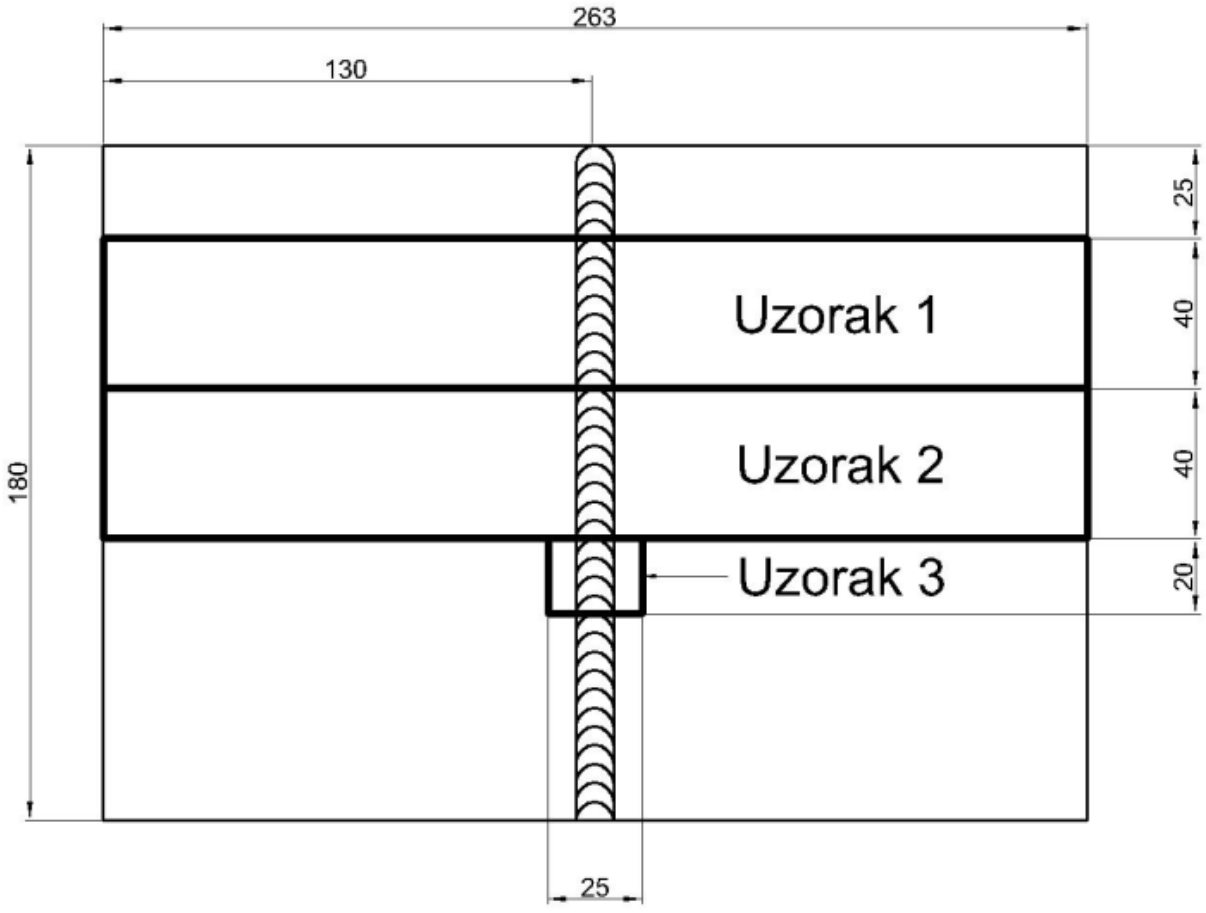
Slika 40. prikazuje izgled lica zavara nakon izvedenog pokusa zavarivanja te prije rezanja uzoraka na plazma rezačici dok **slika 41.** prikazuje izgled korijena zavara neposredno nakon završenog korijenskog prolaza.

Slika 40. Pokus P5M, lice zavara.

Slika 41. Pokus P5M, korijen zavara.

7 POSTUPAK ISPITIVANJA SVOJSTAVA ZAVARENIH SPOJEVA

Nakon izvedenog postupka zavarivanja s određenim parametrima i zaštitnim plinovima slijedilo je rezanje uzoraka iz svih 10 zavarenih pločica na plazma rezačici na dva uzorka dimenzija 40 x 263 mm svaki (uzorak 1 i 2) za ispitivanje mehaničkih svojstava zavara savijanjem i to u udaljenosti od 25 mm od početka zavarivanja te jedan uzorak dimenzija 20 x 25 mm (uzorak 3) koji se je koristio za mikro i makrostrukturna ispitivanja, kao što je prikazano na **slici 42.** Dimenzije uzoraka za mehanička ispitivanja određene su uz pomoć norme ISO 15614 – 1 [21] i EN 910 [22] te pomoću veličine naprave za savijanje koja se nalazi u laboratoriju. Dimenzije uzoraka za mikro i makrostrukturna ispitivanja uvjetovane su opremom iz Laboratorija za materijalografiju.

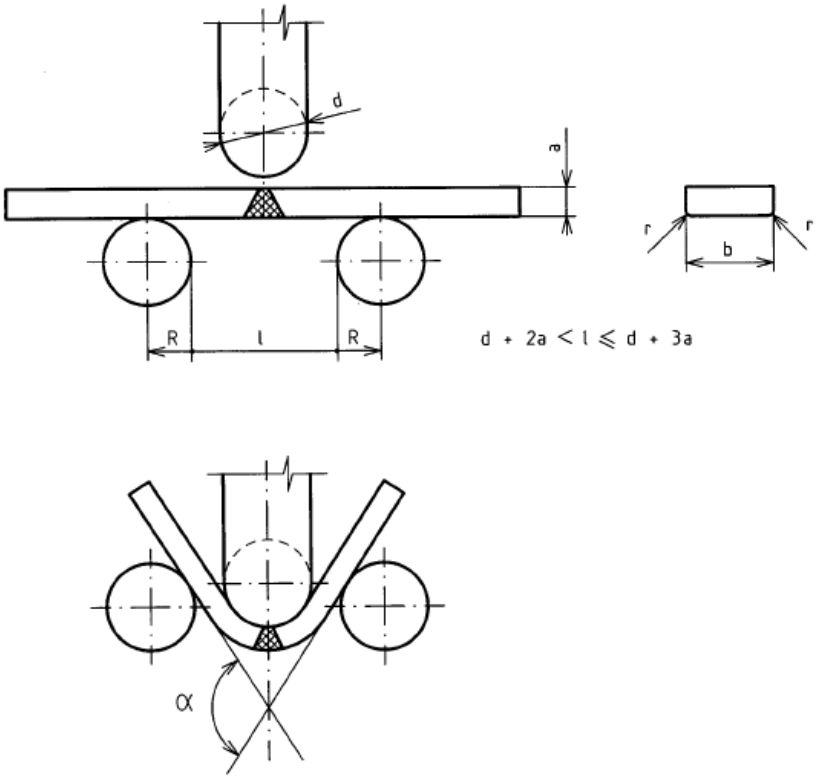


Slika 42. Plan rezanja uzoraka.

Prvi uzorak koristi se kao epruveta prilikom savijanja na korijen, drugi uzorak kao epruveta prilikom savijanja na lice zavara, dok se treći uzorak koristi za dobivanje površine pogodne za mikro i makrostrukturna ispitivanja. Nakon izvedenog rezanja uzoraka na plazma rezačici slijedi postupak savijanja epruveta na korijen i lice zavara za mjerenje mehaničkih svojstava zavarenog spoja prema normi EN 910 te postupak dobivanja površine pogodne za postupak mikro i makrostrukturnih ispitivanja koje je izvedeno u Laboratoriju za materijalografiju.

7.1 Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenih spojeva

Ispitivanje mehaničkih svojstava zavara izvedeno je savijanjem uzoraka (epruveta) na korijen i savijanjem na lice zavara prema normi EN 910 na uzorcima dimenzija 40 x 263 mm, debljine 5 mm. Norma definira promjer trna za savijanje što iznosi u ovom slučaju 20 mm (4 x debljina materijala). Razmak između osi oslonca (valjaka) prema normi treba iznositi 85 mm kao što je prikazano na **slici 43.** [22].



Slika 43. Postupak savijanja prema normi EN 910 [22].

Naprava na kojoj je izvedeno savijanje uzoraka na korijen i na lice zavara prikazana je na **slici 44.**

Slika 44. Naprava za savijanje uzoraka.

Nakon rezanja uzoraka na plazma rezačici slijedila je priprema uzoraka za postupak savijanja pomoću brusnih ploča gdje su se ručno brusila nadvišenja korijena i lica zavara. Izgled uzoraka nakon brušenja je prikazan na **slici 45.**

Slika 45. Uzorci za savijanje.

Na **slici 46.** je prikazan postupak savijanja uzoraka na napravi, uz pomoć hidrauličnog cilindra i trna za savijanje gdje se potrebna sila za savijanje dobiva gibanjem ručke na pumpi naprave čime se vrši pumpanje ulja u cilindar.

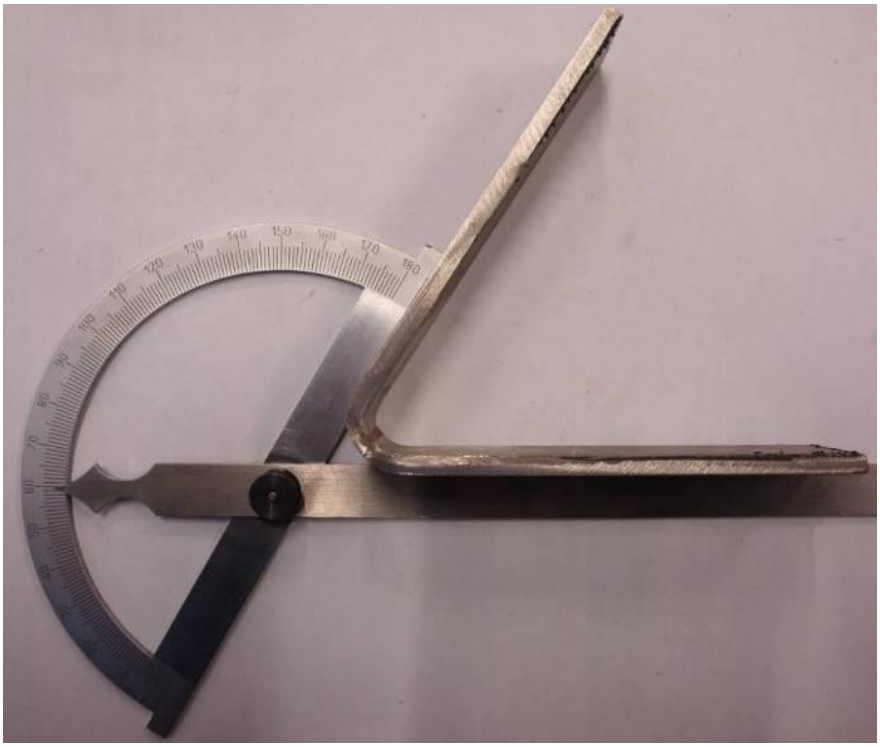
Slika 46. Savijanje uzoraka.

Nakon izvršenog pokusa savijanja uzoraka došlo je do pojava pukotina kod uzorka P1A i kod uzorka P4A u korijenskom dijelu zavara tj. u dijelu zone utjecaja topline (ZUT). Svi ostali uzorci su zadovoljili pokuse savijanja te su podnijeli savijanje od približno 180^o koje je moguće maksimalno postići na napravi za savijanje uzoraka na korijen i na lice zavara, kao što je prikazano na jednom uzorku na **slici 47.**

Slika 47. Maksimalno savijen uzorak.

Kod uzorka P1A se je pojavila pukotina u ZUT – u korijenskog dijela zavara pri kutu savijanja od 120^o kao što je prikazano na **slici 48.**, a kod uzorka P4A se je pojavila pukotina u ZUT – u korijenskog dijela zavara pri kutu savijanja od 30^o kao što je prikazano na **slici 49.**

Kutovi pri kojem je nastala pukotina izmjereni su pomoću kutomjera kao što je prikazano na donjim slikama.

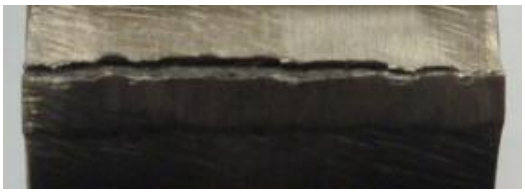
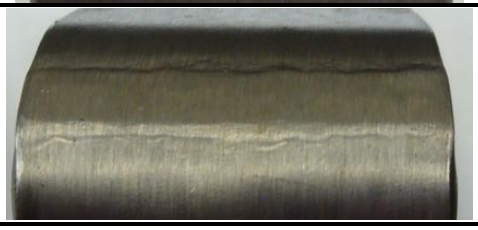
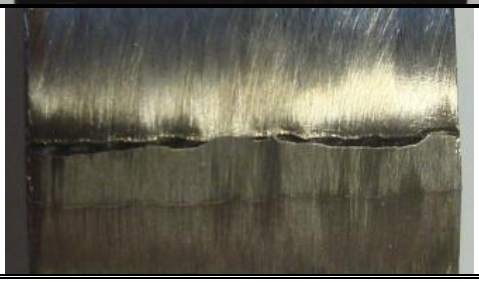
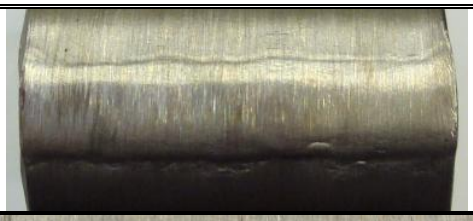


Slika 48. Savijeni uzorak P1A na korijen zavara.

Slika 49. Savijeni uzorak P4A na korijen zavara.

Izgled zavara kod uzoraka nakon izvršenog pokusa savijanja na korijen i na lice zavara je prikazan u **tablici 33.**

Tablica 33. Izgled korijena i lica zavara nakon pokusa savijanjem.

Izgled korijena i lica zavara nakon pokusa savijanja		
Pokus	**Lice zavara**	**Korijen zavara**
P1A		
P2A		
P3A		
P4A		
P5A		
P1M		
P2M		

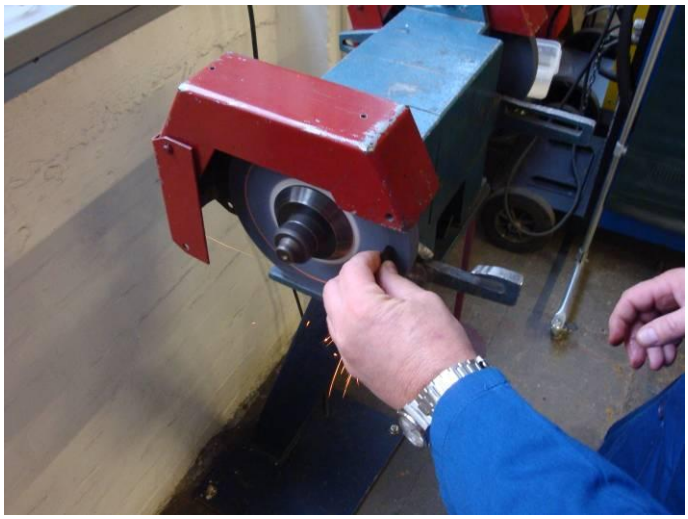
P3M		
P4M		
P5M		

Iz pokusa na savijanje korijena i lica zavara možemo zaključiti da su parametri zavarivanja pravilno odabrani kod mješavine plinova, jer kod svih pokusa savijanja uzoraka koji su bili zavareni mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 nije došlo do pojave pukotina prilikom savijanja pri maksimalnom kutu savijanja te su ti uzorci zadovoljili ovo ispitivanje.

7.2 Postupak izrade i analiza uzoraka za mikro i makrostrukturna ispitivanja

7.2.1 Mikrostrukturna ispitivanja

Nakon rezanja uzoraka na plazma rezačici dimenzija 20 x 25 mm debljine 5 mm, uzorci su mehanički obrađeni na stupnoj brusilici (skidanje srha te poravnavanje površine), kao što prikazuje **slika 50.**



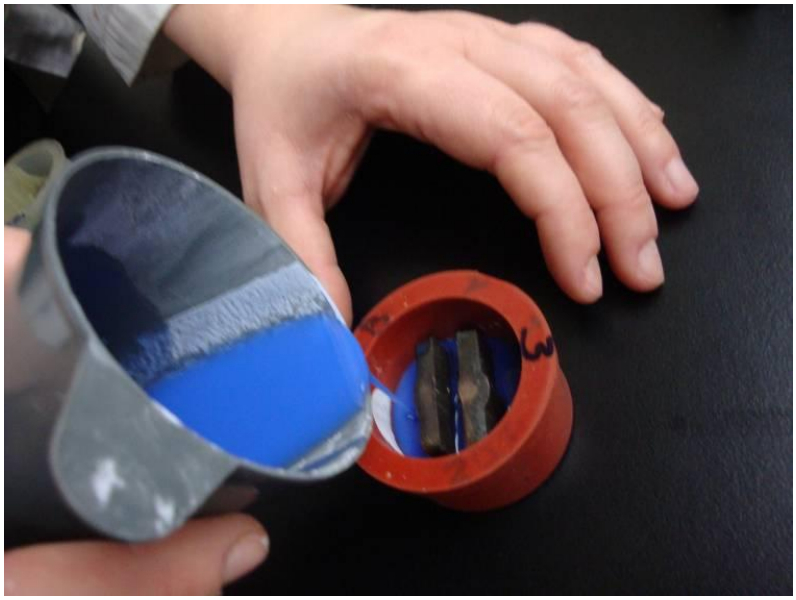
Slika 50. Skidanje srha sa uzoraka.

Nakon toga je u Laboratoriju za materijalografiju izvedena daljnja priprema uzoraka za dobivanje površine pogodne za mikro i makrostrukturna ispitivanja uzoraka.

Prvo su pripremljeni uzorci za brušenje i poliranje, a pošto su uzorci malih dimenzija, zalijevali su se u VARIDUR 200 prah + VARIDUR 200 razvijač u omjeru miješanja 2:1 da se omogući lakši prihvat uzoraka prilikom njihovog brušenja i poliranja te kasnijeg manipuliranja istim. Kada je smjesa zamiješana, ulivena je u posudice kao što prikazuje **slika 51.** i **slika 52.**, te su se uzorci ostavili da miruju 24 h dok se smjesa nije skrutila.

Uzorci su stavljani u posudice kao što prikazuje **slika 52.**, po dva komada u svaku posudicu, te je svaka posudica obilježena rednim brojem od 1 do 5. Tako su se npr. u posudici 1 nalazili uzorci P1M i P4M, te da bi se razlikovali poslije zalijevanja na uzorak P1M stavljena je metalna kvačica koja je služila za kasnije prepoznavanje uzoraka. Taj način označavanja je primijenjen i na ostale četiri posudice, tako da je u posudici 2 uzorak P5M s kvačicom i uzorak P3M, u posudici 3 je uzorak P2A s kvačicom i uzorak P2M, u posudici 4 je

uzorak P4A sa kvačicom i uzorak P3A, a u posudici 5 je uzorak P5A sa kvačicom i uzorak P1A.



Slika 51. Zalijevanje uzoraka.

Slika 52. Zaliveni uzorci.

Kada se je smjesa skrutila slijedilo je brušenje i poliranje ispitne površine uzoraka na uređaju za brušenje i poliranje BUEHLER PHOENIX ALPHA. Prvo je slijedilo brušenje pri *n* = 300 o/min uz vodeno hlađenje uzoraka da se izbjegne transformiranje strukture prilikom zagrijavanja kod brušenja. Brusni papiri su se koristili slijedećim redoslijedom: P 220, P 320, P 500 i P 1200. Nakon toga je slijedio postupak poliranja pri *n* = 150 o/min sa brusnim

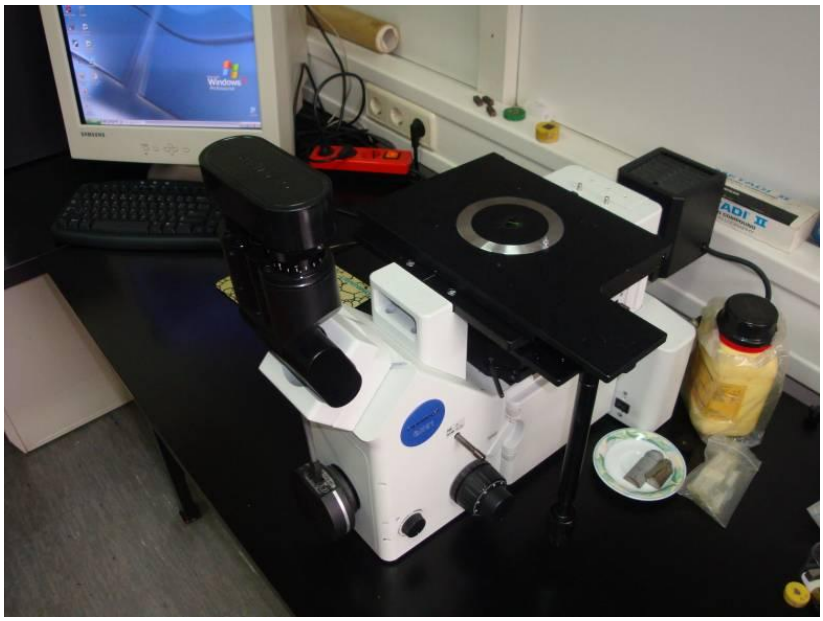
papirom P 2400 te nakon njega sa P 4000 (koji odgovara polirnoj pasti sa česticama veličine 5 μm). Prije svakog sljedećeg brušenja ili poliranja kod izmjene brusnog papira, uzorak je zakrenut za 90^o u odnosu na prethodni položaj kod brušenja ili poliranja radi lakšeg uočavanja nepravilnosti koje su ostale od prethodnog brušenja ili poliranja. Uređaj za brušenje i poliranje je prikazan na **slici 53.**

Slika 53. Brušenje i poliranje uzoraka.

Poslije postupka brušenja i poliranja površine slijedio je postupak izazivanja strukture smjesom Villela (smjesa solne kiseline HCl, dušične kiseline HNO_3 i vode H_2O) za mikro i makrostrukturna ispitivanja. Za makrostrukturna ispitivanja tj. za dobivanje makro izbrusaka, uzorci su nakon provedenih mikrostrukturnih ispitivanja ponovno umakani u Villelu, ali sa duplo većim udjelom dušične kiseline u smjesi. Vrijeme izazivanja strukture je iznosilo 30 s te je nakon nagrizanja u Villeli uzorak umočen u vodu, čime je postignut prekid reakcije, a nakon toga je slijedilo ispiranje alkoholom kao što je prikazano na **slici 54.** Sušenje uzoraka se odvijalo u struji toplog zraka.

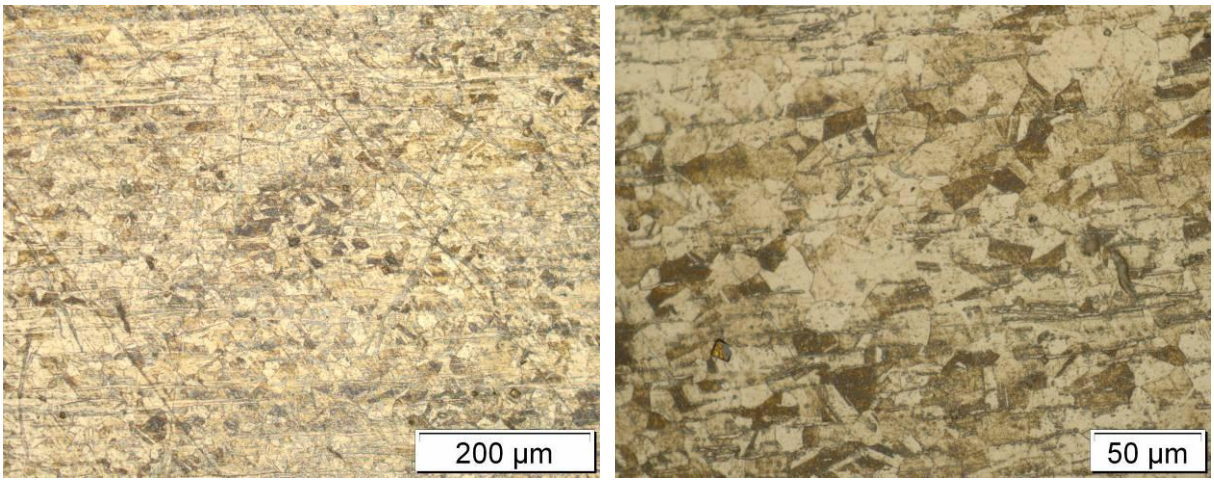
Slika 54. Postupak izazivanja strukture.

Nakon što su se uzorci osušili, slijedio je postupak snimanja mikrostrukture uzoraka na invertnom svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX 51 koji je prikazan na **slici 55.**



Slika 55. Invertni svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX 51.

Na **slici 56.** vidi se mikroskopski prikaz mikrostrukture osnovnog materijala gdje su vidljiva austenitna zrna jednolike veličine i orijentacije. Na slici a) je povećanje 200 x, a na slici b) je povećanje 500 x.

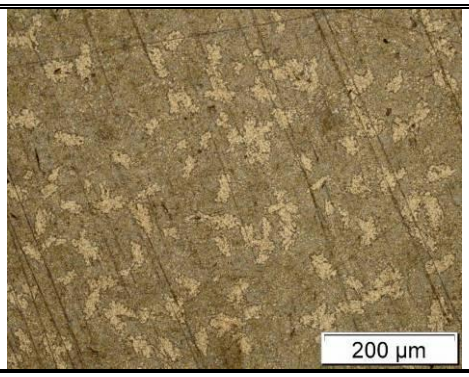
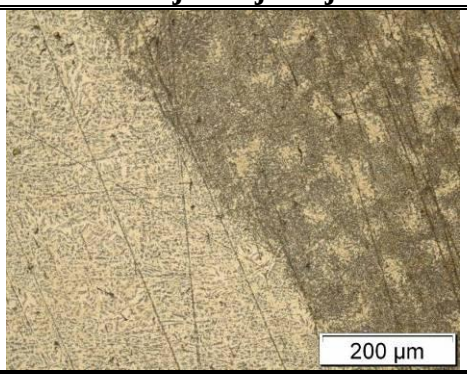


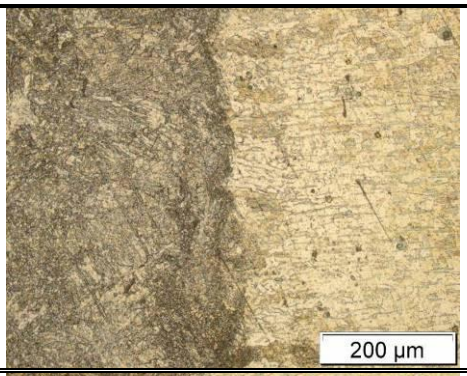
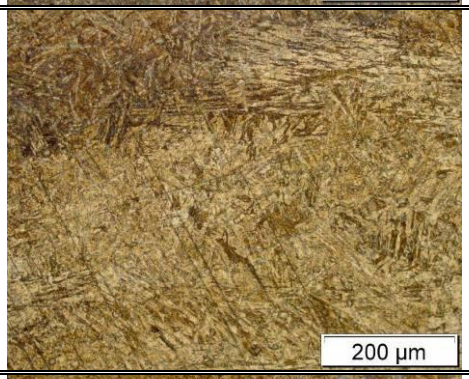
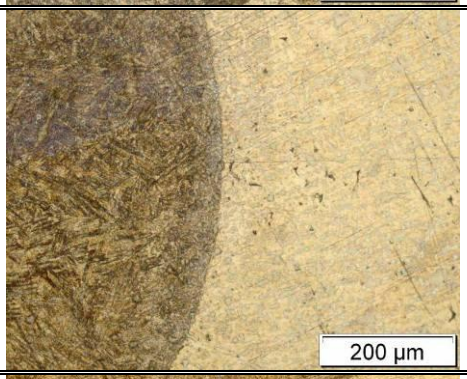
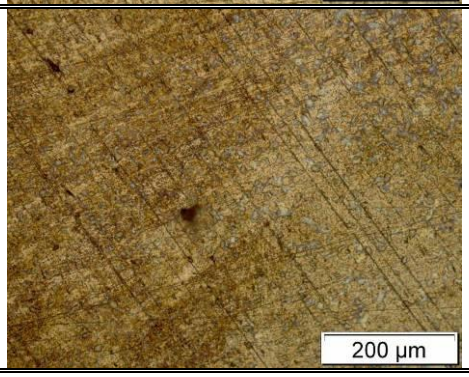
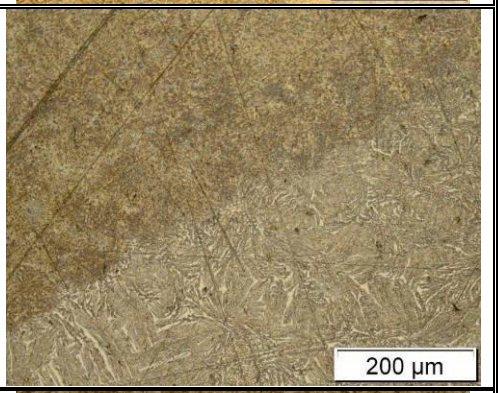
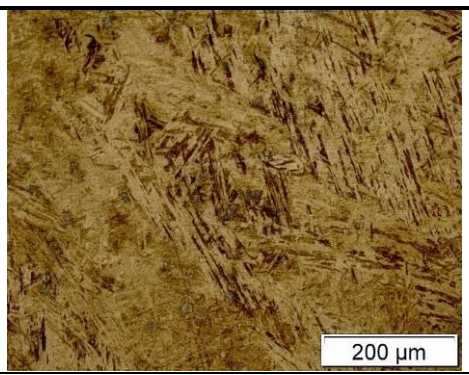
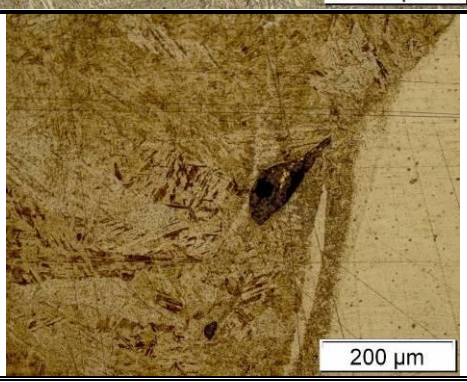
a) Povećanje 200 x b) Povećanje 500 x

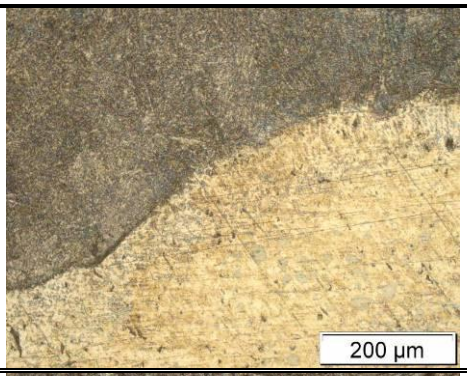
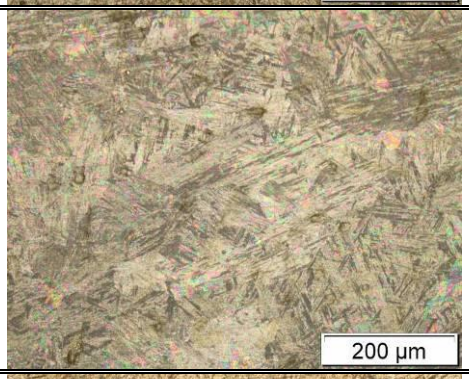
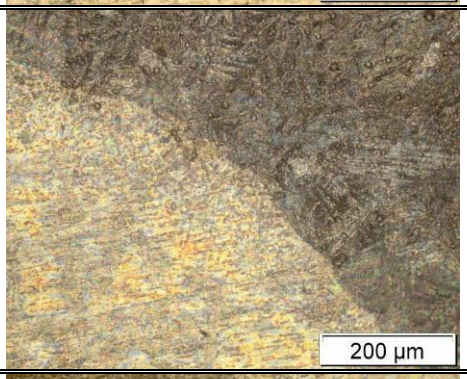
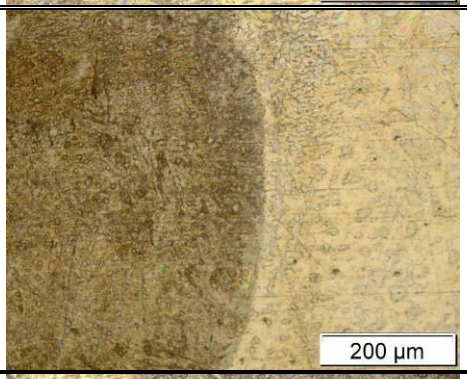
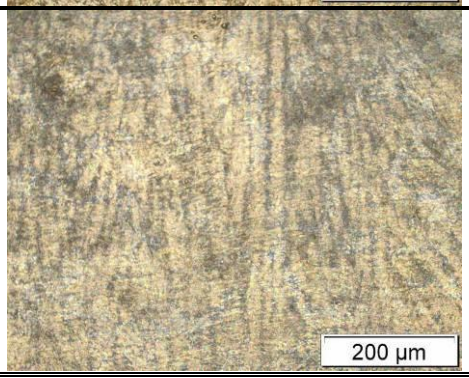
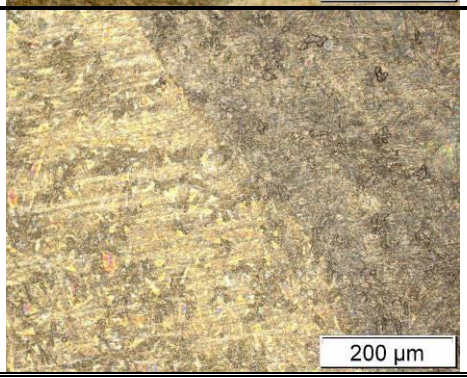
Slika 56. Mikrostruktura osnovnog materijala.

U **tablici 34.** je dan prikaz mikrostrukture zavarenih spojeva, tj. metala zavara i linije staljivanja. Struktura metala zavara je Widmannstätten – ova gruba ljevačka struktura kao što je prikazano na slikama u donjoj tablici. Na desnim slikama u **tablici 34.** vidi se linija staljivanja te je područje ZUT – a vidljivo na pojedinim slikama.

Tablica 34. Mikrostrukture zavarenih spojeva.

Mikrostruktura zavarenih spojeva		
Pokus	**Zavar**	**Linija staljivanja**
P1A		

P2A		
P3A		
P4A		
P5A		
P1M		

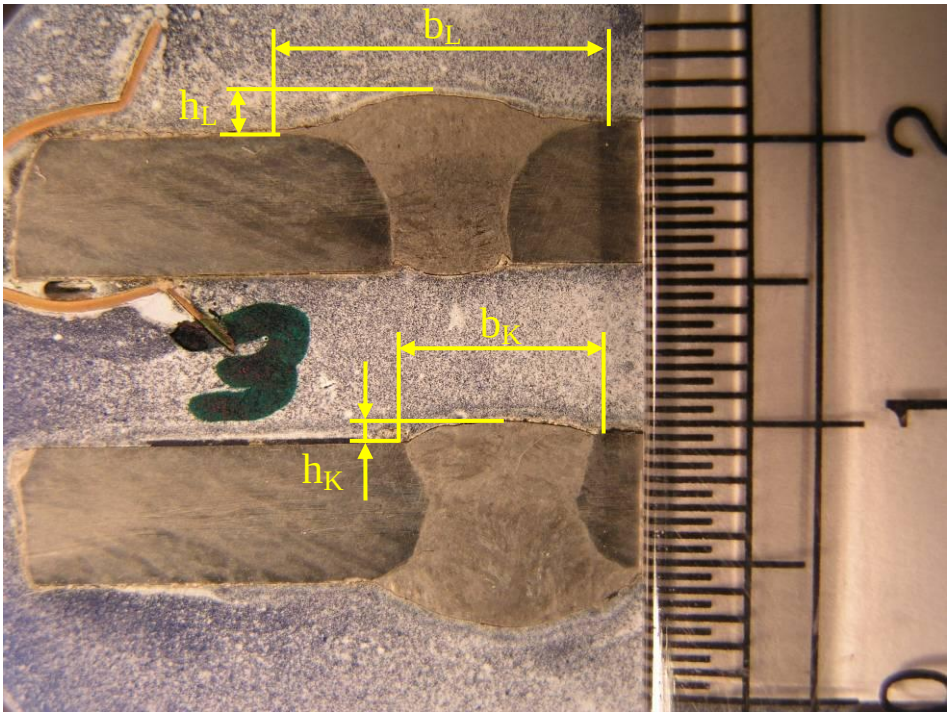
P2M		
P3M		
P4M		
P5M		

Na uzorku P4A i P1M vidljivi su čvrsti uključci troske u metalu zavara tj. nalaze se blizu linije staljivanja između metala zavara i osnovnog materijala. Uključci troske u zavaru najčešće nastaju uslijed nedovoljnog čišćenja među slojevima zavara. Troska se ponekad teško čisti, naročito u dubokim žljebovima i oštrim uglovima, npr. kod vezanih slojeva ili oštećenih stranica žlijeba ili previše ispupčenog prethodnog sloja zavara. Osim toga mogu nastati i uslijed nepravilne tehnike rada ili premale brzine zavarivanja, gdje talina troske

"bježi" ispred el. luka ispod taline metala. Općenito, nemetalni uključci i uključci stranog metala, smanjuju čvrstoću zavarenog spoja zbog nehomogenosti i smanjenja presjeka materijala zavara. Utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja ovisi o količini, obliku u veličini uključaka. Uključci oštrih rubova djeluju kao inicijatori pukotina. Dugački uključci većih volumena smanjuju presjek zavara. Sitni uključci kuglastih oblika i manjih količina, nisu opasni i djeluju poput pora kuglastog oblika [19]. Zbog svega gore navedenog, razlog pojave pukotine u ZUT – u prilikom savijanja uzorka P4A može također biti iniciran i ovim čvrstim uključkom koji se nalazi blizu linije staljivanja.

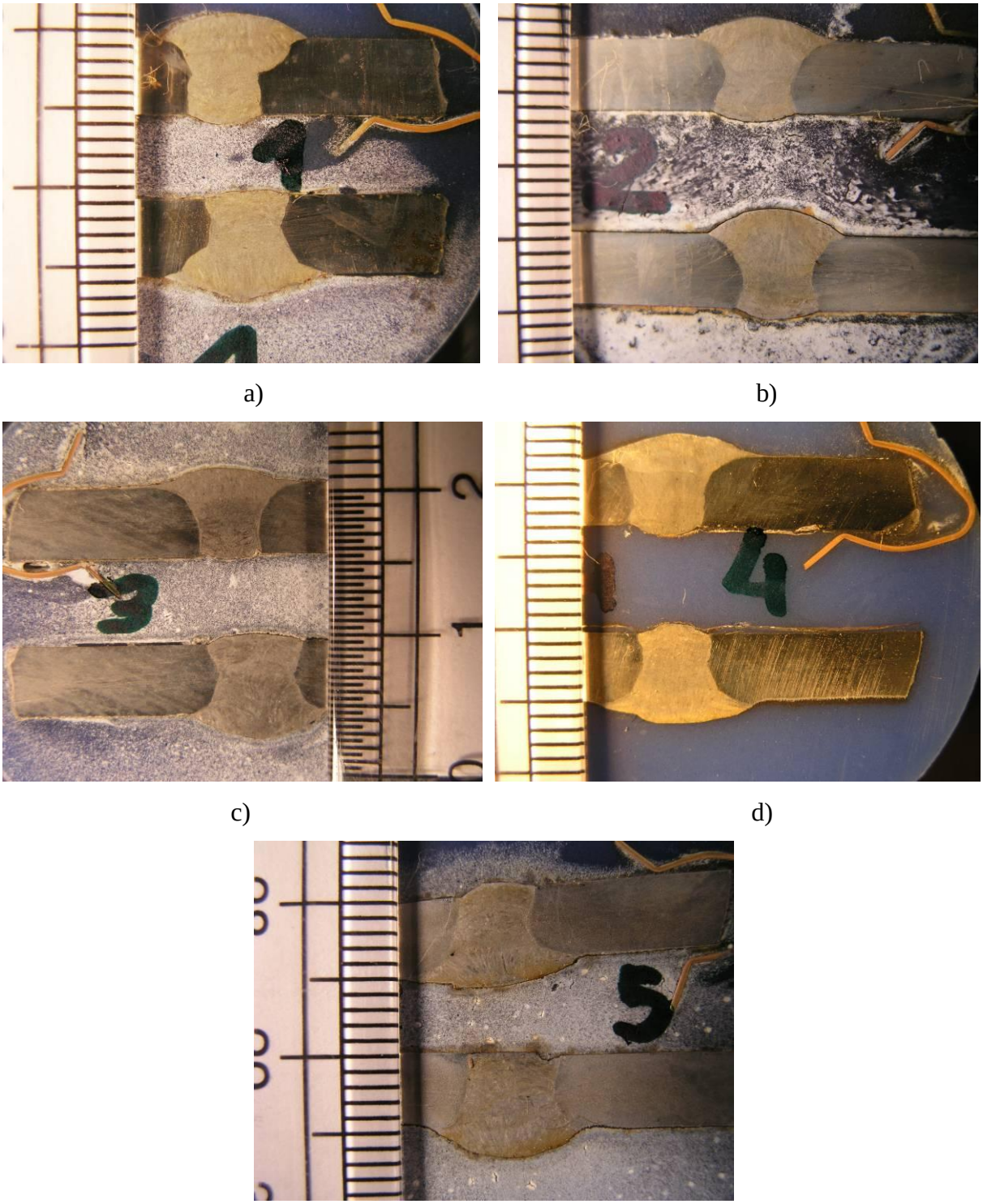
7.2.2 Makrostrukturna ispitivanja

Kod makrostrukturnih ispitivanja izmjerena su nadvišenja i širine lica zavara, te nadvišenja i širine korijena zavara na uzorcima. Mjerenje uzoraka kod makrostrukturnih ispitivanja tj. mjerenje geometrije lica zavara i korijena zavara izvedeno je pomoću računalnog programa ImageJ [23]. Na uzorku P2A iz treće posudice kao primjer za mjerenje je kotirana širina i nadvišenje lica zavara dok je na uzorku P2M iz treće posudice kao primjer kotirano nadvišenje i širina korijena zavara, kao što je prikazano na **slici 57.** Takav način mjerenja također vrijedi i na svim ostalim prikazanim slikama uzoraka, tj. na svakom pojedinom uzorku mjerene su veličine h_L, b_L, h_K i b_K.



Slika 57. Primjer mjerenja geometrijskih veličina na uzorcima.

Izgled svih 10 uzoraka nakon izvedene pripreme uzoraka za dobivanje makro izbrusaka je prikazan na **slici 58.**



a) b)

c) d)

e)

Slika 58. Pripremljeni uzorci za mjerenje geometrije lica i korijena zavara.

Na **slici 58.** pod a) prikazan je uzorak P1M s kvačicom i uzorak P4M, pod b) prikazan je uzorak P5M s kvačicom i uzorak P3M, pod c) prikazan je uzorak P2A s kvačicom i uzorak P2M, pod d) prikazan je uzorak P4A s kvačicom i uzorak P3A, pod e) prikazan je uzorak P5A s kvačicom i uzorak P1A.

Izmjereni podaci s makro izbrusaka uneseni su za svaki pokus u donje tablice te će na kraju biti grafički prikazani i uspoređeni sa podacima iz ostalih pokusa pomoću histograma prikazanih u daljnjem tekstu.

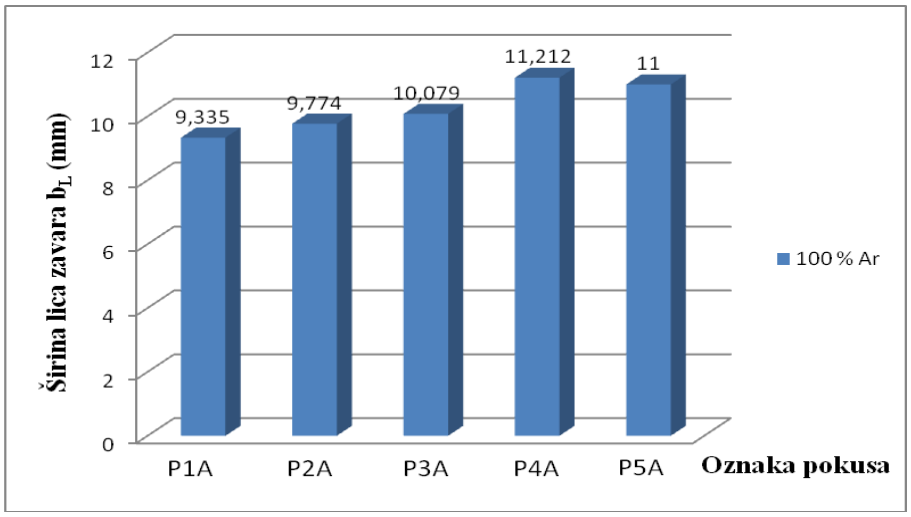
Tablica 35. Geometrijske karakteristike lica zavara.

Geometrijske karakteristike lica zavara		
Pokus	Širina lica zavara, b_L (mm)	Nadvišenje lica zavara, h_L (mm)
P1A	9,335	1,630
P2A	9,774	1,107
P3A	10,079	1,094
P4A	11,212	1,445
P5A	11	1,059
P1M	9,285	1,496
P2M	9,647	1,600
P3M	9,352	1,473
P4M	10,081	1,250
P5M	10,253	1,318

Tablica 36. Geometrijske karakteristike korijena zavara.

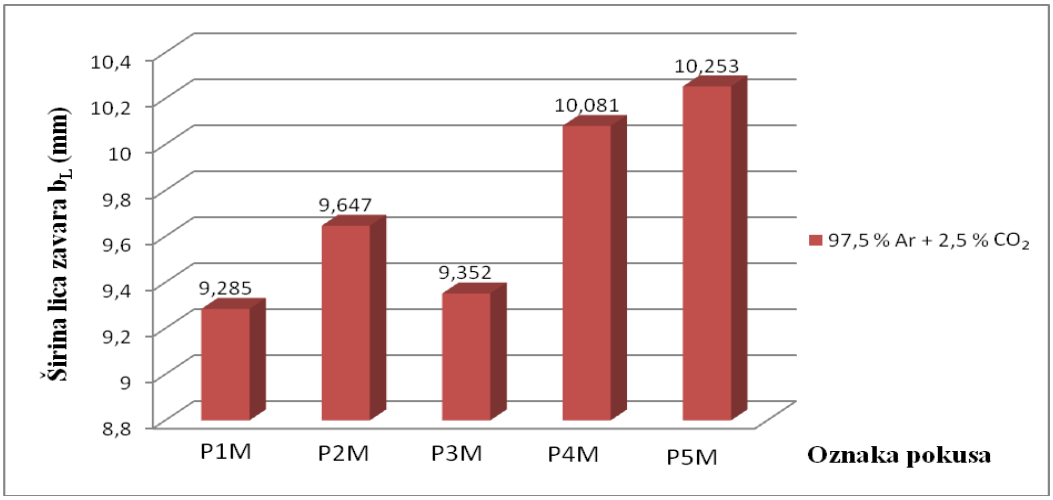
Geometrijske karakteristike korijena zavara		
Pokus	Širina korijena zavara, b_K (mm)	Nadvišenje korijena zavara, h_K (mm)
P1A	4,741	0,252
P2A	4,128	0,344
P3A	4,766	0,625
P4A	4,767	0,620
P5A	5,017	0,630
P1M	4,571	0,571
P2M	6,688	0,522
P3M	5,661	0,620
P4M	5,368	0,323
P5M	5,737	0,660

Iz histograma sa **slike 59.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pojedinog pokusa, tako da povećanje brzine pada struje ipak malo utječe na širinu lica zavara. Osim toga, utjecaj na širinu lica zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju u pravilu širina lica zavara postepeno raste, od minimalne vrijednosti 9,335 mm u pokusu P1A do njegovog maksimuma od 11,212 mm u pokusu P4A.



Slika 59. Histogram širine lica zavara, 100 % Ar.

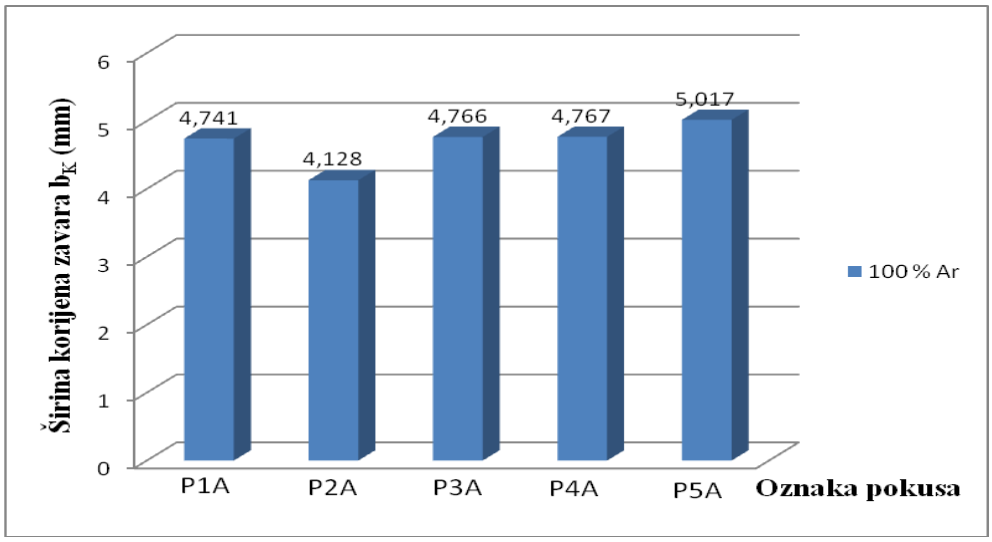
Iz histograma sa **slike 60.** također je vidljivo da izmjereni podaci odstupaju između svakog pojedinog pokusa, tako da povećanje brzine pada struje ipak malo utječe na širinu lica zavara. Osim toga, utjecaj na širinu lica zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju širina lica zavara postepeno raste, od minimalne vrijednosti 9,285 mm u pokusu P1M do njegovog maksimuma od 10,253 mm u pokusu P5M.



Slika 60. Histogram širine lica zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.

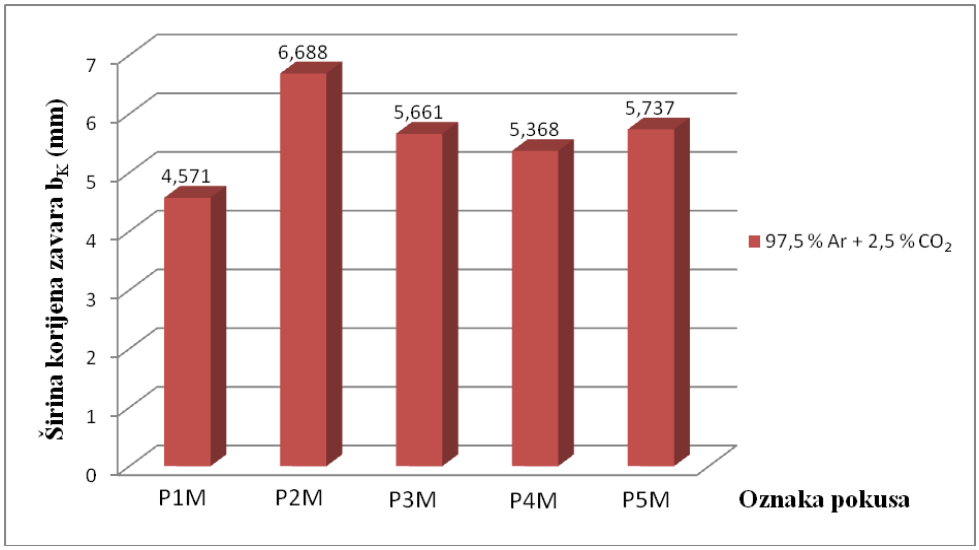
Ako se usporede širine lica zavara kod upotrebe dvaju različitih zaštitnih plinova korištenih u pokusima zavarivanja sa istim parametrima zavarivanja, uočava se da nema značajnijih razlika između dobivenih podataka kod ovih pokusa.

Iz histograma sa **slike 61.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pojedinog pokusa, tako da povećanje brzina pada struje ipak malo utječe na širinu korijena zavara. Osim toga, utjecaj na širinu korijena zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju širina korijena zavara postepeno raste njegovim povećanjem, od minimalne vrijednosti 4,128 mm u pokusu P2A do njegovog maksimuma od 5,017 mm u pokusu P5A.



Slika 61. Histogram širine korijena zavara, 100 % Ar.

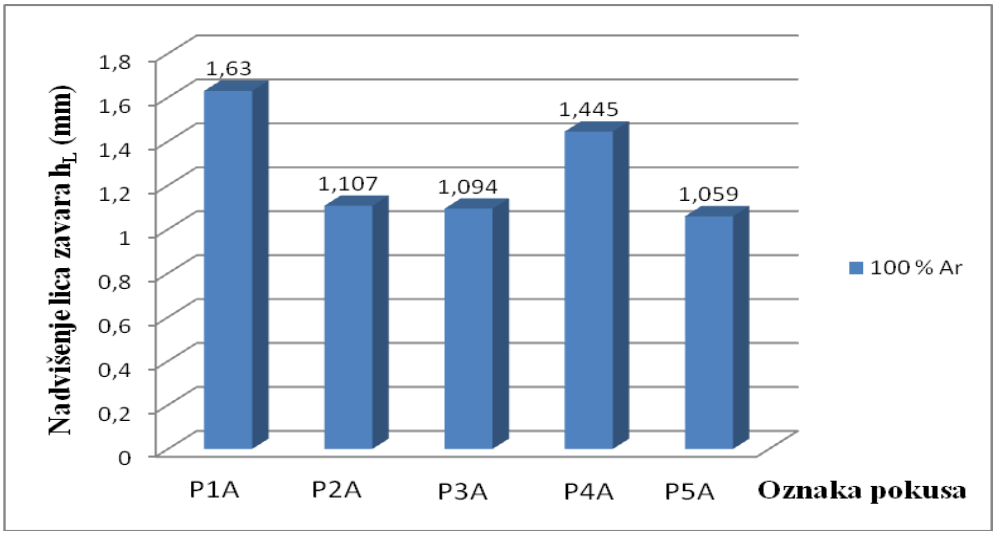
Iz histograma sa **slike 62.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pojedinog pokusa, tako da povećanje brzina pada struje ipak malo utječe na širinu korijena zavara. Osim toga, utjecaj na širinu korijena zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju širina korijena zavara približno je ista u svim pokusima osim u pokusu P2M gdje ima najveću vrijednost od 6,688 mm, a minimalnu vrijednost od 4,571 mm ima u pokusu P1M.



Slika 62. Histogram širine korijena zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.

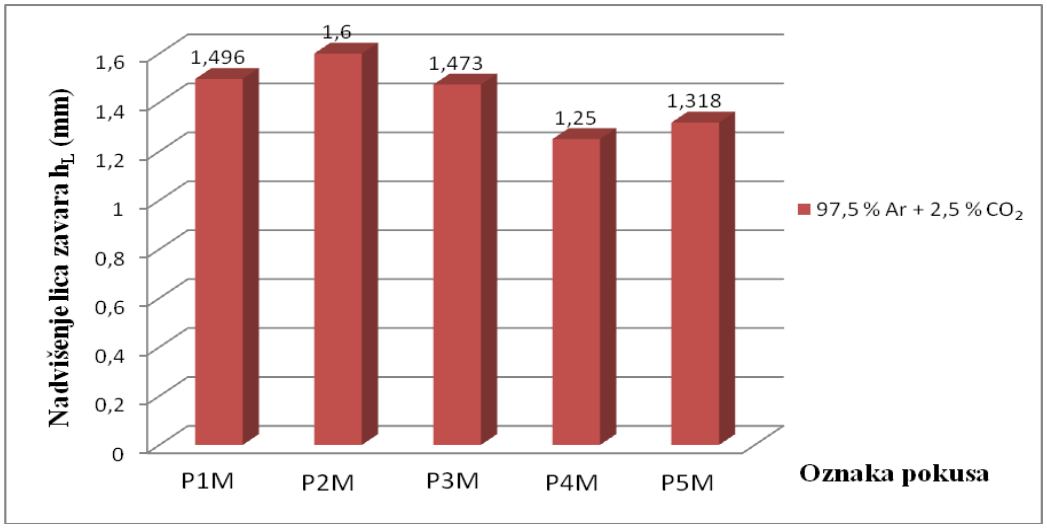
Ako se usporede širine korijena zavara kod upotrebe dvaju različitih zaštitnih plinova korištenih u pokusima zavarivanja sa istim parametrima zavarivanja, uočava se da nema značajnijih razlika između dobivenih podataka kod ovih pokusa.

Iz histograma sa **slike 63.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pokusa, tako da povećanje brzina pada struje ipak malo utječe na nadvišenje lica zavara. Osim toga, utjecaj na nadvišenje lica zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju nadvišenje lica zavara približno je isto u svim pokusima osim u pokusu P1A gdje ima najveću vrijednost od 1,63 mm, a minimalnu vrijednost od 1,059 mm ima u pokusu P5A.



Slika 63. Histogram nadvišenja lica zavara, 100 % Ar.

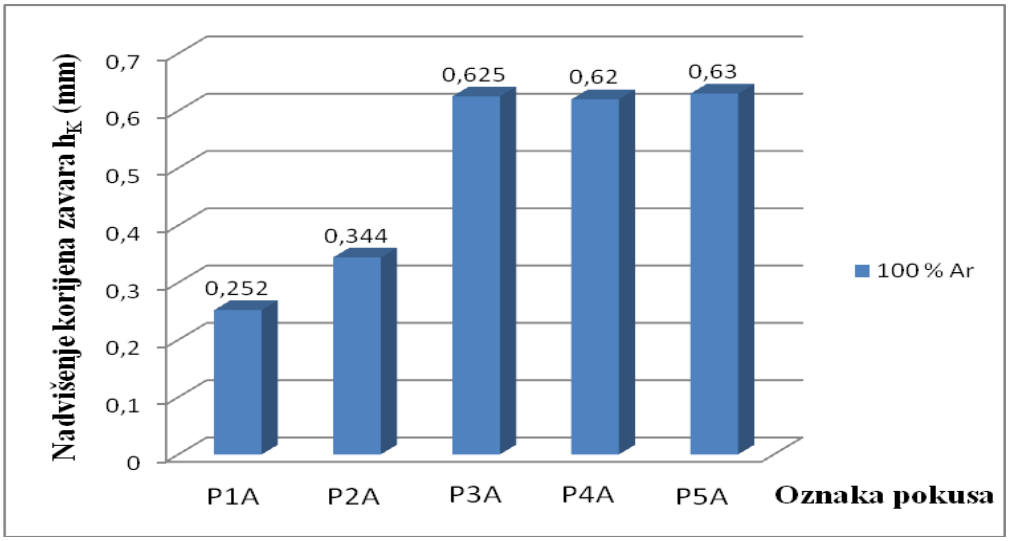
Iz histograma sa **slike 64.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pokusa, tako da povećanje brzina pada struje ipak malo utječe na nadvišenje lica zavara. Osim toga, utjecaj na nadvišenje lica zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju nadvišenje lica zavara približno je isto u svim pokusima osim u pokusu P2M gdje ima najveću vrijednost od 1,6 mm, a minimalnu vrijednost od 1,25 mm ima u pokusu P4M.



Slika 64. Histogram nadvišenja lica zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.

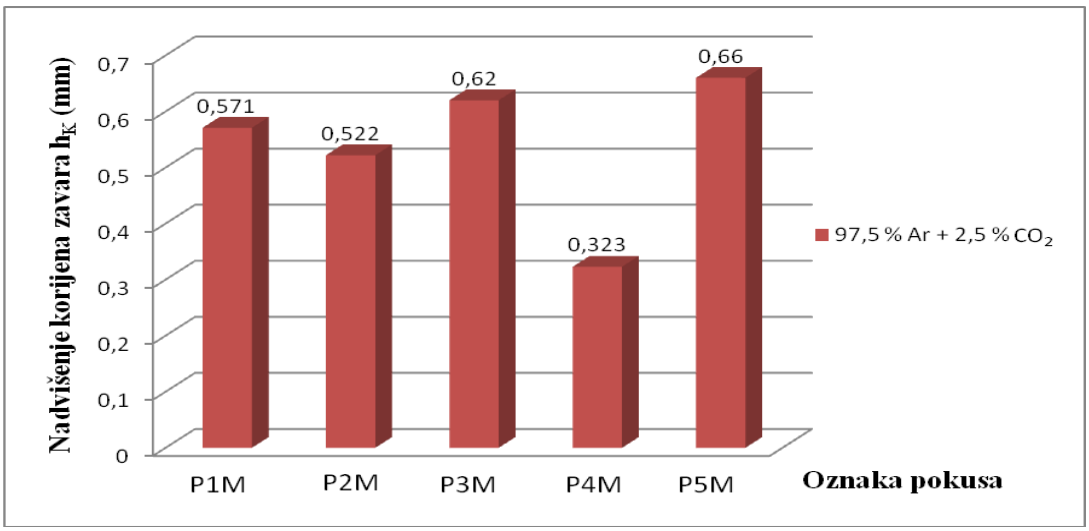
Ako se usporede nadvišenja lica zavara kod upotrebe dvaju različitih zaštitnih plinova korištenih u pokusima zavarivanja sa istim parametrima zavarivanja, uočava se da nema značajnijih razlika između dobivenih podataka kod ovih pokusa.

Iz histograma sa **slike 65.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pokusa, tako da povećanje brzina pada struje ipak utječe na nadvišenje korijena zavara. Osim toga, utjecaj na nadvišenje korijena zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju nadvišenje korijena zavara približno je isto u pokusima P3A, P4A i P5A, dok su skoro duplo manje vrijednosti izmjerene u pokusima P1A i P2A. Maksimalnu vrijednost od 0,63 mm izmjerena je u pokusu P5A, a minimalna vrijednost od 0,252 mm izmjerena je u pokusu P1A.



Slika 65. Histogram nadvišenja korijena zavara, 100 % Ar.

Iz histograma sa **slike 66.** vidljivo je da izmjereni podaci odstupaju između svakog pokusa, tako da povećanje brzina pada struje ipak malo utječe na nadvišenje korijena zavara. Osim toga, utjecaj na nadvišenje korijena zavara može imati i različita brzina zavarivanja između svakog pokusa tj. u ovom slučaju nadvišenje korijena zavara približno je isto u svim pokusima dok u pokusu P4M ima skoro duplo manju vrijednost od ostalih pokusa što iznosi 0,323 mm. Maksimalnu vrijednost od 0,66 mm izmjerena je u pokusu P5M.



Slika 66. Histogram nadvišenja korijena zavara, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2.

Osim gore provedenih makrostrukturnih ispitivanja, na pojedinim makro uzorcima je uočena i pojava ugorina uz zavar. Ugorine uz zavar su oštri zarezi uz zavar na prijelazu zavar – osnovni materijal kod sučeljenog i kutnog spoja. Također se mogu pojaviti i na prijelazu zavar – stranica žlijeba ili zavar – zavar kod višeslojnog zavarivanja. U praksi, najčešće pogreške u obliku ureza uz zavar nastaju oštećenjem od el. luka (ugaranjem).

Ugorine mogu biti mjestimične ili po cijeloj dužini uz zavar. Njihov nastanak je povezan sa nepravilnom tehnikom rada i nepravilnim parametrima zavarivanja. Prejaka struja zavarivanja, predugačak el. luk ili prevelik napon luka dovode do oštećenja uz zavar. Kod MIG/MAG zavarivanja, naročito u okomitom položaju načinom odozdo – gore, prejaka struja zavarivanja, predugi luk i predugo zadržavanje na stranicama spoja, uzrokuju povećano rastaljivanje stranica ili stvaranje prevelike količine taline koja se skuplja na sredini zavara. Na prijelazu ostaje nedostatak metala i oštećenja (ugorine). Najčešće do ugorina dolazi kad je površina uz zavar oksidirana (hrđa), a pojavljuje se u obliku oštre granične crte s jakim urezom. Zbog toga zonu uz zavar treba brušenjem očistiti do metalnog sjaja.

Utjecaj ugorina i drugih oštrih ureza uz zavar ovisi o njihovoj dužini i dubini, a također i o pravcu djelovanja i vrsti opterećenja konstrukcije. Kod dinamičkog opterećenja konstrukcije oštri urezi uz zavar vrlo su štetni jer djeluju kao inicijalne pukotine iz kojih se može razviti pukotina i lom zavarenog spoja. U takvim slučajevima ugorine nisu dopuštene. Kod statički opterećenih konstrukcija ugorine nisu tako opasne, pa se kod manje opterećenih konstrukcija mogu dopustiti [19].

U pokusima sa zaštitnim plinom 100 % Ar došlo je do pojave ugorina u korijenskom dijelu zavara uz ZUT, kao što je prikazano na **slici 58.** Tako npr. na makro izbruscima vidljiva je pojava ugorina većeg intenziteta u uzorku P1A i P4A što je uzrokovalo pojavu pukotina kod tih uzoraka prilikom ispitivanja na savijanje korijena. Na uzorcima P2A, P3A i P5A također su vidljive ugorine u korijenskom dijelu uz ZUT.

Zavari izvedeni sa zaštitnom mješavinom 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 nemaju vidljive ugorine te su također ti zavari ljepšeg vizualnog izgleda od zavara izvedenih sa zaštitnim plinom 100 % Ar.

8 ZAKLJUČAK

MIG/MAG – STT postupak predstavlja noviji postupak zavarivanja pa se razlikuje od dosadašnjih postupaka zavarivanja po drugačije izvedenom izvoru struje za zavarivanje. Najveća prednost ovog postupka je u zavarivanju korijenskih prolaza kod debelostijenih cijevi i limova te kod zavarivanja tanjih limova zbog manjeg unosa topline.

Prednost MIG/MAG – STT postupka prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika je smanjeni unos topline, jer kako je navedeno, ti čelici imaju visoki koeficijent toplinske rastezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti što rezultira povećanom sklonošću deformacijama kao posljedicom zavarivanja. Smanjivanjem pojave deformacija i nepotrebnog naprezanja materijala također uklanjamo mogućnost pojave napetosne korozije.

Analizom dobivenih rezultata prilikom izvedenih mehaničkih ispitivanja savijanjem te mikro i makrostrukturnih ispitivanja zavarenih uzoraka, utvrđeno je da MIG/MAG – STT postupak zavarivanja pokazuje bolja svojstva zavarenog spoja prilikom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika s zaštitnom plinskom mješavinom 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 nego s zaštitnim plinom 100 % Ar koristeći iste parametre zavarivanja. Dokaz ovoj tvrdnji je u tome da je prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava došlo do pojave pukotina u ZUT – u korijenskog dijela zavara kod dva uzorka koja su zavarena zaštitnim plinom 100 % Ar, a kod plinske mješavine nije došlo do pojave pukotina ni kod jednog od ispitivanih uzoraka. Također, osim pojave pukotina, svi uzorci zavareni sa zaštitnim plinom 100 % Ar imali su lošiji izgled korijena i lica zavara.

Osim gore navedenog, na svim ispitnim uzorcima zavarenim sa zaštitnim plinom 100 % Ar došlo je do pojava ugorina uz zavar u korijenskom dijelu zavarenog spoja, što je vjerojatno i najveći uzrok pojavi pukotina prilikom provedenog ispitivanja zavarenih uzoraka na savijanje. Kao što je prije navedeno njihov nastanak je povezan sa nepravilnom tehnikom rada i nepravilnim parametrima zavarivanja. Stoga da bi se pravilno izvelo zavarivanje sa zaštitnim plinom 100 % Ar potrebno je ponovno izvršiti određeni broj pokusa gdje bi se definirali optimalni parametri zavarivanja, jer uzrok ugorinama je prejaka struja zavarivanja, predugačak el. luk ili prevelik napon luka.

Izmjerene geometrijske vrijednosti sa makro izbrusaka, nadvišenja lica i korijena zavara te širina lica i korijena zavara, približno su iste kod upotrebe zaštitnog plina i mješavine plinova bez obzira na mijenjanu vrijednost brzine pada struje kod svakog pokusa zavarivanja.

Može se zaključiti da je na geometriju zavara najviše utjecala brzina zavarivanja i utjecaj zaštitnog plina tj. plinske mješavine, a vrijednosti brzine pada struje imaju neznatan utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Pošto se je zavarivanje izvodilo ručno, nije bilo moguće postići iste brzine zavarivanja kod svakog pojedinog pokusa zavarivanja što je na kraju i rezultiralo u malim razlikama između geometrija zavara.

Zavari izvedeni mješavinom plinova daju osim boljih mehaničkih svojstava, ljepši vizualni izgled lica i korijena zavara. Zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika MIG/MAG – STT postupkom preporučljivo je izvoditi s mješavinom plinova 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 ako će se upotrebljavati isti uvjeti i parametri zavarivanja kao i u ovom radu. Za drugačije uvjete zavarivanja (položaj zavarivanja, vrsta spoja, osnovni i dodatni materijal) treba pažljivo pristupiti odabiru optimalnih parametara zavarivanja kao i pravilnom odabiru zaštitnog plina ili mješavine plinova za zavarivanje.

9 LITERATURA

[1] DeRuntz B. D.: Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry, NAIT, USA, 2003.

[2] Despotović B.; Samardžić I.; Marsenić T.: Neka gledišta primjene MAG – STT postupka zavarivanja u kotlogradnji, Zavarivanje, Zagreb, 50/2007, str. 33 do 38.

[3] Pavić J.; Samardžić I.; Ivandić Ž.: Primjena STT postupka zavarivanja u izradi kompenzatora, DTZ, Slavonski Brod, 14. – 16. studeni 2007.

[4] …….. Lincoln Electric: Operator's manual Invertec STT 2, Ohio, USA, 2003.

[5] Živčić M.: MIG/MAG zavarivanje, DTZ, Zagreb, 1986.

[6] …….. Lincoln Electric Europe: STT II i LF 30, EU, www.treatrade.hr/pdf/Invertec STT-II & LF 30.pdf

[7] …….. The Lincoln Electric Company: Surface Tension Transfer (STT), USA, http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx220.pdf

[8] …….. FSB Zagreb: Katedra za zavarene konstrukcije, www.fsb.hr/zavkon/hrv/download/MIG_MAGzav1.ppt

[9] Kralj S.; Andrić Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, FSB, Zagreb, 1992.

[10] …….. The Lincoln Electric Company: Invertec STT II, USA, http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/e452.pdf

[11] …….. Euro Inox: Practical Guidelines for the Fabrication of High Performance Austenitic Stainless Steels, www.euro-inox.org/pdf/map/HighPerformanceAustenitics_EN.pdf

[12] …….. SFSB Slavonski Brod: Zavarivanje i navarivanje visokolegiranih feritnih (F), martenzitnih (M) i austenitnih (A) čelika, http://brod.sfsb.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf

[13] Juraga I.; Šimunović V.; Stojanović I.: Zavarivanje Cr – Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, DTZ, Pula, 24.05.2007.

[14] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.

[15] …….. Stahlschluessel 2001: Key to steel 2001, Version 3.00

[16] …….. Bohler Welding: Welding Guide, Edition 06/2009

[17] …….. The Procedure Handbook of Arc Welding, J.F. Lincoln Arc Welding Foundation, Fourteenth Edition, USA, 2000.

[18] Kraut B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, zagreb, 1982.

[19] Juraga I.; Ljubić K.; Živčić M.: Pogreške u zavarenim spojevima, HDTZ, Zagreb, 2000.

[20] Melfi T.: New Code Requirements for Calculating Heat Input, Welding Journal, AWS, USA, 06/2010.

[21] …….. ISO 15614 – 1:2004: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – WPS, Dio 1.: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i niklovih legura

[22] …….. EN 910:1996: Razorna ispitivanja zavara metalnih materijala – Test savijanja

[23] …….. ImageJ: Image Processing and Analysis in Java, http://rsbweb.nih.gov/ij/