

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ivan Hajdu**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc Zoran Kožuh

Student:

Ivan Hajdu

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru dr.sc. Zoranu Kožuhu na mentorstvu, asistentici dr.sc. Maji Jurici na svesrdnoj pomoći i strpljenju u izradi ovog rada, te docentu dr.sc. Ivici Garašiću na pomoći i korisnim savjetima.

Zahvaljujem se djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije i Laboratorija za zaštitu materijala na pomoći prilikom izrade ovoga rada.

Posebno želim zahvaliti svojim roditeljima što su mi omogućili školovanje, također mojoj sestri, djevojci i prijateljima na podršci i motivaciji tijekom cijelog studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN HAJDU**

Mat. br.: **0035179243**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA AKTIVACIJSKOG PREMAZA PRI PLAZMA ZAVARIVANJU AUSTENITNIH ČELIKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF ACTIVATION FLUX IN PLASMA WELDING OF AUSTENITIC STEELS**

Opis zadatka:

Proučiti fizikalne mehanizme plazma zavarivanja i detaljno specificirati parametre te osnovne načina rada. Usporediti plazma i TIG zavarivanje sa stanovišta produktivnosti i kvalitete zavarenog spoja pri čemu posebno naglasiti utjecaj i djelovanje aktivacijskog premaza. Analizirati zavarljivost austenitnih čelika i dati pregled zaštitnih plinova i dodatnih materijala primjenjivih za zavarivanje plazmom. Prikazati primjere primjene plazma zavarivanja u industrijskoj proizvodnji.

U eksperimentalnom dijelu na prikladnom osnovnom materijalu iz grupe austenitnih visokolegiranih nehrđajućih čelika osmisliti plan pokusa koji će omogućiti kvantifikaciju utjecaja aktivacijskog premaza pri plazma zavarivanju. Kemijski sastav aktivacijskog premaza odrediti na temelju dosadašnjih istraživanja baziranih na TIG postupku. Za nekoliko razina parametara zavariti ispitne uzorke te naknadnom analizom odrediti utjecaj pojedinog aktivacijskog premaza na geometriju spoja i kemijski sastav zavara. U konačnici donijeti zaključke o mogućnostima primjene aktivacijskog premaza za automatizirano zavarivanje austenitnih čelika.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadan:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predvideni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

## SADRŽAJ :

1. UVOD .....	1
2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI I NJIHOVA ZAVARLJIVOST .....	2
3. PLAZMA ZAVARIVANJE.....	5
3.1 Razvoj i princip plazma zavarivanja .....	5
3.2 Plazma – četvrto agregatno stanje tvari.....	8
3.3 Podjela postupaka plazma zavarivanja .....	10
3.3.1 Plazma MIG zavarivanje .....	10
3.4 Plazma zavarivanje praškom .....	11
3.5 Plazma zavarivanje prenešenim lukom .....	12
3.6 Plazma zavarivanje s neprenešenim lukom.....	13
3.7 Plazma zavarivanje s djelomično prenešenim lukom.....	14
3.8. Radna područja i parametri plazma zavarivanja .....	15
5.1 Mikroplazma zavarivanje .....	15
3.8.1 Plazma zavarivanje taljenjem.....	17
3.8.2 Plazma zavarivanje protaljivanjem; metoda “ključanice“ .....	17
5.4 Parametri plazma zavarivanja .....	18
3.9 Oprema za plazma zavarivanje.....	21
3.9.1 Izvor struje za zavarivanje.....	21
3.9.2 Pištolj za zavarivanje.....	23
3.9.3 Elektroda .....	25
3.9.4 Plinovi za plazma zavarivanje .....	26
3.9.5 Utjecaj helija na cijenu i zavarljivost .....	28
3.9.6 Dodatni materijal.....	29
3.10. Priprema spoja i utjecaji na zavarljivost.....	30
3.10.1 Priprema spoja.....	30
3.10.2 Položaji zavarivanja .....	31

3.10.3 Zavarljivost.....	31
3.10.4 Debljina materijala .....	32
3.11 Prednosti i nedostaci plazma zavarivanja.....	33
3.12 Razlika unosa energije i isplativost između TIG i plazma postupka .....	34
3.13 Primjena plazma zavarivanja u praksi.....	36
3.13.1 Zavarivanje lima CrNi čelika AISI 304 debljine 1mm .....	36
3.11.4 Primjena plazma-MIG postupka za zavarivanje posuda za skladištenje nuklearnog otpada .....	37
3.11.5 Ostali primjeri plazma zavarivanja u praksi.....	38
4. UTJECAJ I DJELOVANJE AKTIVACIJSKOG PREMAZA KOD PLAZMA ZAVARIVANJA.....	40
4.1 Svojstva i sastav aktivnog premaza.....	40
4.2 Princip rada plazma zavarivanja s aktivacijskim talilom .....	41
4.3 Mehanizmi utjecaja aktivnog talila .....	42
4.5 Plazma zavarivanje austenitnih čelika uz primjenu aktivacijskog premaza.....	45
5. EKSPERIMENTALNI RAD .....	47
5.1 Oprema i izvor struje za zavarivanje.....	47
5.2. Osnovni materijal .....	48
5.3. Aktivacijski premazi .....	49
5.4 Tehnologija plazma zavarivanja austenitnih čelika.....	50
5.4.1 Zaštitni i plazmeni plin.....	50
5.4.2 Priprema uzoraka za navarivanje – čišćenje površine.....	50
5.4.3. Priprema aktivacijskih premaza .....	51
5.4.4. Specifikacija postupka navarivanja .....	52
5.2 Navarivanje uzoraka.....	53
5.3 Geometrijske značajke makroizbrusaka navara .....	59
5.4 Rezultati određivanja kemijskog sastava metala navara .....	65

6. ZAKLJUČAK .....	68
7. POPIS LITERATURE .....	70

## POPIS SLIKA :

<i>Slika 1.</i> Usporedba postupaka zavarivanja s obzirom na širinu luka .....	6
<i>Slika 2.</i> Shematski prikaz postupaka zavarivanja taljenjem .....	7
<i>Slika 3.</i> Ilustracija promjene agregatnih stanja .....	8
<i>Slika 4.</i> Prikaz odnosa porasta temperature i povećanja zapremljene energije po volumenu plinova .....	9
<i>Slika 5.</i> Pištolj za plazma MIG zavarivanje .....	10
<i>Slika 6.</i> Pištolj za plazma zavarivanje praškom .....	11
<i>Slika 7.</i> Plazma zavarivanje prenesenim lukom .....	12
<i>Slika 8.</i> Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom .....	13
<i>Slika 9.</i> Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom.....	14
<i>Slika 10.</i> Radna točka kod plazma i TIG zavarivanja .....	16
<i>Slika 11.</i> Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom .....	17
<i>Slika 12.</i> Oprema za plazma zavarivanje .....	21
<i>Slika 13.</i> Blok dijagram treće generacije inverterskih ispravljača, frekvencije preko 100 Hz	22
<i>Slika 14.</i> Inverterski uređaji za plazma zavarivanje .....	22
<i>Slika 15.</i> Strmo padajuća i ravna karakteristika .....	23
<i>Slika 16.</i> Pištolj za mikroplazma (lijevo) i plazma (desno) zavarivanje .....	24
<i>Slika 17.</i> Poprečni presjek pištolja za plazma zavarivanje .....	25
<i>Slika 18.</i> Usporedba troškova i utjecaj helija na provar .....	28
<i>Slika 19.</i> Odnos depozita po satu i jakost struje kod TIG-a i PAW-a .....	29
<i>Slika 20.</i> Prikaz troškova u zavarivanju materijala 304L, debljina stijenke 4 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti .....	34
<i>Slika 22.</i> Priprema pri zavarivanju CrNi čelika AISI 304 debljine 1 mm .....	36
<i>Slika 23.</i> Shematski prikaz odjeljaka posude zavarenih plazma-MIG postupkom .....	37
<i>Slika 24.</i> Primjena plazma postupka .....	38
<i>Slika 25.</i> Ručno plazma zavarivanje u BMW-oj tvornici .....	39



<i>Slika 26.</i> Shematski prikaz pripreme aktivnog talila, miješanje te nanošenje talila na ploču koja se zavaruje .....	42
<i>Slika 27.</i> Marangonijev efekt strujanja fluida .....	43
<i>Slika 28.</i> Mehanizam nastanka električnog luka kod A-TIG procesa po Lucas-u i Howse-u .	44
<i>Slika 29.</i> Dobiveni makro izbrusci za TIG i plazma zavarivanje .....	46
<i>Slika 30.</i> Izvor struje Castotig 3002 AC/DC .....	47
<i>Slika 31.</i> Aktivacijske komponente premaza .....	49
<i>Slika 32.</i> Priprema osnovnog materijala, lijevo-neočišćeno, desno-očišćeno .....	50
<i>Slika 33.</i> Izgled pripremljenih aktivacijskih A-TIG premaza .....	51
<i>Slika 34.</i> Oprema za automatizirano plazma zavarivanje.....	53
<i>Slika 35.</i> Prikaz udaljenosti pištolja od radnog komada.....	54
<i>Slika 36.</i> Prikaz navara svih ispitnih uzoraka.....	56
<i>Slika 37.</i> Usporedba unosa topline i brzine navarivanja ovisno o vrsti aktivacijskog premaza.	57
<i>Slika 38.</i> Prikaz odnosa napona i brzine navarivanja ovisno o vrsti aktivacijskog premaza ...	58
<i>Slika 39.</i> Izrezane ploče na plazma rezačici .....	60
<i>Slika 40.</i> Izrezani uzorci na tračnoj pili.....	60
<i>Slika 41.</i> Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (1,2 i 3) i s aktivacijskim premazom SiO <sub>2</sub> (A1, A2 i A3).....	61
<i>Slika 42.</i> Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (1,2 i 3) i s aktivacijskim premazom Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (B1, B2 i B3).....	62
<i>Slika 43.</i> Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (1,2 i 3) i s aktivacijskim premazom TiO <sub>2</sub> (C1, C2 i C3).....	63
<i>Slika 44.</i> Grafički prikaz širine zavora u odnosu na brzinu navarivanja .....	64
<i>Slika 45.</i> Grafički prikaz penetracije navara u odnosu na brzinu navarivanja .....	64
<i>Slika 46.</i> Dijagram promjene masenih udjela kemijskih elemenata u metalu zavora ispitivanih uzoraka .....	66

**POPIS TABLICA:**

Tablica 1. Utjecaj pojedinih elemenata na austenitni nehrđajući čelik .....	2
Tablica 2. Standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 ....	4
Tablica 3. Radna područja i primjena plazma zavarivanja .....	15
Tablica 4. Parametri za ručno mikroplazma zavarivanje čelika X5CrNi 18.10 .....	16
Tablica 5. Parametri za mehanizirano plazma zavarivanje ključanicom čelika X5CrNi 18.10 .....	18
Tablica 6. Odabir promjera i kuta vrha volframove elektrode s obzirom na jačinu struje .....	25
Tablica 7. Označavanje volframovih elektroda prema boji i kemijskom sastavu .....	26
Tablica 8. Protoci plazmenog i zaštitnog plina i odabir sapnica .....	27
Tablica 9. Opće smjernice pri odabiru zaštitnog i plazmenog plina .....	27
Tablica 10. Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja .....	30
Tablica 11. Mogućnosti zavarivanja u pojedinim položajima .....	31
Tablica 12. Zavarljivost osnovnog materijala plazma postupkom .....	31
Tablica 13. Raspon debljine osnovnog materijala u odnosu na broj prolaza .....	32
Tablica 14. Prednosti i nedostaci plazma zavarivanja .....	33
Tablica 15. Kemijski sastav osnovnog materijala (AISI 304) .....	45
Tablica 16. Parametri za zavarivanje osnovnog materijala (AISI 304) .....	45
Tablica 17. Mehanička svojstva niskougličnog austenitnog čelika .....	48
Tablica 18. Kemijska sastav čelika AISI 304.....	48
Tablica 18. Specifikacija postupka navarivanja .....	52
Tablica 19. Parametri automatiziranog plazma navarivanja austenitnih ploča AISI 304 debljine 5 mm s različitim aktivacijskim premazima .....	55
Tablica 20. Rezultati analize kemijskog sastava metala navara.....	65

**POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_5$	%	postotno produljenje
$A$	%	istežljivost
$d$	mm	promjer elektrode
$I$	A	jakost struje
$U$	V	napon
$KU$	J	udarni rad loma
$k$		koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja
$Q$	kJ/mm	unos topline
$Q_P$	l/min	protok plina
$Rm$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$v_z$	cm/min	brzina zavarivanja
$w$	%	maseni udio
$\vartheta$	°C	temperatura

## SAŽETAK

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi utjecaj pojedinog aktivacijskog premaza na geometriju spoja i kemijski sastav pri plazma navarivanju austenitnog čelika. Geometrijskom analizom makroizbrusaka te kemijskom analizom dobivenih navara utvrdio se utjecaj pojedinih komponenata aktivacijskog premaza na svojstva navara i tehnološku primjenu u praksi. U istraživanju odabrane su 3 aktivacijske komponente ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{TiO}_2$ ). Zavarivanje je izvedeno pomoću uređaja za mehanizirano zavarivanje kako bi se što više smanjio ljudski utjecaj na dobiveni rezultat te kako bi se utvrdila moguća primjena aktivacijskog premaza za automatizirano zavarivanje austenitnih čelika.

U zaključku je utvrđeno i objašnjeno kako sva tri aktivacijska premaza utječu na kemijski sastav i profil navara. Primjena aktivacijskih premaza za automatizirano zavarivanje austenitnih čelika je moguća, te je moguće postići značajne uštede.

Ključne riječi: Plazma navarivanje, aktivacijski premazi, austenitni čelici, AISI 304.

## SUMMARY

The aim of this thesis was to determinate the influence of each activation flux on geometric and chemical composition on the plasma arc welding of the austenitic steel. Geometric and chemical analysis of macro specimen obtained of weld bead found to influence of each individual components of activation flux on the activation properties of the bead and technological implementation. The study selected the 3 activation components ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$ ). Welding is performed using a mechanized welding in order to reduce as much as possible human influence on this result and to determine the possible application of the activation flux for automated welding austenitic steels.

In conclusion, it was found that all three activation flux have affect on the chemical composition and weld bead. Application of activation flux for automated welding of austenitic steels is possible, and it is possible to achieve significant savings.

Keywords: Plasma bead on plate welding, activation flux, austenitic steels, AISI 304.

## 1. UVOD

Plazma zavarivanje je jedan od novijih postupaka zavarivanja taljenjem. Ukratko rečeno plazma zavarivanje ili skraćeno PAW (eng. Plasma Arc Welding), je zavarivanje zaštićenom volframovom elektrodom uz zaštitu plina koju karakterizira vrlo uzak plazmeni luk. Kod ovog postupka to se postiže plazmeni plinom, kod kojeg dolazi do ionizacije pri vrlo visokim temperaturama. Postupak se često zamjenjuje s TIG-om, ali razlika je u izgledu pištolja i volframovoj elektrodi koja ne sudjeluje u stvaranju metala zavara.

Zavarivanje plazmom se još nažalost rijetko pojavljuje u praksi unatoč brojnim prednostima. Postupak karakterizira stabilan prijenos luka, mala površina ZUT-a, velike brzine zavarivanja, dobra penetracija, zavarivanje niskim strujama itd. Neki od nedostataka procesa plazma zavarivanja su sljedeći: od zavarivača i operatera se traži visoka profesionalnost i poznavanje procesa, potrebno je podesiti mnoštvo parametara za stabilan proces, a tu je još i relativno mnogo skupe opreme. Svakim danom tehnologija donosi novitete i pokušava unaprijediti postupke zavarivanja.

U ovom diplomskom radu prikazane su specifičnosti zavarivanja plazma postupkom te utjecaj aktivacijskog premaza kod plazma zavarivanja. U prvom dijelu rada ukratko su prikazane specifičnosti austenitnih nehrđajućih čelika i njihova zavarljivost. Dalje u drugom dijelu opisani su postupci plazma zavarivanja kao i područja rada, oprema i primjeri iz prakse. U trećem dijelu prikazan je princip rada s aktivacijskim premazom te njegova uloga kod plazma zavarivanja. U zadnjem dijelu opisan je eksperimentalni rad, a nakon toga slijedi zaključak i popis literature.

## 2. AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI I NJIHOVA ZAVARLJIVOST

Austenitni nehrđajući čelici su zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, izvrsne zavarljivosti te mehaničkih svojstava najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Svoju primjenu našli su u svim granama industrije i građevinarstvu.

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02 % – 0,15 % C, 15 % – 20 % Cr, 7 % – 20 % Ni, uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titana, niobija, tantala, dušika. Najpoznatiji predstavnik ove grupe čelika je čelik Cr-Ni (18/8), a legiranjem su razvijene ostale legure. Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. U tablici 1., je prikazan utjecaj pojedinih legiranih elemenata na čelik. Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje dubokim hlađenjem ili hladnom deformacijom. Međutim, mikrostruktura ove skupine nehrđajućih čelika prvenstveno može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna [1].

Tablica 1. Utjecaj pojedinih elemenata na austenitni nehrđajući čelik [2]

Element	Tvori strukturu	Karakteristike
C	A (austenit)	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati $Cr_{23}C_6$ i uzrokovati interkristalnu koroziju - IKK.
Cr	F (ferit)	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost Ni.
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću. Pomaže stvaranju ferita.
Nb		Dodaje se čeliku min $Nb \geq 8 \times \% C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna.
Mn	A	Sprečava vruće pukotine stvaranjem $MnS$ . $\gamma$ - gen.
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita ( $\alpha$ - gen).
P, S, Se	-	Olakšava obradu odvajanjem čestica. Pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpornost oksidaciji) Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije. Pomaže stvaranje ferita.
Ti	-	Dodaje se čeliku $Ti \geq 5 \times \% C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna. Pomaže stvaranje ferita.

Austenitni nehrđajući čelici smatraju se lakše zavarljivim od ostalih skupina korozijski postojanih Cr-Ni čelika iz razloga što kod njih ne nastupaju velike fazne (metalurške)

transformacije. Zbog toga je moguće postići zavarene spojeve koji posjeduju svojstva slična onima osnovnog materijala i bez prethodnog zagrijavanja ili pak naknadne toplinske obrade. No i kod ovih konstrukcijskih materijala zahtijeva se odgovarajuća tehnološka razina i disciplina, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Naime, visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću ka deformacijama kao posljedica zavarivanja. Potrebno je zavarivati u što hladnijem stanju (malim unošenjem topline), što se postiže sljedećim mjerama [3]:

1. Nema predgrijavanja.
2. Temperatura između prolaza treba biti što niža, npr. max. 100 °C.
3. Unos topline treba biti što niži

Ova grupa čelika nije sklona povećanju zrna u ZUT-u, a za razliku od ostalih vrsta čelika ima znatno veću žilavost i istezljivost koju zadržava i na sniženim temperaturama.

Najveći problem prilikom zavarivanja ove grupe čelika predstavlja pojava senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 °C do 850 °C. Stoga se nakon zavarivanja ovi čelici "gase" toplinskom obradom na 1050 °C do 1100 °C, a zatim brzim hlađenjem kroz područje 850 °C do 450 °C se zadržava struktura austenita bez izlučenog Cr na granicama zrna vezanog u Cr-karbid. Za poboljšanje hlađenja ponekad se preporuča i dodatno hlađenje vodom.

Izlučeni karbidi sprječavaju dislokaciju atoma na pravcima i ravninama klizanja plošno centrirane austenitne rešetke, što smanjuje istezljivost i žilavost austenitne strukture. Ako je prisutan agresivan medij u eksploataciji, tada će uz granice zrna doći do interkristalne korozije, jer nema dovoljno Cr, koji je migrirao na granicu zrna tvoreći  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  s 94,3 % Cr [1].

Izlučivanje karbida odnosno pojava interkristalne korozije može se spriječiti:

1. Legiranjem elementima karbidotvorcima Nb, Ti, Ta,
2. Smanjenjem sadržaja ugljika,
3. Toplinskom obradom gašenja i
4. Malim unosom topline tijekom zavarivanja.

Prilikom zavarivanja postoji mogućnost izlučivanja  $\sigma$  (sigma) i  $\chi$  (hi) faze koje nepovoljno djeluju na zavareni spoj radi smanjenja žilavosti i istezljivosti, a i smanjenja korozijske otpornosti.

Također, problem mogu predstavljati i tople pukotine kao posljedica unošenja nečistoća, posebno sumpora i fosfora u metal zavara. Prilikom hlađenja zavarenog spoja, a zbog djelovanja naprezanja, dolazi do nastajanja toplih pukotina na mjestima gdje se nalaze nečistoće. Nečistoće su zbog utjecaja topline pri zavarivanju djelomično ili potpuno rastaljene. Dakle, u ZUT-u ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, ali zbog omekšavanja ili taljenja tankih slojeva filma nečistoće, dolazi do pada čvrstoće po granicama zrna.

U tablici 2., prikazane su standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika.

Tablica 2. Standardne vrste austenitnih nehrđajućih čelika prema HRN EN 10088-1:2007 [4]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X10CrNi18-8	1.4310	0.05/0.15	2.00	2.00	0.045	0.015	0.11	16.0/19.0	0.80	6.0/9.5	-
X2CrNi18-7	1.4318	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.10/0.20	16.5/18.5	-	6.0/8.0	-
X2CrNi18-9	1.4307	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	17.5/19.5	-	8.0/10.5	-
X2CrNi19-11	1.4306	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	18.0/20.0	-	10.0/12.0	-
X2CrNi18-10	1.4311	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.12/0.22	17.5/19.5	-	8.5/11.5	-
X5CrNi18-10	1.4301	0.07	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	17.5/19.5	-	8.0/10.5	-
X8CrNiS18-9	1.4305	0.10	1.00	2.00	0.045	0.15/0.35	0.11	17.0/19.0	-	8.0/10.0	Cu: 1.00
X6CrNiTi18-10	1.4541	0.08	1.00	2.00	0.045	0.015	-	17.0/19.0	-	9.0/12.0	Ti: 5C/0.70
X4CrNi18-12	1.4303	0.06	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	17.0/19.0	-	11.0/13.0	-
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	16.5/18.5	2.00/2.50	10.0/13.0	-
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.12/0.22	16.5/18.5	2.00/2.50	10.0/12.0	-
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	0.07	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	16.5/18.5	2.00/2.50	10.0/13.0	-
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	0.08	1.00	2.00	0.045	0.015	-	16.5/18.5	2.00/2.50	10.5/13.5	Ti: 5C/0.70
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	16.5/18.5	2.50/3.00	10.5/13.0	-
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.11	17.0/19.0	2.50/3.00	12.5/15.0	-
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	0.030	1.00	2.00	0.045	0.015	0.12/0.22	16.5/18.5	4.0/5.0	12.5/14.5	-
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	0.020	0.70	2.00	0.030	0.010	0.15	19.0/21.0	4.0/5.0	24.0/26.0	Cu: 1.20/2.00



### 3. PLAZMA ZAVARIVANJE

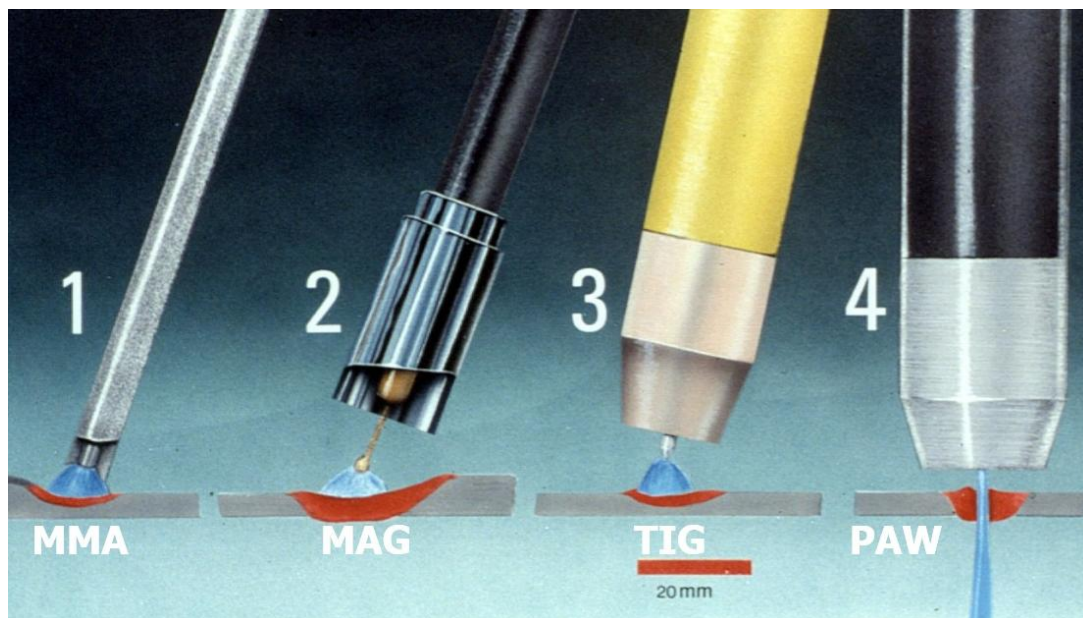
#### 3.1 Razvoj i princip plazma zavarivanja

Većina postupaka zavarivanja otkrivena je u ovom i prošlom stoljeću, može se reći da su otkriveni u ovom vijeku. Samo neki postupci kao što je zavarivanje kovanjem, zavarivanje lijevanjem i lemljenje bili su poznati već u starom vijeku. Na samom početku za zavarivanje se koriste ugljične elektrode, a ubrzo nakon toga u upotrebu dolaze i čelične elektrode. Velik korak u razvoju zavarivanja ostvario je švedanin Oskar Kjellberg 1907. koji je patentirao obloženu elektrodu. Još jedna vrlo stara metoda je zavarivanje plamenom ili plinsko zavarivanje koje koristi plinove acetilen i kisik za postizanje temperature plamena preko 2500 °C. U 1930. godinama dolazi do pojave novih tehnologija, u to vrijeme većina postupaka je bila provedena ručno iako je bilo pokušaja automatiziranja REL procesa, tj procesa s kontinuiranom dobavom žice, u tome je najuspješniji proces EPP zavarivanja. Tijekom drugog svjetskog rata za potrebe zrakoplovne industrije razvijaju se metode zavarivanja aluminijska i magnezijeva. U Americi 1940. godine počinje se razvijati zaštita električnog luka inertnim plinom. Pomoću elektrode od volframa električni luk se može uspostaviti bez topljenja elektrode, što je omogućilo zavarivanje sa ili bez dodatnog materijala. Taj postupak je danas poznat kao TIG postupak. Plazma postupak zavarivanja se razvija se 1957. iz TIG-a, a za to je zaslužan Robert M. Gage [5]. On je modificirao sapnicu i postupku uz zaštitini, dodao plazmeni plin. Jedan od ciljeva ovog izuma bio je prevladati nedostatke ranije poznate opreme za zavarivanje koji su bili povezani sa zagrijavanjem. Drugi cilj je bio napraviti takav uređaj koji ne troši elektrodu za uspostavu električnog luka, tako se i povećao životni vijek uređaja bez potrebe za podešavanjem, pripremom ili zamjenom elektrode. Materijal se zagrijava uz visoki stupanj toplinske učinkovitosti, a materijali se mogu zavarivati velikim brzinama u usporedbi sa konvencionalnim metodama zavarivanja.

Ovim postupkom se nastoji povećati razina energije koja se ostvaruje plazmenim lukom na kontrolirani način. To se ostvaruje posebnom mlaznicom koja je smještena oko volframove elektrode i spojena na izvor napajanja. Plazma je poznata kao četvrto stanje materije nakon krutog, tekućeg i plinovitog stanja. Ono je iznimno vruća tvar koja se sastoji od slobodnih elektrona, iona, atoma i molekula. Volframova elektroda je pozicionirana unutar pištolja za zavarivanje, luk plazme je odvojen od zaštitnog plina i istisnut kroz bakrenu sapnicu koja oblikuje luk. Ovisno o promjeru sapnice i protoku plina postoje tri načina rada : mikroplazma, plazma zavarivanje taljenjem i plazma zavarivanjem protaljivanjem tj. „ključanicom“. Plazma

se obično spaja na istosmjerni izvor struje s padajućom karakteristikom napona. Zbog svojih jedinstvenih radnih karakteristika koje su rezultat konstrukcije pištolja u kojem su zaštitni i plazma plin odvojeni, uređaj za plazma zavarivanje može se spajati na izvor struje za TIG zavarivanje [6]. Zahvaljujući uskoj sapnici, usmjereni plazmeni mlaz uži je od konvencionalnog TIG električnog luka. Slika 1., prikazuje usporedbu 4 konvencionalna postupka zavarivanja, može se primjetiti da se plazma postupkom može ostvariti najuži mlaz..

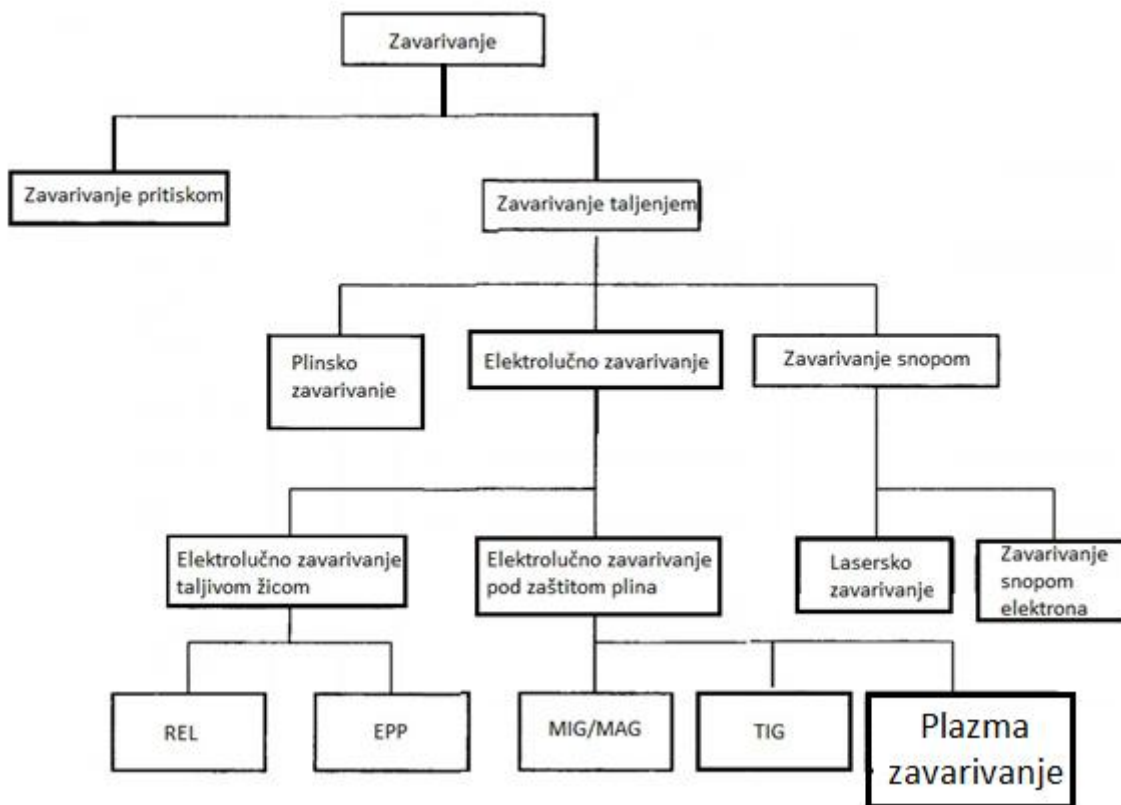
Uspostava luka omogućena je pomoću tzv. pilot luka koji ograničava struju pokretanja na oko 20-50 A. On se uspostavlja između bakrene sapnice i netaljive elektrode i ionizira VF (visoko frekventnom) strujom visokog napona, a zatim se kroz plazmu ioniziranog plina propušta struja zavarivanja pri čemu se dobiva toplina potrebna za zavarivanje. Pri prekidu glavnog luka, pilot luk se uspostavlja automatski kako bi se zadržalo ionizirano stanje. Koncentrirani mlaz ioniziranog plina kroz koji prolazi struja električnog luka daje veću gustoću energije, bolju penetraciju i omogućuje veću brzinu zavarivanja.



Slika 1. Usporedba postupaka zavarivanja s obzirom na širinu luka [7]

Uz plazmeni plin koji je u većini slučajeva argon, kroz vanjsku sapnicu propušta se zaštitni plin koji kako i sam naziv kaže ima prvenstveno zaštitnu ulogu. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika zaštitni plin je argon. Kod Cr-Ni čelika moguće je koristiti mješavinu argona i vodika dok se za zavarivanje aluminija koristi argon i mješavine s helijem [8].

Plazma zavarivanje pripada grupi zavarivanja taljenjem, slika 2., koje se definira kao zavarivanje bez vanjske sile kod kojeg materijal mora biti rastaljen, ako je potrebno koristi se dodatni materijal.

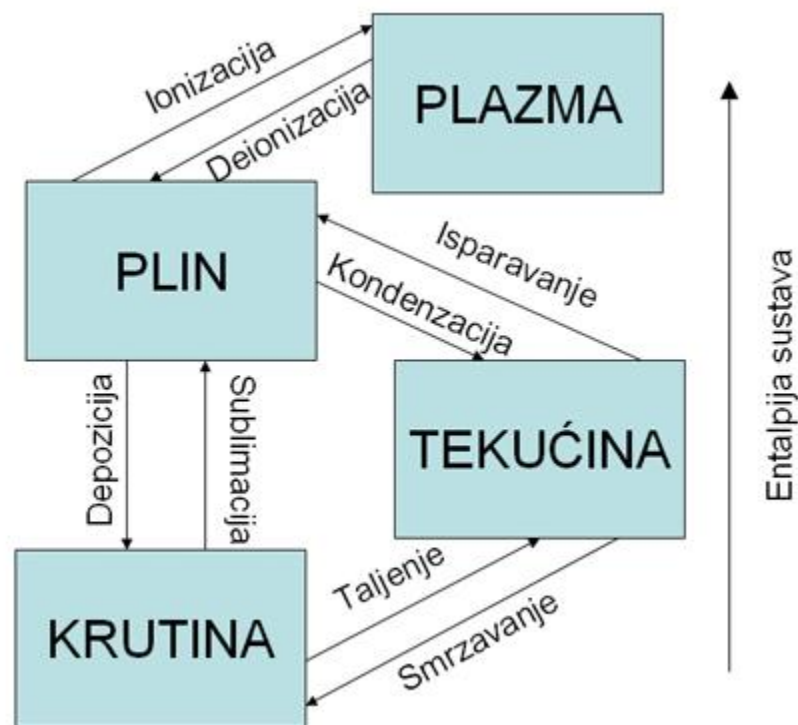


Slika 2. Shematski prikaz postupaka zavarivanja taljenjem [5]

### 3.2 Plazma – četvrto agregatno stanje tvari

Na prvi pogled postoje tri osnovna stanja u kojima se tvari pojavljuju: čvrsto, tekuće i plinovito. Većina tvari se, ovisno o uvjetima može pojavljivati u svim trima stanjima. Tako voda, ovisno o tlaku i temperaturi, može biti, pored tekućeg i u čvrstom (led) i u plinovitom stanju (para). Plazma je stanje tvari koje se ponešto o razlikuje od plinovitog, tekućeg ili krutog pa se uzima kao četvrto agregatno stanje, slika 3. Postavlja se pitanje zašto je to tako? Svaka čista tvar, ako je pri tim uvjetima stabilna može prelaziti iz jednog agregatnog stanja u drugo i svaku čistu tvar karakteriziraju čvrste točke prijelaza između agregatnih stanja, kao npr. voda. Za plazmu prijelazi stanja kao kod vode ne postoje, za tvar postoji talište, vrelište ali ne i “plazmište“. Iz toga slijede dvije vrlo slične definicije plazme:

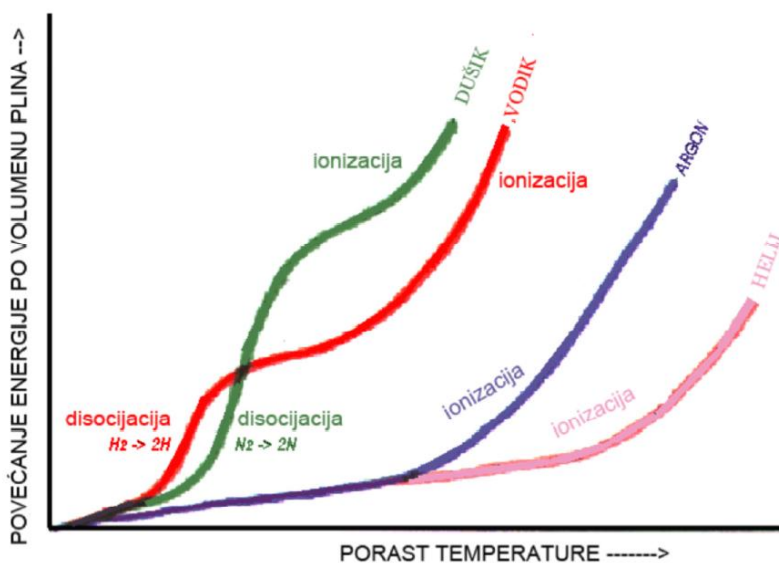
- Plazma je električki provodljiv, disociran i visokoioniziran plin. Broj pozitivnih i negativnih naboja je jednak, pa je plazma kao cjelina električki neutralna (broj nosača pozitivnog naboja tj. pozitivnih iona = broju nosača negativnog naboja, tj. elektrona).
- Plazma je stanje visokoionizirane tvari „mješavina“ atoma koji su otpustili sve ili gotovo sve elektrone (praktički gole jezgre) i elektrona koji se gibaju slobodno.



Slika 3. Ilustracija promjene agregatnih stanja [9]

Plazma se ponaša dosta slično „običnom“ plinu, nema stalan oblik niti volumen, ali u prisutnosti vanjskog magnetnog polja razlike su ogromne jer nabijene čestice slijede magnetske silnice. Plinovi koji se sastoje od neutralnih čestica ne vode električnu struju, ali plazma vodi izvrsno. Plazma je na zemlji rijetka pojava, ako se promatra kao prirodna pojava. Ponekad se plazma stvara na prolazu munje kroz zrak i u visokim slojevima atmosfera pod utjecajem zračenja sa sunca, većina tvari u Svemiru nalazi se u takvom stanju. Ako se pak ne radi o prirodnoj pojavi, za ostvarivanje određene količine plazme, treba dovesti određenu količinu materije uz pomoć koje će se odvijati fuzija (termonuklearna plazma). Plazmeni mlaz u zavarivanju se dobiva tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Potrebno je ostvariti vrlo visoku temperaturu, potrebnu za početak i odvijanje procesa termofuzije. Visoka temperatura se ostvaruje u kontroliranim uvjetima u vrlo jakom elektromagnetskom polju i s vrlo velikim pritiscima. Atomi plinova zbog velike dovedene količine energije otpuštaju elektrone, čime se stvara mješavina pozitivnih iona i negativnih elektrona sa potpuno drugačijim fizikalnim svojstvima od plinova.

U zavarivanju se kao plazmeni plin najčešće koriste plinovi: argon, helij, dušik i vodik. Međutim, nemaju svi plinovi ista svojstva. Disocijacijom i ionizacijom plinova moguće je osigurati iznimno velike količine energije, ali postoje znatne razlike između plinova, zbog njihovog molekularnog sastava, vodik i dušik na određenoj temperaturi mogu prenijeti veću količinu energije od argona i helija. Na slici 4., prikazan je odnos porasta temperature i povećanja zapremljene energije po volumenu plinova.[9, 10, 11, 12]



Slika 4. Prikaz odnosa porasta temperature i povećanja zapremljene energije po volumenu plinova [10]

### 3.3 Podjela postupaka plazma zavarivanja

Prema normi HRN EN ISO 4063:2010 koja deklarira i numerira sve postupke zavarivanja, plazma postupak zavarivanja definiran je kao sljedeće:

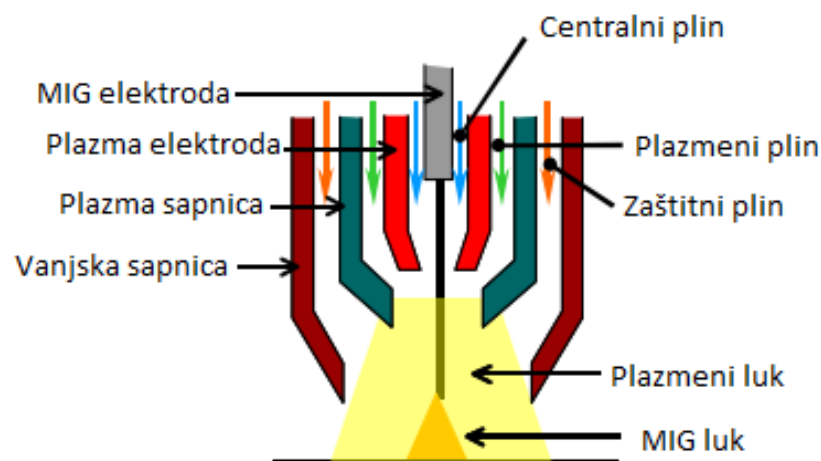
- 15 Plazma zavarivanje (eng. Plasma Arc welding) PAW

Ostale varijante plazma zavarivanja prema HRN EN ISO 4063:2010 [12]:

- 151 Plazma MIG zavarivanje (eng. Plasma MIG welding)
- 152 Plazma zavarivanje praškom (eng. Powder plasma arc welding) PPAW
- 153 Plazma zavarivanje s prenešenim lukom (eng. Plasma arc welding with transferred arc)
- 154 Plazma zavarivanje s neprenešenim lukom (eng. Plasma arc welding with non-transferred arc)
- 155 Plazma zavarivanje s djelomično prenešenim lukom (eng. Plasma arc welding with semi-transferred arc)

#### 3.3.1 Plazma MIG zavarivanje

Plazma MIG zavarivanje je najprikladnije za zavarivanje aluminija. Sastoji se od kombinacije plazma i MIG luka. Tim su se postupkom htjeli iskoristiti prednosti električnog luka i izvora topline. Postupak se sastoji od dva konvencionalna postupka, plazma se koristi općenito za predgrijavanje i stabilizaciju luka za MIG zavarivanje. Sustav za takvo zavarivanje prikazan je na slici 5.

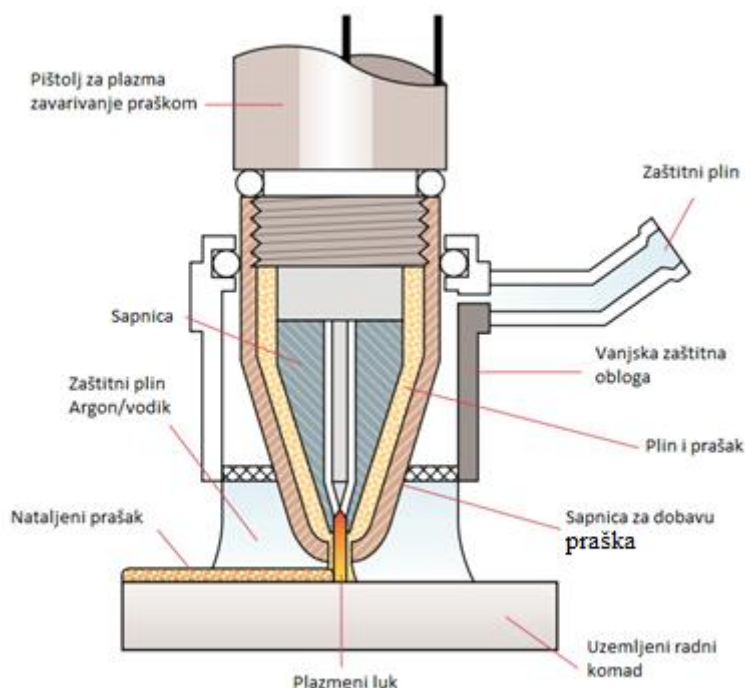


Slika 5. Pištolj za plazma MIG zavarivanje [13]

Elektroda za MIG zavarivanje smještena je u sredini, a sapnica izvan koje se nalazi plazmeni plin smještena je na obodu. Plinovi prolaze kroz 3 razine: prvo kroz centar prolazi plin za MIG postupak, u sredini se nalazi plazmeni plin i na kraju zaštitni plin. Korišteni plinovi za ovaj postupak su najčešće argon i helij. Koriste se komercijalni izvori struje koji se dovode do modificirane glave za zavarivanje [13].

### 3.4 Plazma zavarivanje praškom

Plazma zavarivanje praškom je postupak kojim se osnovni metal tali pomoću plazmenog luka i dovedenog praška. Tijekom zavarivanja unos praška kontroliran je iznosom argona u mješavini argon/vodik i plazmenim lukom koji osigurava metaluršku povezanost. Preciznim upravljanjem dodavačem praška, brzinom punjenja praška, strujom i protokom plina mogu se dobiti precizni depoziti praškastog materijala. Pištolj, slika 6., je spojen na dodavač praška kojega kontrolira programer. Plazma zavarivanje praškom ili PPAW je naširoko korišteno za

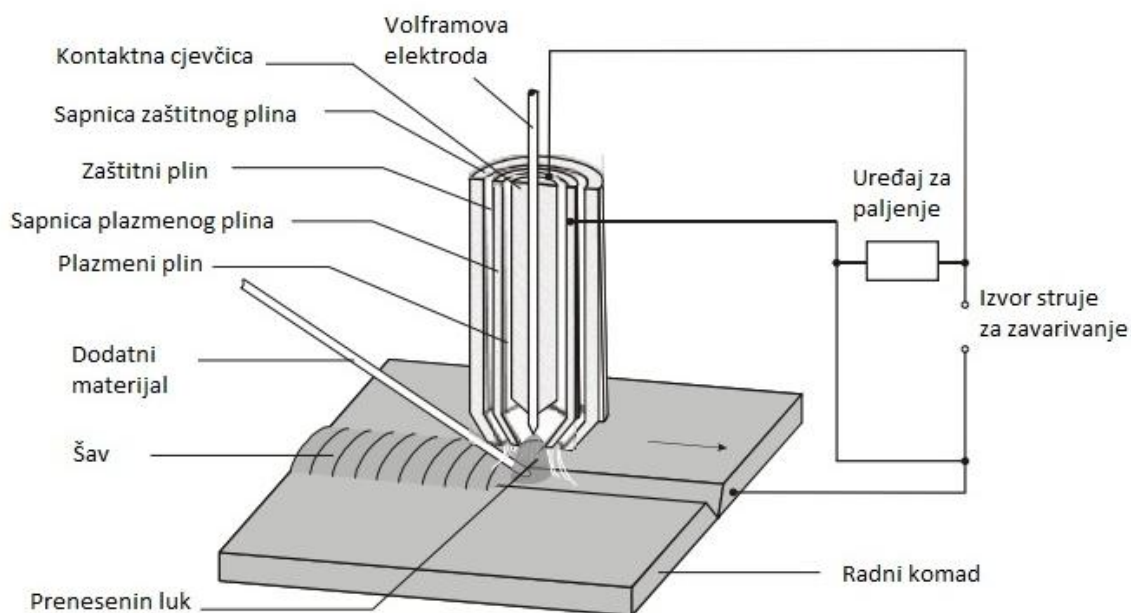


Slika 6. Pištolj za plazma zavarivanje praškom [14]

tvrdno navarivanje, za slojeve otporne na trošenje, otporne na koroziju i otporne na udarna opterećenja. PPAW zavarivanje se koristi za reparature turbinskih lopatica, pumpi, vijaka, udarnih čekića, osovina i ostalo [14].

### 3.5 Plazma zavarivanje prenešenim lukom

Kod zavarivanja prenešenim lukom, električni luk se uspostavlja između volframove elektrode koja je na negativnom polu i radnog komada koji je na plus polu. Tako je radni komad dio strujnog kruga te se toplina potrebna za taljenje dobiva preko plazmenog mlaza. Prednosti prenešenog luka su u većoj prenešenoj energiji na radni komad i ovaj tip se najčešće koristi za zavarivanje [15]. Ovakvim lukom mogu se postići velike brzine zavarivanja. Za pokretanje prenesenog luka koristi se otpornik postavljen u strujni krug. Prvo se pali pilot luk koji ograničava struju na oko 50 A koja se uspostavlja između sapnice plazmenog luka i elektrode. Nakon što se dotakne radni komad glavna struja protječe između elektrode i radnog komada, te se tada pokreće prenešeni luk. Temperatura koja se može postići takvim plazmenim lukom iznosi između 8000 °C i 25000 °C [16]. Na slici 7. prikazan je postupak plazma zavarivanja prenešenim lukom.

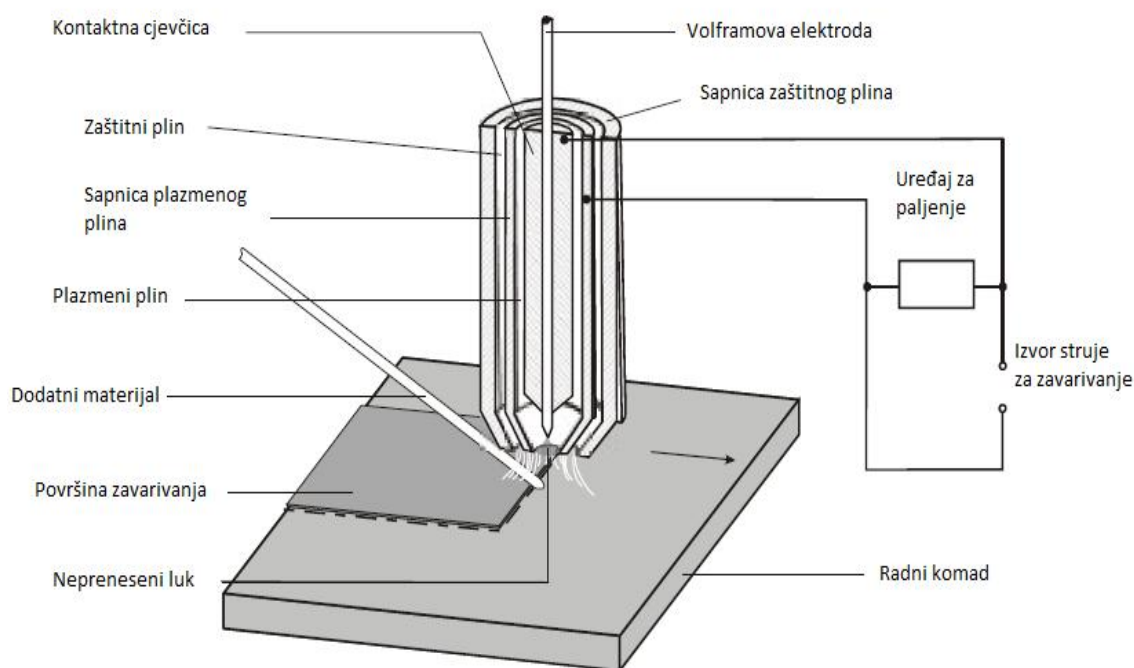


Slika 7. Plazma zavarivanje prenesenim lukom [14]



### 3.6 Plazma zavarivanje s neprenešenim lukom

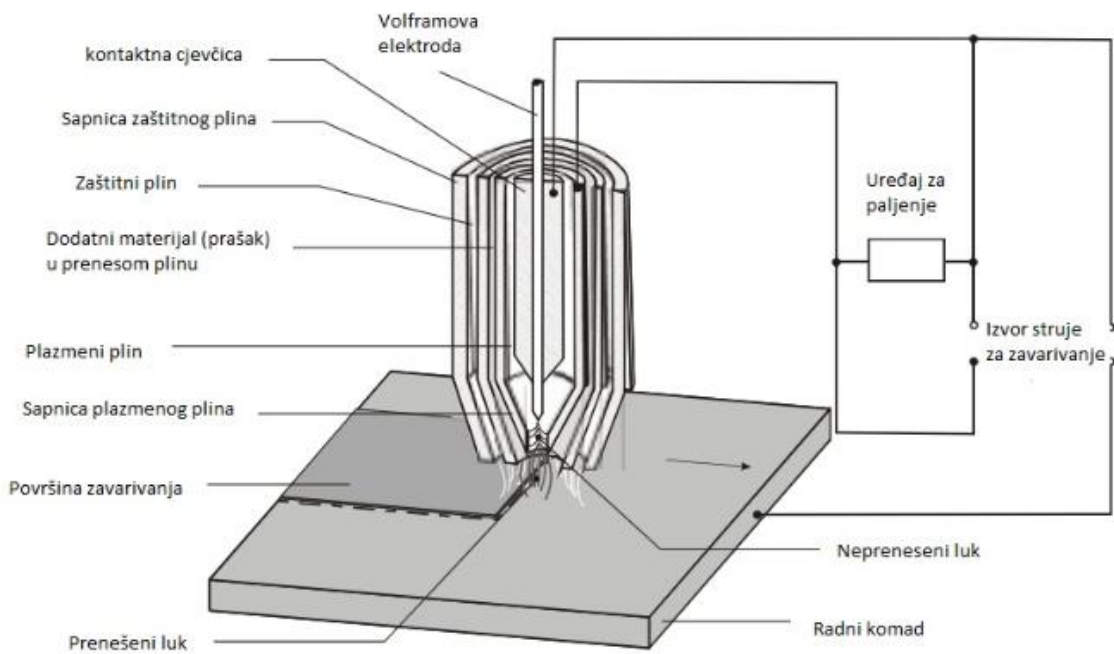
Volframova elektroda kod neprenešenog luka također je spojena na negativni pol, ali se strujni krug uspostavlja i održava preko unutrašnje sapnice koja je spojena na plus pol. Plazmeni mlaz je istisnut kroz sapnicu preko plazmenog plina. Korisna toplina dobiva se jedino preko mlaza plazme. Nepreneseni luk koristi se za rezanje i spajanje radnih komada koji ne provode struju za primjenu gdje je poželjna relativno niska koncentracija energije. Koristi se za plazma zavarivanje taljenjem, prevlačenjem i naštrcavanje. Ovaj tip luka se koristi i za zavarivanje folija. Plazma zavarivanje s neprenešenim lukom prikazano je na slici 8. [14]



Slika 8. Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom [14]

### 3.7 Plazma zavarivanje s djelomično prenešenim lukom

Ovo je tip plazma zavarivanja koju definira djelomično prenešeni luk, koji je kombinacija prenesenog i neprenesenog luka. Ova varijanta procesa koristi se za mikroplazma zavarivanje, naštrcavanje i spajanje aluminija. Kod naštrcavanja se koristi zbog relativno niskih operativnih troškova, povećane efikasnosti, niske poroznosti i niskog razrjeđivanja supstrata [14].



Slika 9. Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom [14]

### 3.8. Radna područja i parametri plazma zavarivanja

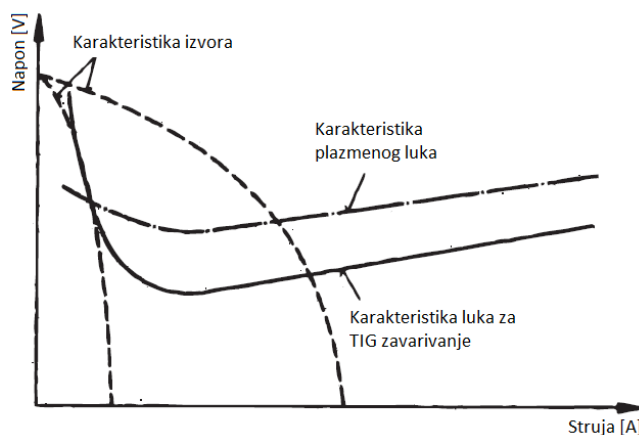
Plazma zavarivanje moguće je provoditi na 3 načina: mikroplazma zavarivanje, plazma zavarivanje taljenjem i plazma zavarivanjem protaljivanjem tj. "ključanicom" (eng. keyhole). Ova podjela prvenstveno se temelji na razini korištene struje za zavarivanje. Mikroplazma zavarivanje se obično kreće u rasponu od 0,1 A do 15 A, zavarivanje taljenjem u rasponu od 15 A do 100 A, a dok zavarivanje "ključanicom" iznad 100 A. Međutim, postoje određena preklapanja između ovih načina rada, npr. zavarivanje "ključanicom" može se raditi na 70 A i limu 2 mm. Mikroplazma i zavarivanje taljenjem koriste se za materijale do 3 mm debljine, dok se za način rada "ključanicom" koriste veće debljine materijala i veće brzine zavarivanja [5]. U tablici 3., prikazan je općeniti prikaz radnog područja i primjene plazma zavarivanja.

Tablica 3. Radna područja i primjena plazma zavarivanja [12]

Jakost struje [5]	Područje rada	
	Mikroplazma	Plazma zavarivanje taljenjem i ključanicom
0,1 do 10	Folije 0,05 do 0,2 mm	-
1 do 20	Tanki limovi 0,2 do 0,5 mm	-
5 do 40	Tanki limovi 0,5 do 1 mm	-
40 do 100	-	Plazma zavarivanje 0,5 do 1,5 mm
100 do 200	-	Plazma zavarivanje 1,5 do 3 mm
100 do 350	-	Zavarivanje ključanicom 3 do 10 mm

### 5.1 Mikroplazma zavarivanje

Kod mikroplazma zavarivanja radi se o zavarivanju vrlo tankih materijala od 0,05 mm do 1,6 mm, pretežno bez dodatnog materijala. Tu je i prednost koju mikroplazma ima pred TIG zavarivanjem, a to je da je moguće zavarivati tanke folije s intenzitetom struje od svega nekoliko ampera, čak i manje od jednog ampera. Električni luk pri TIG zavarivanju je vrlo nestabilan kod niskih struja, jer u tom području nema definiranih radnih točaka, slika 10.



Slika 10. Radna točka kod plazma i TIG zavarivanja [17]

Današnji izvori za TIG zavarivanje imaju padajuću vertikalnu karakteristiku pri niskim strujama. To znači da nema točnih sjecišta u radnoj točki, što označava nestabilnost luka pri niskim strujama. Ovi problemi nestaju kod upotrebe vrlo uskog plazmenog mlaza kod mikroplazma zavarivanja. Svrha ove metode su sitni popravci svih vrsta, a u industriji se posebice upotrebljuje za reparaturu alata i kalupa. Precizna zavarivanja vrlo je teško izvesti ručno te se preferira automatizirano vođenje pištolja. Za primjer, ovakav postupak zavarivanja se može iskoristiti za spajanje folija debljine svega 1/100 mm. Zbog uskog djelovanja plazmenog mlaza potrebno je osigurati precizno vođenje pištolja, te se u tom slučaju postupak automatizira, no, pri većim strujama moguće je raditi ručno. Jakost struje kod mikroplazma zavarivanja kreće se u rasponu od 0,1 A do 15 A, u nekim slučajevim moguće je čak do 50 A. U tablici 4., prikazane su okvirne smjernice tj. parametri za ručno plazma zavarivanje čelika X5CrNi 18.10. Plazmeni plin je argon, a zaštitni plin je mješavina argon/vodik R1 prema EN ISO 439 [9,14].

Tablica 4. Parametri za ručno mikroplazma zavarivanje čelika X5CrNi 18.10 [17]

Debljina materijala [mm]	Struja zavarivanja [A]	Napon [V]	Protok plazmenog plina [l/min]	Protok zaštitnog plina [l/min]	Brzina zavarivanja [cm/min]
0,1	3	21	0,2	5	30
0,2	6	22	0,2	5	30
0,4	14	24	0,2	6	35
0,5	18	23	0,2	6	20
1,0	40	25	0,3	7	35

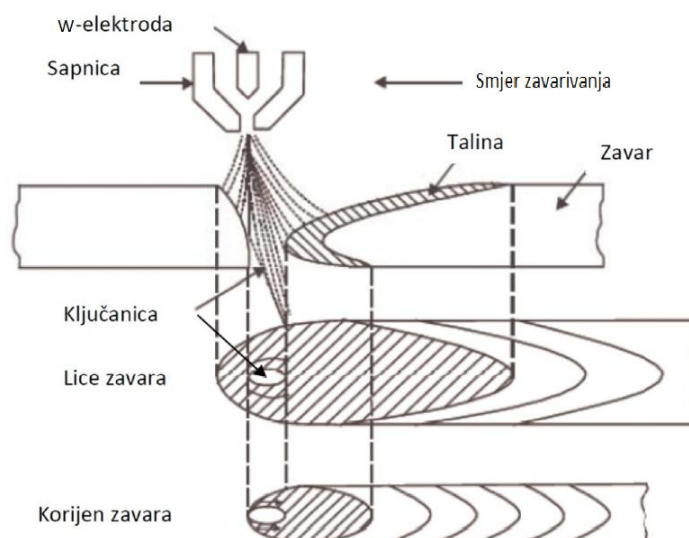
Priprema spoja: sučeljeni spoj bez razmaka  
 Osnovni materijal: X5 CrNi 18.10  
 Plazmeni plin: Argon I1 – EN ISO 439  
 Zaštitni plin: Argon/vodik R1 – EN ISO 439  
 Položaj zavarivanja: PA

### 3.8.1 Plazma zavarivanje taljenjem

Raspon jakosti struje kod ovog tipa plazma zavarivanja taljenjem je od 15 A do 100 A. Ovo područje zavarivanja je najbliži TIG-u. Zbog pouzdanog prijenosa i stabilnosti luka, koristi se za precizne i visoko kvalitetne zavare materijala debljine od 0,5 mm do 3,2 mm. Međutim, plazma zavarivanje taljenjem se kvalitetno može koristiti jedino s odgovarajuće širokim otvorom unutarnje sapnice i preciznom kontrolom jakosti struje kako bi se izbjeglo pregrijavanje vrha sapnice. Dodavanje dodatnog materijala može biti ručno ili strojno [12,17]

### 3.8.2 Plazma zavarivanje protaljivanjem; metoda "ključanice"

Za zavarivanje metodom ključanice nije potrebna priprema spoja žljebljenjem, to je svojstvo velike penetracije ovog postupka koja se dobiva potpunim protaljivanjem u jednom prolazu. Zbog karakteristike postupka (veća brzina, jaka struja) obavezno je mehanizirano vođenje. Kod ovog postupka koriste se struje preko 100 A. Stvaranje tzv. ključanice, odnosno rupe na šavu tokom zavarivanja, postiže se uslijed djelovanja plazmenog mlaza, kao što je prikazano na slici 11. Površinska napetost prisiljava rastaljeni metal da teče oko plazmenog mlaza, stvarajući na taj način rupu u obliku ključanice, i da se potom slijeva samostalno formirajući korijen žlijeba zavara. Na taj se način postižu izrazito visoke brzine s kvalitetnim zavarom. Energija se stvaranjem snažnog luka, nalik laserskoj zruci, raspodjeljuje po čitavoj dubini metala, a ne samo na površini, pa je na taj način moguće provariti debljine materijala od 1,5 mm do 12 mm, ovisno o materijalu koji se zavaruje. Kod zavarivanja ovom tehnikom posebnu važnost ima i nagib pištolja tj. primjena lijeve i desne tehnike [12,19].



Slika 11. Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom [12]

U usporedbi s TIG-om, metoda ključanice minimizira potrebu za troškovima pripreme spoja i dodatnim materijalom. Moguća je upotreba za zavarivanje svih vrsta materijala no pretežito se upotrebljava za nehrđajuće čelike. Kod ove tehnike je potrebno obratiti pozornost na parametre kako bi se održao efekt ključanice. Zbog toga je metoda ključanice primjerena samo u mehaniziranim uvjetima [6]. U tablici 5., prikazane su okvirne smjernice tj. parametri za mehanizirano plazma zavarivanje čelika X5CrNi 18.10.

Tablica 5. Parametri za mehanizirano plazma zavarivanje ključanicom čelika X5CrNi 18.10 [17]

Debljina materijala [mm]	Struja zavarivanja [A]	Napon [V]	Protok plazmenog plina [l/min]	Protok zaštitnog plina [l/min]	Brzina zavarivanja [cm/min]
2,5	200	24	1,5	15	80
3,0	210	28	2,5	18	75
4,0	220	27	2,5	18	65
5,0	230	29	2,5	20	45
6,0	240	28	2,8	20	40
8,0	290	28	3,5	20	25

Priprema spoja: sučeljeni spoj  
 Osnovni materijal: X5 CrNi 18.10  
 Plazmeni plin: Argon I1 – EN ISO 439  
 Zaštitni plin: Argon/vodik R1 – EN ISO 439  
 Položaj zavarivanja: PA

#### 5.4 Parametri plazma zavarivanja

U prethodna dva poglavlja navedene su dvije tablice (tablica 4., tablica 5.) u kojima su prikazani okvirni parametri za ručno i mehanizirano plazma zavarivanje. Međutim, kod plazma zavarivanja postoji puno parametara koje je potrebno podesiti kako bi se osigurao stabilan proces što svakako zahtijeva dobro uvježbane operatere/zavarivače. Najvažniji parametri su sljedeći [12]:

- Promjer unutarnje sapnice (najčešće 0,4 mm do 0,6 mm) – odabir promjera unutarnje sapnice ovisi prvenstveno o količini energije koja se želi dobiti i širini zavara. Što su materijali tanji, manji je i promjer sapnice. Međutim, sa smanjenjem sapnice povećavaju se zahtjevi za kvalitetom pripreme i centriranjem elektrode prema sapnici.
- Promjer vanjske sapnice (ovisno o obliku i primjeni) – vanjska sapnica usmjerava protok zaštitnog plina. Vrlo često se prilagođava obliku proizvoda kako bi se u cijelosti zaštitilo zagrijano područje.

- Jakost struje zavarivanja – porastom debljine materijala i potrebom za većom penetracijom povećava se i jakost struje zavarivanja. Ovisno o primjeni između 0,1 A i 300 A, pa kod nekih aplikacija i 500 A.
- Jakost struje pilot luka – najčešće do 10 A, ovisno o konstrukciji uređaja. Kod nekih uređaja je to fiksna vrijednost ali se kod novijih izvora može mijenjati.
- Promjer volframove elektrode – ovisno o potrebnom strujnom opterećenju može se povući analogija s TIG postupkom. Za manje struje manji je promjer elektrode, za veće struje potreban je veći promjer elektrode.
- Protok plazmenog plina – s porastom protoka plazmenog plina povećava se i kinetička energija plazme što direktno utječe na penetraciju. Uobičajeno su ti protoci u rasponu između 0,1 l/min i 5 l/min ovisno o promjeru sapnice, jačini struje zavarivanja i debljini materijala.
- Protok i vrsta zaštitnog plina – protok zaštitnog plina iznosi najčešće između 5 l/min i 10 l/min i mora biti prilagođen obliku i promjeru vanjske sapnice. Najčešće se koristi argon ali kod zavarivanja visokolegiranih čelika moguća je i primjena mješavina 2 % - 5 % vodika ili dušika ako se radi o duplex čelicima. Za zaštitu korijenske strane koriste se argon i mješavina dušika i vodika. Ako se zavaruju bakar ili aluminij tj. materijali koji imaju dobru toplinsku vodljivost moguća je i primjena mješavina argona i helija.
- Brzina zavarivanja – najčešće u rasponu od 20 cm/min pa do brzine od nekoliko metara u minuti kod tanjih materijala.
- Nagib i udaljenost pištolja - moguće je primjenom lijevog i desnog nagiba utjecati na karakter penetracije i oblik provara. Ako se unutarnja sapnica previše približi radnom komadu može doći do pojave kratkog spoja što rezultira gubitkom penetracije i prekidom plazmenog luka.
- Frekvencija i jakost osnovne i vršne struje pri impulsnom zavarivanju - utječe na oblikovanje nabora na zavaru, reducira unos topline što je važno kod tankih materijala.
- Predprotok i postprotok plina – za čišćenje prostora u kojem će nastati plazmeni mlaz potrebno je u vremenu od nekoliko sekunda propuhati zaštitni plazmeni plin. Isto tako po završetku zavarivanja potrebno je produžiti protok plina nekoliko sekunda radi zaštite taline i volframove elektrode.
- Početni i završni uspon struje – regulira vrijeme od uspostave luka do radne struje te vrijeme smanjivanja od radne struje do prekida luka. Postupnim smanjivanjem reducira se veličina završnog kratera .

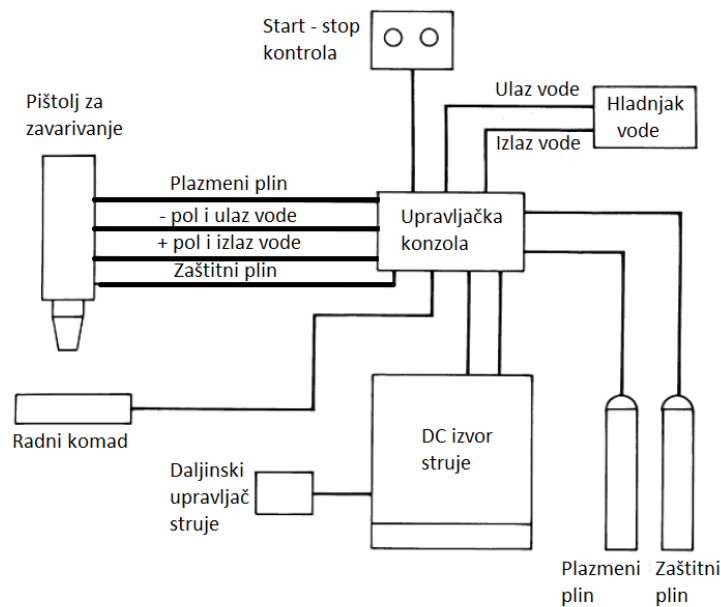
- Završna struja – regulira veličinu završnog kratera.
- Brzina dodavanja žice i intenzitet dodavanja praška – utječu na količinu nataljenog materijala. Vrijednosti brzine dodavanja žice su relativno male 1-2 m/min.

Samo optimizirani parametri mogu osigurati stabilan proces i kvalitetno zavarivanje pa je ponekad potrebno napraviti veći broj proba kako bi se cjelokupni proces doveo u stanje potrebno za industrijsku proizvodnju.



### 3.9 Oprema za plazma zavarivanje

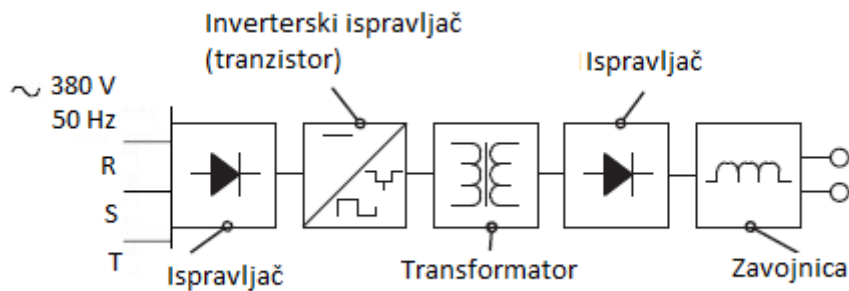
Osnovna oprema za plazma zavarivanje sastoji se od izvora struje, upravljačkog uređaja, hladnjaka vode, pištolja za zavarivanje i sustava opskrbe plinom koji se sastoji od zaštitnog i plazmenog plina. Shematski prikaz opreme za plazma zavarivanje prikazan je na slici 12.



Slika 12. Oprema za plazma zavarivanje [5]

#### 3.9.1 Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje koji opskrbljuje sustav za zavarivanje obično se provodi s regulacijskim i upravljačkim uređajem. Kroz regulacijski uređaj prolazi niz mjerenja vremena protoka plina, pilot luka, glavne struje za zavarivanje i svi ostali promjenjivi parametri. Upravljački uređaj u svom najjednostavnijem obliku služi za kontrolu protoka plazmenog i zaštitnog plina. Današnji suvremeni izvori za plazma zavarivanje rade na inverterskom principu. Inverterski način rada prikazan je na slici 13. Invertori se potpuno razlikuju od konvencionalnih izvora struje [5]. Invertori daju istosmjernu ili visoko frekventnu pulsirajuću struju. Pojavili su se na tržištu u relativno novije vrijeme i sve se više koriste u praksi zbog niza prednosti u odnosu na ostale izvore struje za zavarivanje. Može se reći da je izvor struje zadužen za pretvorbu izmjenične struje iz električne mreže koja je na visokom naponu i niskoj struji u visoku struju i niski napon potreban za zavarivanje.



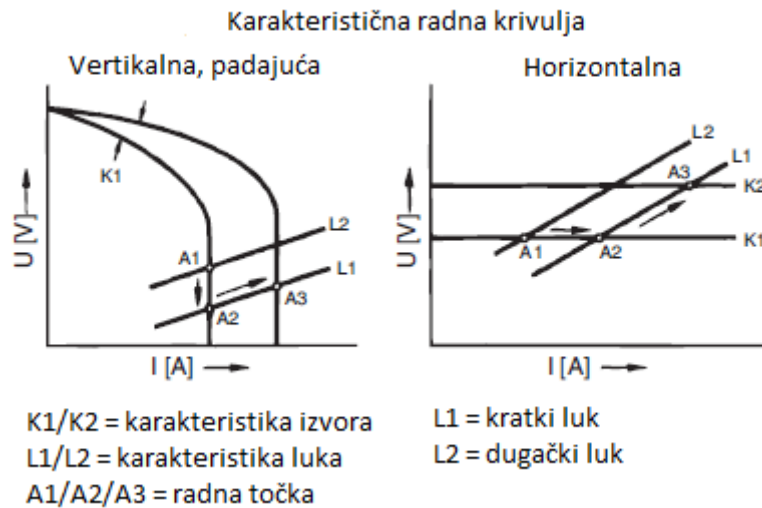
Slika 13. Blok dijagram treće generacije inverterskih ispravljaja, frekvencije preko 100 Hz [17]

Struja iz mreže prvo se ispravlja u istosmjernu, zatim prvi tranzistor povećava frekvenciju na 25 kHz. Nakon toga dobiva se visoka struja niskog napona. Prednost takvih transformatora pomoću kojih se dobiva vrlo visoka frekvencija rezultat su malih dimenzija takvih transformatora što ujedno smanjuje i veličinu samog uređaja. Tako nekadašnji uređaji velikih dimenzija koji su težili i do 400 kg, dok danas teže svega 100 kg, uključujući sve pomoćne jedinice. Ova ušteda u težini postignuta je smanjenjem dimenzija transformatora, koji je za frekvenciju mreže od 50 Hz masivan da se onemogućiti pretjerano zagrijavanje u radu. Jedan od takvih izvora struje prikazan je na slici 14. Također, na slici 14., prikazan je i jedan uređaj za mikroplazma zavarivanje. Takvi uređaji teže svega par kilograma. Inverterski izvori struje za plazma zavarivanje obično imaju strmo padajuću karakteristiku, slika 15., karakteristika toga je konstantna struja.



Slika 14. Inverterski uređaji za plazma zavarivanje [17]

S takvom karakteristikom jakost struje se neće mijenjati s promjenom duljine luka. Invertorski izvor struje može proizvesti različite statičke i dinamičke karakteristike, te omogućava primjenu jednog uređaja za više postupaka zavarivanja (REL, MIG/MAG, TIG i plazma). Dodatna prednost invertora je njihova povećana efikasnost jer su gubici u bakrenim namotima u transformatoru manji u odnosu na konvencionalne transformatore, pa je stupanj iskorištenja veći od svih ostalih izvora struje za zavarivanje.



Slika 15. Strmo padajuća i ravna karakteristika [17]

Za plazma zavarivanje izmjeničnom strujom koriste se izvori struje koji emitiraju impulse pravokutnog oblika, to označava pojavu brze izmjene plus i minus polova na elektrodi, takva se izmjena ostvaruje tranzistorima. Frekvencija kod izmjenične struje može se mijenjati između 30 Hz i 300 Hz. Osim toga polovi izmjenične struje mogu se podesiti tako da dio struje bude na plus, a dio na minus polu. Naime, moguće je ograničiti plus pol na 20 %, minus pol na 80 %, također, plus na 80 %, minus na 20 %. Ovakvi udjeli mogu se koristiti za smanjenje strujnog opterećenja volframove elektrode i jačinu penetracije [17,20].

### 3.9.2 Pištolj za zavarivanje

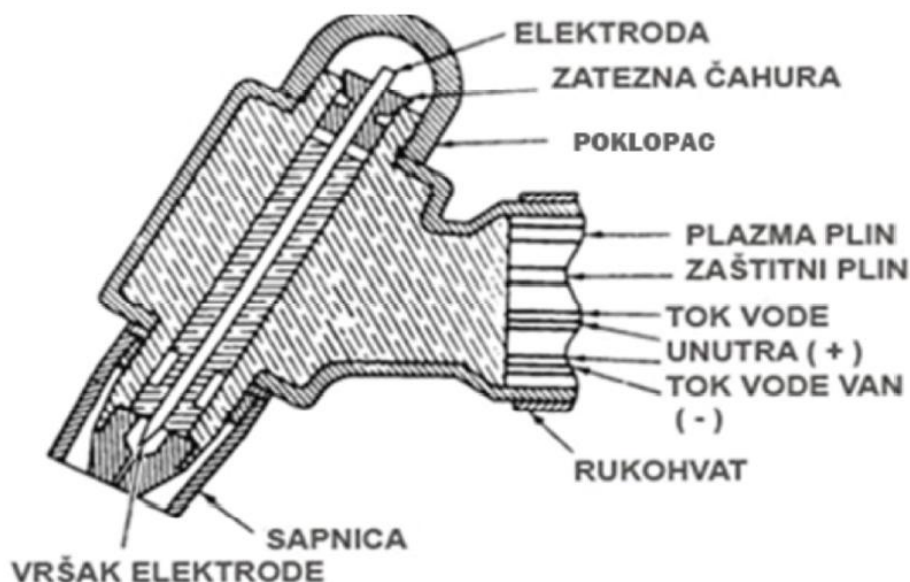
Pištolji za plazma zavarivanje dostupni su u različitim veličinama za različite snage za ručno i mehanizirano zavarivanje. Međutim, konstrukcija je ista u svakom slučaju, volframova elektroda je uvijek uvučena unutar pištolja. Kako bi se izbjegle česte greške u proizvodnji, važno je održati koncentričnost između volframove elektrode i otvora sapnice. Sklop elektrode

je postavljen unutar komore gdje se dobavlja plazmeni plin. Unutar komore se nalazi i bakrena mlaznica koja se koristi za dobivanje uskog mlaza plazmenog plina. Mlaznica zaštitnog plina obično se izrađuje od izolacijskog keramičkog materijala, te se prostire kao prsten oko bakrene mlaznice, stvarajući zaštitnu barijeru tijekom zavarivanja. Većina mlaznica ima samo jedan otvor, međutim, postoje mlaznice s više otvora kojima se mogu postići veće snage plazmenog luka [5]. Pištolji za mikroplazma zavarivanje koji se u većini slučajeva koriste za ručno zavarivanje, vrlo su slični po obliku i veličini pištolju za TIG zavarivanje, slika 16 (lijevo). Za više struje zavarivanja potrebno je intenzivnije hlađenje, pa su kablovi koji dovode plinove također masivniji te je i pištolj u tom slučaju veći, što otežava primjenu ručnog postupka. Za potpuno mehanizirane postupke plazma zavarivanja koristi se strojno vođenje pištolja. Pištolj za mehanizirano plazma zavarivanje prikazan je na slici 16.(desno).



Slika 16. Pištolj za mikroplazma (lijevo) i plazma (desno) zavarivanje [17]

Plazmeni pištolji, pa i oni koji rade na najnižoj struji, moraju imati ugrađen sustav za hlađenje vodom. Toplina koju luk generira unutar sapnice toliko je intenzivna da bi se sapnica ukoliko protok vode prekine samo nakratko, mogla potpuno rastaliti. Do pištolja je potrebno dovesti rashladnu tekućinu, plazmeni i zaštitni plin. Sve to čini pištolj robusnim, zahtjevnim za održavanje i često neadekvatnim za zavarivanje na uskim i skućenim prostorima. Slika 17., prikazuje poprečni presjek pištolja za plazma zavarivanje. Prednost plazma pištolja nad TIG-om je nemogućnost kontaminacije volframove elektrode s radnim komadom [16,17].



Slika 17. Poprečni presjek pištolja za plazma zavarivanje [18]

### 3.9.3 Elektroda

Za plazma zavarivanje koristi se čista ili legirana 2% torij/cerij/cirkonij-volfram elektroda koja je uvučena i zaštićena unutar bakrene sapnice. Specifikacija elektrode pokrivena je normom AWS A5.12-92 [5]. Volframove elektrode su cilindričnog oblika, dok im je vrh zašiljen u konus. Veličina i kut vrha elektroda bira se u odnosu na jačinu struje zavarivanja. Veliki utjecaj na stabilnost i kvalitetu zavarivanja ima koncentričnost elektrode i sapnice, te preciznost namještanja elektrode unutar sapnice [5,22]. Odabir veličine i kuta vrha elektrode s obzirom na jačinu struje prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Odabir promjera i kuta vrha volframove elektrode s obzirom na jačinu struje [5]

Radno područje	Jakost struje [A]	Promjer elektrode [mm]	Kut elektrode [°]
MIKROPLAZMA	5-20	1,0	15
ZAVARIVANJE TALJENJEM	30-100	2,4	30
ZAVARIVANJE KLJUČANICOM	50-200	4,8	30
	180-200	3,2	60
	250-350	4,8	60

Prema normi ISO EN 26848 volframove elektrode se označavaju prema kemijskom sastavu, prstenovima u boji na krajevima elektrode. Ovisno o kemijskom sastavu elektroda može označeno jednom ili više boja. Tablica 7., prikazuje označavanje volframovih elektroda prema kemijskom sastavu. Promjer elektroda prema navedenoj normi kreće se u rasponu:

**0,5 - 1,0 - 1,6 – 2 - 2,5 - 3,2 - 4 – 5 - 6,3- 8 – 10 mm**

Tablica 7. Označavanje volframovih elektroda prema boji i kemijskom sastavu [21]

Oznaka elektrode	Kemijski sastav			Boja identifikacije		
	Udio oksida		Nečistoće [%]			
	[%]	Kem. spoj				
WP	-	-	< 0,20	98,8	Zelena	
WT 4	0,35 do 0,55	ThO <sub>2</sub>		Ostatak		Plava
WT 10	0,80 do 1,20	ThO <sub>2</sub>				Žuta
WT 20	1,70 do 2,20	ThO <sub>2</sub>				Crvena
WT 30	2,80 do 3,20	ThO <sub>2</sub>				Ljubičasta
WT 40	3,80 do 4,20	ThO <sub>2</sub>				Narančasta
WZ 3	0,15 do 0,50	ZrO <sub>2</sub>				Smeđa
WZ 8	0,70 do 0,90	ZrO <sub>2</sub>				Bijela
WL 10	0,90 do 1,20	LaO <sub>2</sub>				Crna
WC 20	1,80 do 2,20	CeO <sub>2</sub>				Siva

#### 3.9.4 Plinovi za plazma zavarivanje

Plazmeni plin se koristi za generiranje tj. stvaranje plazmenog luka, dok je uloga zaštitnog plina dodatna zaštita taline i zaštita od atmosfere, dok se taline ne očvrstne i ohladi. Plinovi za plazma zavarivanje obrađeni su u normi DIN EN 439. Argon se koristi kao plazmeni plin za zavarivanje, lako se ionizira što znači da se postižu visoke razine ionizacije. Kod zavarivanja legura na bazi nikla i krom/nikal čelika, u argon se dodaju male količine vodika, čime se poboljšava prijenos topline i povećavaju se brzine zavarivanja. Kod zavarivanja aluminijske i titanske legure dodaju se male količine helija u plazmeni plin. Za zavarivanje nelegiranih i visokolegiranih čelika kao zaštitni plin se najčešće koristi argon ili mješavina argon/vodik. Aktivni zaštitni plin na bazi argon/CO<sub>2</sub> ili argon/kisik mogu se koristiti za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Čisti argon ili mješavina argon/helij koristi se za zaštitni plin kod zavarivanja aluminijske i titanske legure [17]. Protoci plina su osobito važni, (tablica 8.), oni kontroliraju opseg suženja plazmenog luka. Brzina protoka plazmenog plina se kreće od 0,1 l/min za mikroplazma zavarivanje pa do 10 l/min za zavarivanje ključanicom. Kontrola protoka plina vrlo je važna ako se radi o zavarivanju ključanicom, brzinu protoka plina sa 1 l/min na 2 l/min potrebno je postepeno mijenjati u roku od oko 1 s, što znači da će promjena protoka plina

od 1 l/min do 9 l/min biti postepeno mijenjana u roku od oko 9 s. Kontrola protoka plina se najbolje postiže elektroničkim putem [5]. U tablici 8., prikazani su potrebni protoci plazmenog i zaštitnog plina te odabir odgovarajuće sapnice s obzirom na jakost struje zavarivanja.

Tablica 8. Protoci plazmenog i zaštitnog plina i odabir sapnica [5]

Radno područje	Jakost struje [A]	Plazmeni plin			Zaštitni plin		
		Promjer sapnice		Protok plina [l/min]	Promjer vanjske sapnice [mm]	Protok plina [l/min]	
		[mm]	[in]				
Mikroplazma zavarivanje	5	0,8	0,03	0,2	8	4-7	
	10	0,8	0,03	0,3			
	20	1,0	0,04	0,5			
Zavarivanje protaljivanjem	30	0,8	0,03	0,47	12	4-7	
	50	1,17	0,05	0,71			
	75	1,57	0,06	0,94			
	100	2,06	0,08	1,18			
Zavarivanje ključanicom do 200 A	50	1,17	0,05	0,71	17	4-12	
	100	1,57	0,06	0,94			
	160	2,36	0,09	1,42			
	200	3,20	0,13	1,65			
Zavarivanje ključanicom do 400 A		180	2,82	0,11	18	20-35	
		200	2,82	0,11			2,5
	Sapnice s više otvora	250	3,45	0,14			3,0
		300	3,45	0,14			3,5
		350	3,96	0,16			4,1

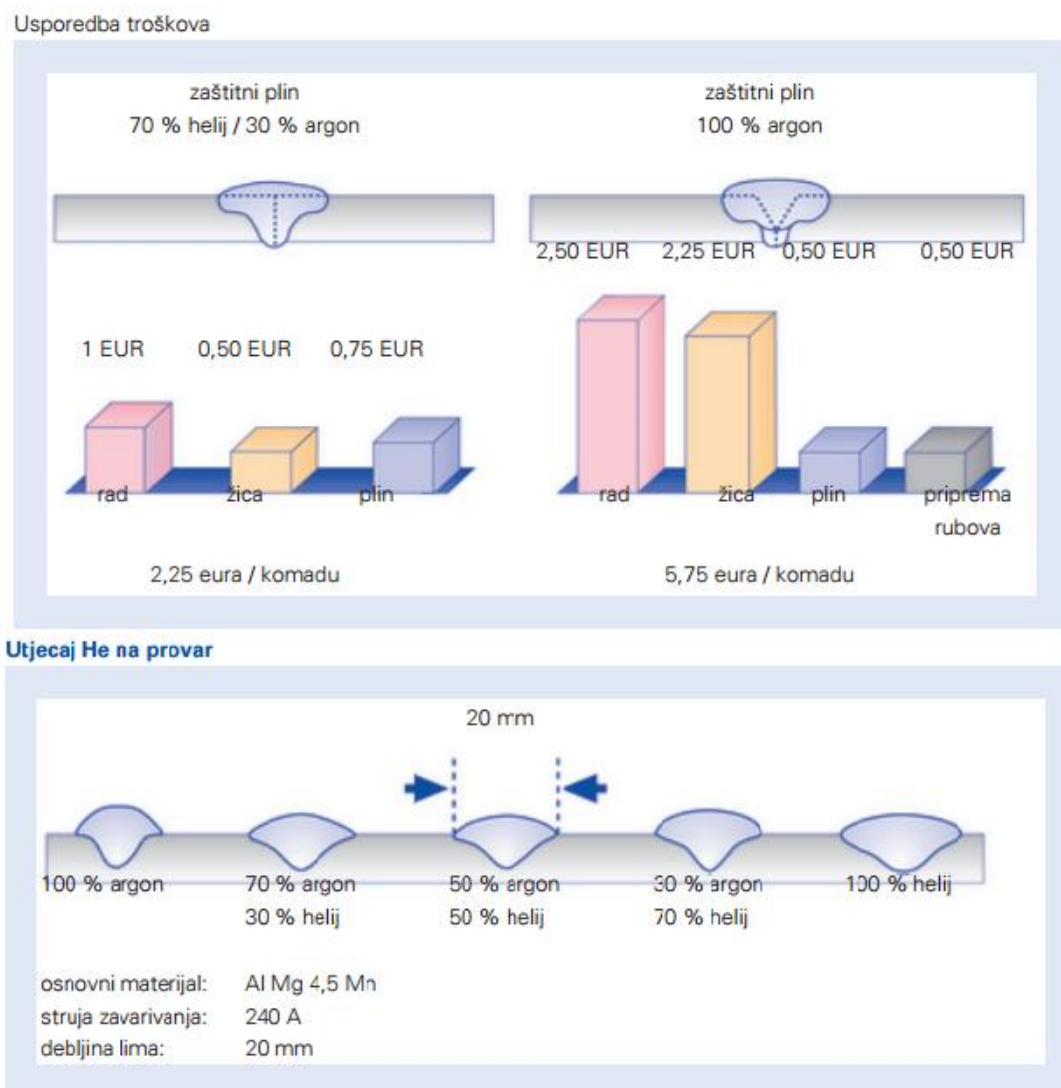
U tablici 9., prikazane su opće smjernice pri odabiru zaštitnog i plazmenog plina s obzirom na osnovni metal zavara.

Tablica 9. Opće smjernice pri odabiru zaštitnog i plazmenog plina [5]

Materijal	Plazmeni plin	Zaštitni plin
Nelegirani čelici	Argon	Argon Argon + 2-5 % H <sub>2</sub>
Niskolegirani čelici	Argon	Argon
Austenitni čelici	Argon	Argon + 2-5 % H <sub>2</sub> Helij
Nikal i legure nikla	Argon 98 % Ar + 2 % H <sub>2</sub>	Argon Argon + 2-5 % H <sub>2</sub>
Titan	Argon	Argon 75 % He + 25 % Ar
Aluminij i legure aluminija	Argon	Argon Helij
Bakar i legure bakra	Argon	Argon Argon + 2 % - 5 % H <sub>2</sub>

### 3.9.5 Utjecaj helija na cijenu i zavarljivost

Zaštitni plin protječe kroz vanjsku sapnicu i štiti zavar od vanjskih utjecaja atmosfere. Najčešće korišteni plin je argon. Helij je 25 % "topliji" od argona, što bi značilo da se pomoću njega unosi više topline u zavar. Helij utječe na povećanje energije električnog luka što omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Nedostatak je cijena i poteškoće kod uspostavljanja električnog luka. Međutim, u kombinaciji sa argonom moguće su neke uštede. Za primjer slika 18., prikazuje mješavinu plinova 70 % helij/30 % argon, uspoređujući sa zaštitnim plinom 100 % argon, postiže se bolja penetracija i snižava ukupna cijena izrade. Također slika 18., prikazuje utjecaj helija na profil zavara.

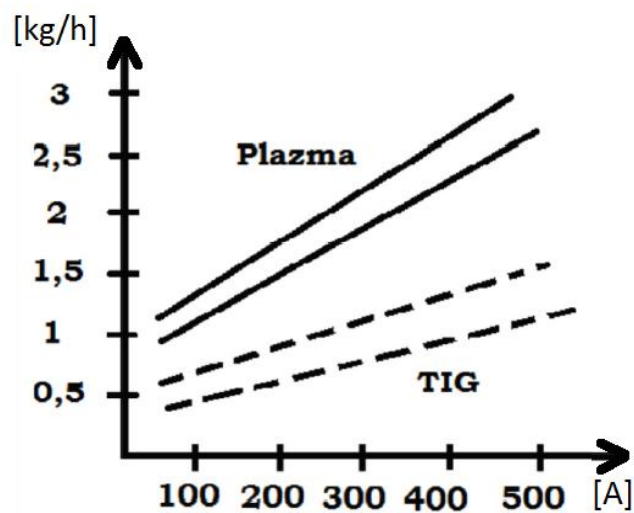


Slika 18. Usporedba troškova i utjecaj helija na provar [22]



### 3.9.6 Dodatni materijal

Dodatni materijal se dodaje kod ručnog plazma zavarivanja isto kao kod TIG postupka, drugim riječima dobavlja se u obliku šipke. Kod automatskog postupka koristi se dodavač žice (vruće ili hladne). Kod plazma zavarivanja praškom, dodatni materijal se dodaje u obliku metalnog praha. Šipke za plazma zavarivanje su iste kao za TIG. Dodatni materijal se koristi iako je uz odgovarajuću pripremu moguće zavarivati i bez njega [141,J]. Tehnika rada slična je TIG-u, osim što kod plazma zavarivanja postoji veća dozvoljena sloboda u razmaku sapnice i materijala, samim time povećava se količina depozita dodatnog materijala, prikazano na slici 19.



Slika 19. Odnos depozita po satu i jakost struje kod TIG-a i PAW-a [17]

### 3.9.7 Ostala oprema

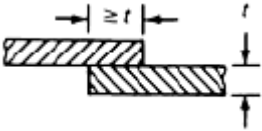
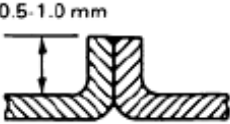

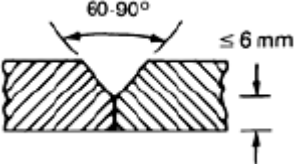
- Hladnjak s vodom – ugrađeni ili vanjski
- Dodatna oprema za pištolj – poklopac, zatezna čahura
- Dodavač žice – održava konstantnu brzinu dodavanja u rasponu od 254 mm/min do 3,18 m/min [18].

### 3.10. Priprema spoja i utjecaji na zavarljivost

#### 3.10.1 Priprema spoja

Priprema spojeva kod plazma zavarivanja prvenstveno ovisi o radnom području parametara. Zbog dobre penetracije preferira se „I“ priprema gdje se može zavarivati sa ili bez dodatnog materijala, ali je kod većih debljina nužna „Y“ priprema jer se prvim prolazom osigurava provar korijena, a drugim završnim oblikovanje lica zavara [8]. Tipične pripreme spoja koje se primjenjuju kod plazma zavarivanja dane su u tablici 10.

Tablica 10. Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja [8]

Vrsta spoja	Preporučena debljina [mm]	Priprema spoja	Način zavarivanja	Broj prolaza	Napomene
Preklopni	0,5 do 1,0		Mikroplazma	1	Rub potpuno pretaliti (kutni spoj). Osigurati potpuno nasjedanje bez zazora, bez dodatnog materijala
Rubni	0,5 do 1,5		Mikroplazma	1	Rubovi potpuno pretaljeni, bez dodatnog materijala.
Sučeljeni I	0,5 do 12		Mikroplazma / plazma	1	Osigurati dobro nalijeganje bez zazora. Kod zavarivanja ključanicom upotrijebiti Cu podlošku s utorom.
Sučeljeni Y	6 do 15		Plazma	2 i više	Provar korijena ključanicom, popuna i završni prolaz s dodatnim materijalom.

Budući da zavarivanje ključanicom prodire duboko u izradak, radi se isključivo sa sučeljenim i Y-spojem, kako je i prikazano u tablici 9. Kod sučeljenog spoja, zavarivanje se može izvesti u jednom prolazu, što najviše ovisi o jačini plazmenog luka, osnovnom materijalu i protoku plina. Tako se mogu zavarivati puno veće debljine nekih materijala kao što su legure titana i cirkonija, nego što je to slučaj kod nehrđajućih čelika gdje su debljine materijala kod sučeljenog spoja manje. U industrijskoj praksi nehrđajući čelici do 6 mm debljine se zavaruju kao sučeljeni I-spoj, bez utora i žljebljenja [5].

### 3.10.2 Položaji zavarivanja

Plazma zavarivanje pokriva gotovo sve položaje zavarivanja, no najviše se koristi horizontalni. Tablica 11. prikazuje pojedine položaje zavarivanja i njihovu ocjenu.

Tablica 11. Mogućnosti zavarivanja u pojedinim položajima [18]

<b>Položaj zavarivanja</b>	<b>Ocjena</b>
Vodoravni, PA	Odličan
Horizontalni (zidni), PC	Odličan
Horizontalni-vertikalni, PB	Dobar
Horizontalni-nadglavni, PD	Dobar
Vertikalni nagore, PG	Vrlo dobar
Nadglavni, PE	Vrlo dobar

### 3.10.3 Zavarljivost

Plazma postupkom mogu se zavariti gotovo svi komercijalno dostupni metali, iako u konačnici možda to neće biti najbolje rješenje. Plazma postupkom se mogu zavariti svi metali i vrijede ista pravila kao i kod TIG-a [18]. Zavarljivost pojedinih metala prikazana je u tablici 12.

Tablica 12. Zavarljivost osnovnog materijala plazma postupkom [18]

<b>Osnovni materijal (metal)</b>	<b>Zavarljivost plazmom</b>
Aluminij	Dobro zavarljiv
Bronca	Moguće ali se ne koristi
Bakar	Dobro zavarljiv
Konstantan (bakar, nikal)	Dobro zavarljiv
Kovano željezo	Moguće, ali se ne koristi
Olovo	Moguće, ali se ne koristi
Invar (željezo, nikal)	Moguće, ali se ne koristi
Nikal	Zavarljiv
Monel (nikal, bakar)	Dobro zavarljiv
Plemeniti metali	Zavarljiv
Niskougljični čelici	Dobro zavarljiv
Srednje i visokougljični čelici	Zavarljiv
Legirani čelici	Dobro zavarljiv
Nehrđajući čelici	Dobro zavarljiv
Titan	Dobro zavarljiv
Volfram	Dobro zavarljiv

### 3.10.4 Debljina materijala

Raspon debljine osnovnog materijala koji se može zavarivati plazma postupkom prikazan je u tablici 13. Zavarivanje se može izvesti uvijek kada postoji dovoljan prostor za namještanje pištolja, zavarivanje ključanicom u jednom prolazu se koristi za materijale debljine do 12 mm, dok se mikroplazma zavarivanje u jednom prolazu koristi za materijale od 0,1 mm do 3,2 mm.

Tablica 13. Raspon debljine osnovnog materijala u odnosu na broj prolaza [18]

Debljina Postupak	mm	0,1	0,4	1,6	3,2	4,8	6,4	10	12,7	19	25	50	100	200
	Mikroplazma jedan prolaz		■	■	■									
Ključanica Jedan prolaz				■	■	■	■							
Zavarivanje u više prolaza							■	■	■	■	■	■		

### 3.11 Prednosti i nedostaci plazma zavarivanja

U današnje vrijeme plazma nalazi svoju primjenu u širokom spektru djelatnosti, no uspoređujući s ostalim konvencionalnim postupcima još uvijek rijetko bude prvi i jedini izbor. Jedan od problema je taj što postoji pregršt parametara koje je potrebno podesiti, također, zahtijevaju se dobri uvježbani operateri/zavarivači. U tablici 14. prikazane su opće karakteristike PAW-a te prednosti i nedostatci.

Tablica 14. Prednosti i nedostaci plazma zavarivanja [23]

KARAKTERISTIKA	PREDNOST	NEDOSTATAK
Zaštićena elektroda	Manja opasnost od kontaminacije i dulji vijek trajanja	Skuplja, kompleksnija i robusnija oprema (hlađenje), nemogućnost zavarivanja u tijesnim prostorima.
Duljina luka	Razmak između elektroda i osn. materijala nije kritična veličina kao kod TIG-a. Daje kontinuiran i stabilan zavar bez potrebe za automatskom kontrolom luka.	TIG ipak fleksibilnija i jeftinija opcija u većini slučajeva.
Stabilan prijenos luka	Pogodno za zavarivanje tankih stijenki, žica i minijaturnih komponenata bez pojave iskri.	
Mala površina ZUT-a	ZUT je uzak s paralelnim rubovima što smanjuje kutne deformacije.	
Stabilnost luka prilikom zavarivanja	Zavaruje mjesto na koje je pištolj naciľjan.	Na stabilnost također utječu plazmeni i zaštitni plin (argon) čija je potrošnja bitno veća u odnosu na druge postupke
Minimalan VF utjecaj	Nakon starta upravljačkog luka gubi se potreba za VF uređaj.	Iako se koristi samo za inicijaciju upravljačkog luka, nužan VF generator.
Gustoća luka	3 puta gušći od TIG-a, bitno smanjuje distorziju, omogućava uže zavare i veće brzine.	LBW i EBW još uvijek imaju manju ZUT i veću brzinu zavarivanja .
Trajanje zavarivanja i do 0,005 s	Izuzetno kratki i precizni zavari omogućuju točkasto zavarivanje finih žica, limova itd.	S obzirom na prirodu luka plazma postupak ima uske tolerancije pripreme spoja.
Zavarivanje na strujama niske jakosti (0,05 A)	Dozvoljava zavare minijaturnih komponenti i dobro kontrolu pozicioniranja luka na osn. materijalu.	Čak i za izvedbe zavara na ovoj jakosti struje potrebno hlađenje vodom.
Razlike u promjeru otvora sapnice	Na ovaj se način postižu različite tehnike zavarivanja ovisno o promjeru.	Ukoliko je promjer sapnice preuzak, vijek trajanja joj se bitno smanjuje.

### 3.12 Razlika unosa energije i isplativost između TIG i plazma postupka

Sljedeći eksperiment prikazuje usporedbu unosa energije dvaju postupaka zavarivanja na posebno odabranom ispitnom materijalu. Ovaj se primjer uzima kao općenita smjernica, s napomenom da bilo kakva promjena parametara može polučiti drugačiji rezultat.

Parametri: Ručno zavarivanje, bez steznih ploča, Cr-Ni čelik, debljina 2,6 mm. Sve vrijednosti su određene s odgovarajućim mjernim instrumentima.

TIG: 125 A, 12 V, 26 cm/min

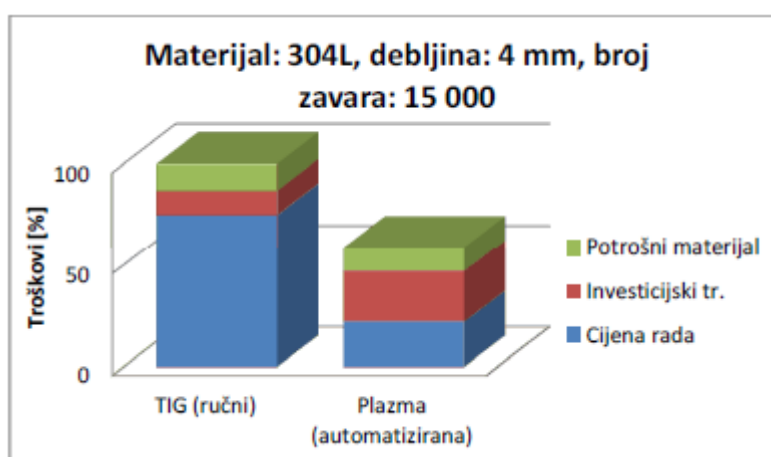
Plazma: 75 A, 18 V, 34 cm/min

$$\text{Unos topline} = \frac{\text{Jakost struje} \times \text{napon} \times 60}{\text{Brzina zavarivanja u cm/min}} \text{ [kJ]}$$

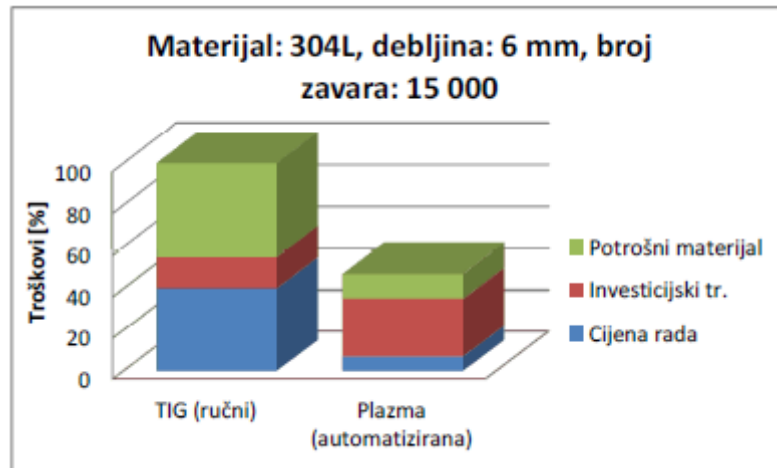
$$\text{TIG} = \frac{125 \times 12 \times 60}{26} = 3,46 \text{ kJ/cm}$$

$$\text{Plazma} = \frac{75 \times 18 \times 60}{34} = 2,38 \text{ kJ/cm}$$

Ako se objektivno sagleda poglavlje prednosti i nedostataka, dobiva se postupak koji prednjači u kvaliteti, brzini, preciznosti, relativno malome unosu topline i visokoj konzistentnosti zavara nauštrb cijene opreme te slabe ili nikakve isplativosti kod proizvodnje malih serija. Ipak plazma se često uzima u obzir kao optimalno rješenje u visokoproduktivnim proizvodnim pogonima, gdje postoji potreba za visokom kvalitetom zavara. Na slikama 20 i 21 moguće je vidjeti isplativosti automatiziranog plazma postupka zavarivanja u višeserijskoj proizvodnji u odnosu na ručni TIG, te povećanje isplativosti s porastom debljine stijenke spoja [24].



Slika 20. Prikaz troškova u zavarivanju materijala 304L, debljina stijenke 4 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti [24]



Slika 21. Prikaz odnosa troškova zavarivanja materijala 304L, debljina stijenke 6 mm TIG i PAW postupkom u uvjetima visoke produktivnosti [24]

### 3.13 Primjena plazma zavarivanja u praksi

#### 3.13.1 Zavarivanje lima CrNi čelika AISI 304 debljine 1 mm

Za zavarivanje nehrđajućeg lima debljine 1 mm kvalitete AISI 304 primjenjena je „I“ priprema spoja bez razmaka na bakrenoj podlošci bez korijenske zaštite. Limovi su stegnuti čeljustima na udaljenosti 10 mm od zavara, prikazano na slici 22. [8]



Slika 22. Priprema pri zavarivanju CrNi čelika AISI 304 debljine 1 mm [8]

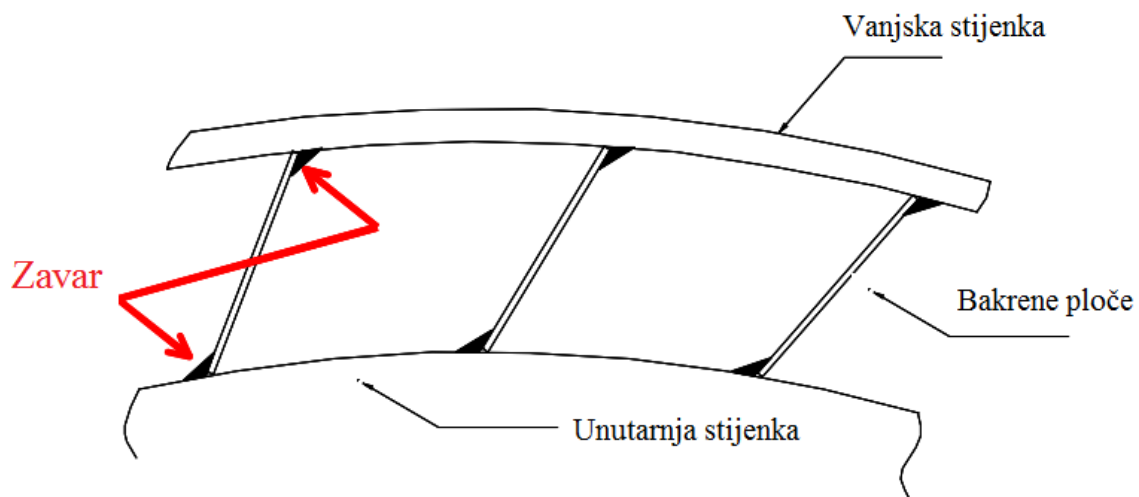
Primjenjeni su parametri zavarivanja kako slijedi:

1. Struja zavarivanja 72 A
2. Brzina zavarivanja 150 cm/min
3. Protok plazmenog plina 0,2 l/min
4. Protok zaštitnog plina 6 l/min (95 % Ar + 5 % H<sub>2</sub>)
5. Promjer sapnice 1,8 mm
6. Udaljenost radnog komada od sapnice 2,5 mm.



### 3.11.4 Primjena plazma-MIG postupka za zavarivanje posuda za skladištenje nuklearnog otpada

Hibridni plazma MIG postupak (151) korišten je za zavarivanje posuda za skladištenje nuklearnog otpada. Presjek posude prikazana je na slici 23. Posuda se sastoji od dvostruke čelične stijenke između koje su postavljene bakrene ploče. Bakrene ploče su zavarene za čelične stijenke, radi se o zavarivanju raznorodnih materijala. Zavarivanja su izvedena u jako uskim prostorima, duljina zavara je 4 m. Prije je za ovakve aplikacije korišten automatski TIG postupak, no primjenom plazma-MIG postupka povećana je produktivnost postupka, te je povećana je brzina zavarivanja na uštrb većeg prijenosa toplina [13].



Slika 23. Shematski prikaz odjeljaka posude zavarjenih plazma-MIG postupkom[13]

Primjenjeni su parametri zavarivanja kako slijedi:

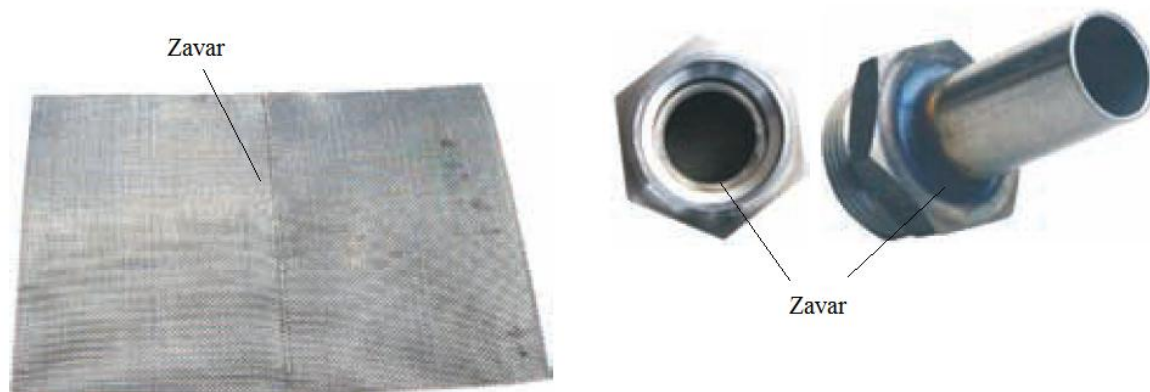
1. Struja zavarivanja (plazma) 130 A
2. Brzina žice 8,4 m/min
3. Napon za MIG zavarivanje : 25 V
4. Brzina zavarivanja 360 mm/min
5. Protok zaštitnog plina 10 l/min (100 % Ar)
6. Protok plazmenog plina 15 l/min (100 % Ar)
7. Protok centralnog plina 10 l/min (100 % He)

### 3.11.5 Ostali primjeri plazma zavarivanja u praksi

Plazma zavarivanje se koristi za zavarivanje različitih debljina spojeva, počevši od vrlo tankih, područje folija (mikroplazma zavarivanje) pa sve do velikih debljina. Zavarivanje ključanicom obično obuhvaća materijale do 10 mm debljine, ako se radi o zavarivanju titana debljine se kreću do 12 mm. Kod plazma postupaka sa velikim depozitom materijala postoje ograničenja minimalne debljine koja se može određenim postupkom zavariti, tako za plazma zavarivanje prahom (PPAW) minimalna debljina osn. materijal je 4 mm, dok za plazma zavarivanje vrućom žicom 20 mm.

Ovaj postupak se dobro primjenjuje u zavarivanju cjevovoda, naročito cjevovoda izrađenih od nehrđajućeg čelika, raznih kontejnera za prijevoz opasnih tvari, hermetičkih posuda, medicinske opreme i posuda pod tlakom.

U sljedećih nekoliko slika prikazani su aspekti primjene plazma postupka. Slika 22., lijevo, prikazuje uzdužni zavar na zaštitni mrežica za kemijske peći, debljine 0,15 mm. Na slici desno prikazan je unutrašnji i vanjski zavar na cijevnom segmentu [17].



Slika 24. Primjena plazma postupka [17]

Slika 23., prikazuje ručni plazma postupak u automobilskoj industriji, na konstrukciji BMW-og automobila (prostor oko vrata). Dodatni materijal je u obliku šipke i dodaje se ručno.



*Slika 25.* Ručno plazma zavarivanje u BMW-oj tvornici [17]

## **4. UTJECAJ I DJELOVANJE AKTIVACIJSKOG PREMAZA KOD PLAZMA ZAVARIVANJA**

Električni luk, općenito se može smatrati provodnikom električne struje između elektrode i materijala zavarivanja. Najčešće se koristi za zagrijavanje i taljenje u procesu zavarivanja. Razlikujemo dva procesa zavarivanja: procesi zavarivanja s taljivom elektrodom i one s netaljivom elektrodom. Za ovaj dio rada posebno su zanimljivi procesi plazma i TIG zavarivanja koji koriste netaljivu volframovu elektrodu za uspostavu električnog luka. Plazma proces zavarivanja ima određene nedostatke, a jedan od njih je skupa oprema i povećana cijena izrade proizvoda. Kod postupaka zavarivanja teži se što većoj kvaliteti zavara i nastoji se smanjiti cijena izrade te povećati produktivnost. Kod plazma zavarivanja javlja se problem da je postupak neisplativ za male serije i pojedinačne izrade proizvoda. Neke od mogućnosti povećanja isplativosti i produktivnosti procesa te poboljšanja kvalitete je povećanje penetracije, smanjenje broja prolaza kod zavarivanja i smanjenje deformacija tijekom zavarivanja. Kako bi se to ostvarilo koriste se alternativni načini poboljšanja penetracije, a radi se o aktivacijskom premazu.

Aktivacijski premazi ili još nazivani aktivacijska talila prvi puta su korišteni kod modificiranog TIG postupka, GTAW-flux. Pokušaji da se poveća produktivnost TIG postupka zavarivanja pomoću povećanja jakosti struje i smanjivanja brzine zavarivanja pokazali su se neuspjelim. Zbog tih razloga pristupilo se ovom alternativnom načinu poboljšanja produktivnosti. 1960-tih godina Paton Electric Welding Institute je počeo razvijati zavarivanje pomoću aktivnog talila. Aktivacijsko talilo je mješavina anorganskih tvari suspendiranih u hlapljivom mediju. Tanki sloj aktivacijskog premaza nanosi se na osnovni materijal i to samo na područje na kojem će se naknadno zavarivati. Reakcijom talila tijekom zavarivanja električni luk se sužava, povećava se penetracija od 2 do 3 puta te tako povećava produktivnost [25]. Prema istraživanjima i teorijskim informacijama prednost zavarivanja s aktivacijskim talilom je mogućnost zavarivanja bez pripreme spoja (rubovi se ne trebaju čistiti).

### **4.1 Svojstva i sastav aktivnog premaza**

Ovisno kemijskom, mehaničkom i toplinskom ponašanju materijala aktivacijsko talilo se može prilagoditi-mijenjati. To bi značilo da takvo talilo ima dobru sposobnost kvašenja površine što utječe na oblik taline, a sastav talila se mijenja ovisno o površini gdje se namjerava

primijeniti. No, istraživači još nisu u potpunosti razjasnili na koji način kvašenje površine ima utjecaj na učinkovitost da zaštiti površinu taline.

Kako bi talilo utjecalo na povećanje gustoće energije u električnom luku te samim time na povećanje penetracije, talila moraju sadržavati velike elektrone poput oksida, halida i fluorida [26].

Komponente koje mogu činiti sastav aktivnog talila za zavarivanje nehrđajućih čelika su [27]:

- Titanijev(IV) oksid ( $\text{TiO}_2$ ),
- Silicijev(IV) oksid ( $\text{SiO}_2$ ),
- Kromov (III) oksid ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ),
- Niklov (II) oksid ( $\text{NiO}$ ),
- Bakrov (II) oksid ( $\text{CuO}$ ).

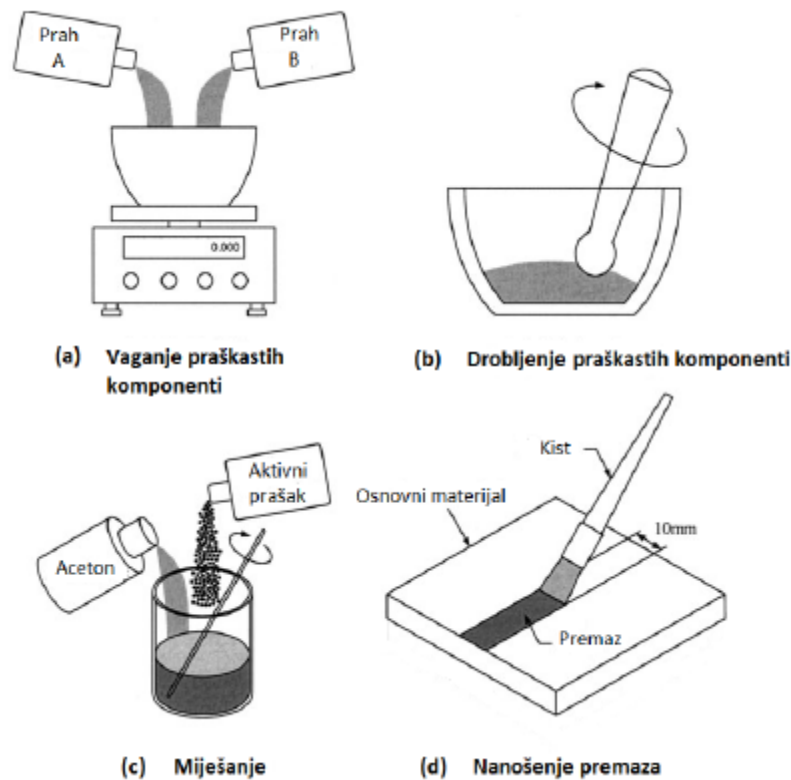
Jedan od zahtjeva za efektivnost aktivnog talila je da talište talila bude približno slično talištu osnovnog materijala. Također, talilo ne smije tvoriti stabilne čvrste faze s talinom zavara koje bi štetilo izgledu zavara i svojstvima zavarenog spoja.

#### 4.2 Princip rada plazma zavarivanja s aktivacijskim talilom

U literaturi ne postoji mnogo zapisa o principu rada za plazma zavarivanje s aktivacijskim talilom, no, može se podvući analogija s A-TIG postupkom. Postupak izrade talila se sastoji od sljedećeg:

- a) Određivanje udjela praškastih komponenti,
- b) Usitnjavanje i homogenizacija praškastih komponenti,
- c) Mješanje praškastih komponenti s acetonom kako bi se omogućilo kvašenje,
- d) Nanošenje dobivenog aktivnog talila pomoću kista tj. manualno ili automatski. Pri nanošenju se mora paziti da premaz ne curi unutar spoja i da je debljina premaza što više ujednačena kako bi se osigurala optimalna stabilnost procesa.

Slika 26., prikazuje shematski postupak određivanja sastava aktivnog talila, miješanje te nanošenje talila na ploču koja se zavaruje. Nakon gore navedenog postupka plazma pištoljem se prelazi preko premazane površine [27].



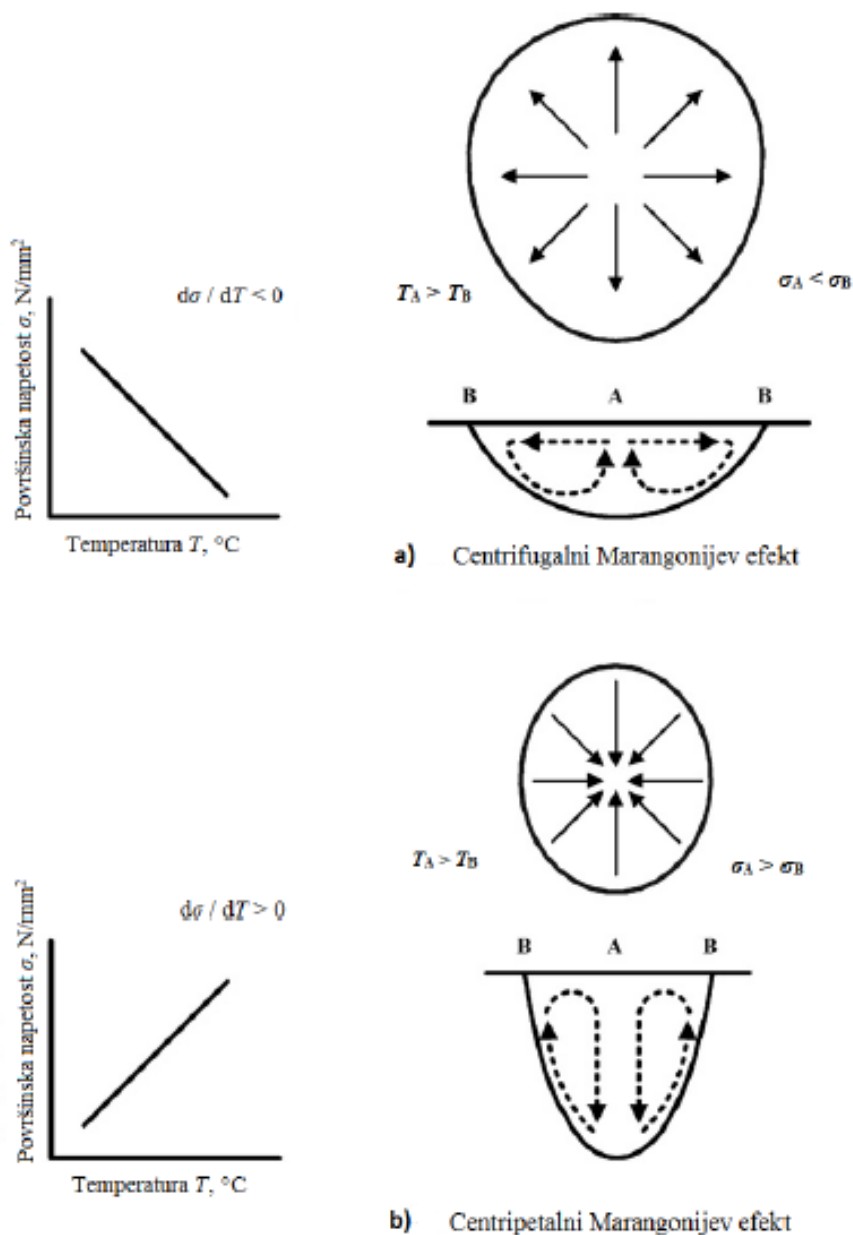
Slika 26. Shematski prikaz pripreme aktivnog talila, miješanje te nanošenje talila na ploču koja se zavaruje [28]

#### 4.3 Mehanizmi utjecaja aktivnog talila

Mnogi istraživači su istraživali utjecaj različitih aktivacijskih talila na penetraciju kod TIG postupka zavarivanja. Također, mnogi od njih su se složili da postoje dva glavna utjecaja aktivnog talila. Prvi mehanizam je objašnjen pomoću Marangonijevog efekta strujanja fluida dok se drugim mehanizmom smatra povećanje energije električnog luka zbog kontrakcije tj. suženja električnog luka.

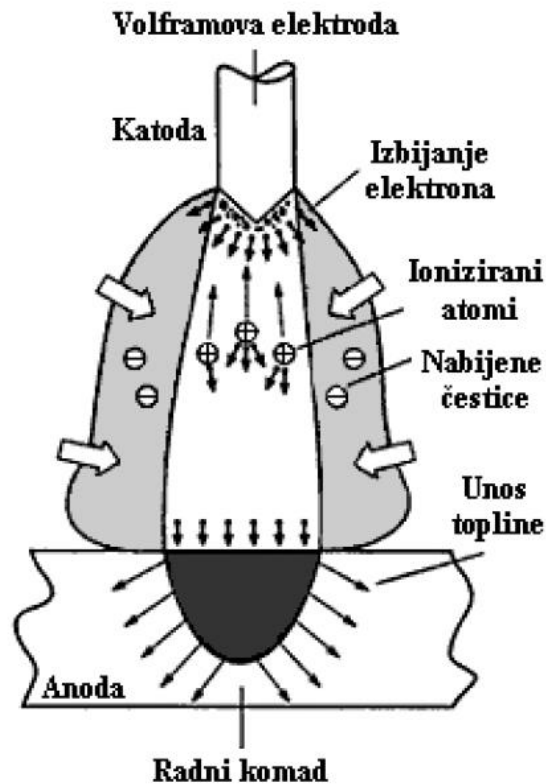
Marangonijev efekt fluida se odnosi na Toplinski Koeficijent Površinske Napetosti-TKPN taline. Kada se koristi plazma proces bez aktivnog talila TKPN poprima negativnu vrijednost. To znači da hladnija periferna strana taline ima veću površinsku napetost od same sredine. Zbog takve raspodjele površinskih napetosti generira se centrifugalni Marangonijev efekt u talini zavara, slika 27. U takvim uvjetima tok taline se lakše odvija od centra taline zavara prema rubovima tvoreći široki i plitki profil zavara [29].

Kada se koristi aktivno talilo tj. A-TIG postupak zavarivanja, vrijednost TKPN-a se mijenja iz negativne u pozitivnu. Stoga su površinske napetosti veće u centru taline zavora nego na rubovima. Posljedica takvih raspodjela površinskih napetosti je smjer strujanja taline iz rubnih krajeva taline prema sredini tj. centripetalni Marangonijev efekt, slika 27. Zbog toga će profil zavora imati znatno veću penetraciju i suženi oblik.



Slika 27. Marangonijev efekt strujanja fluida [29]

Istraživači Lucas i Howse [30] razvili su princip apsorpcije elektrona koji za posljedicu imaju suženje luka i povećanje penetracije zavora, slika 28.



Slika 28. Mehanizam nastanka električnog luka kod A-TIG procesa po Lucas-u i Howse-u [30]

Toplina koja je potrebna za formiranje taline proizlazi iz transfera kinetičke energije elektrona koji se apsorbiraju na površini radnog komada. Količina unesene energije jednaka je ubrzanju i sudaranju elektrona o površinu materijala. Uži električni luk ima za posljedicu veću gustoću struje.

Smatra se da talilo za vrijeme isparavanja sužuje električni luk tako da zahvaća elektrone u vanjskom dijelu luka [30]. Elektroni se vežu uz isparavajuće molekule i disocirane atome čineći tako negativno nabijene čestice. Tako pričvršćeni elektroni mogu zauzeti mjesta samo u "hladnijem" perifernom dijelu električnog snopa gdje imaju znatno manju energiju. U samom centru električnog snopa ionizacija dominira što omogućuje znatno veće temperature i energiju elektrona. Prema tome ograničava struju u središnjem dijelu luka što povećava gustoću struje i rezultira užim lukom na anodi/radnom komadu (ostvarena je veća penetracija).

Širina samog električnog luka ovisit će o molekulama i atomima koji će imati veliki poprečni presjek. Tako će spojevi koji sadrže halogene elemente imati veliki afinitet prema elektronima kad disociraju. Iako imaju nešto manji poprečni presjek za prihvaćanje elektrona i



znatno veću disociranu temperaturu, metalni oksidi su jednako efikasni pri sužavanju električnog luka jer pružaju znatno veći broj isparavajućih molekula i atoma koji se nalaze u vanjskome dijelu električnog luka [31].

#### 4.5 Plazma zavarivanje austenitnih čelika uz primjenu aktivacijskog premaza

Za ovo istraživanje korišten je osnovni materijal austenitni čelik AISI 304, kemijskog sastava prikazanog u tablici 15. Limovi su dimenzija 150 mm x 150 mm, debljine 5 mm. Površina je ispolirana abrazivnim papirom čistoće 400 i naknadno oprana u acetonu.

Tablica 15. Kemijski sastav osnovnog materijala (AISI 304) [25]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0,06	0,48	1,27	0,029	0,015	18,4	8,2	Ostatak

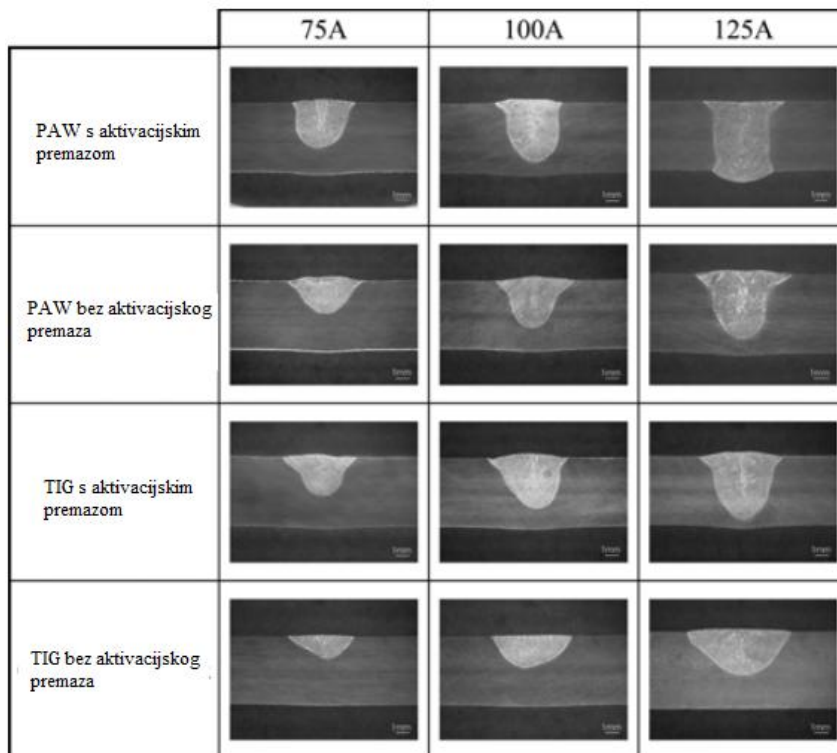
Istraživanje je provedeno s TIG i plazma postupkom zavarivanja. Sastav aktivacijskog talila je sljedeći :  $\text{TiO}_2$  (30 %),  $\text{SiO}_2$  (25 %),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (25 %) i  $\text{MoO}_3$ . Prije zavarivanja prašak je pomiješan s acetonom da bi se dobio jednoličan konzistentan premaz. Aktivacijski premaz se nanosi na površinu kistom, širina premaza iznosi 10 mm, debljina premaza je približno 0,2 mm odnosno  $15 \text{ mg/cm}^2$ . Navarivanje je izvedeno automatskim postupkom, konstantnom brzinom. Parametri zavarivanja za TIG i plazma postupak prikazani su tablici 16.

Tablica 16. Parametri za zavarivanje osnovnog materijala (AISI 304) [25]

Parametar	TIG	PAW
Struja zavarivanja	75 A, 100 A, 125 A	75 A, 100 A, 125 A
Brzina zavarivanja	150 mm/min	150 mm/min
Udaljenost od radn. komada	3 mm	3 mm
Kut elektrode	$60^\circ$	$30^\circ$
Zaštitni plin	Argon, 10 l/min	Argon, 17,5 l/min
Plazmeni plin	-	Argon, 0,7 l/min

Zavari izvedeni konvencionalnom metodom TIG zavarivanja su bili široki i plitki, dok kod PAW-a zavari su bili uski i duboki. Ustanovljeno je da upotrebom aktivacijskog premaza dolazi do povećanja penetracije kod zavarivanja austenitnih čelika. Slika 29., prikazuje dobivene makro izbruske. Aktivacijski premaz poboljšava tečenje taline zavara kod TIG zavarivanja, čime se postižu vrlo slične karakteristike kao kod konvencionalnog plazma zavarivanja. Iz slike

je vidljivo se uz primjenu aktivacijskog premaza pri 125 A može potpuno provariti ploča debljine 5 mm.



Slika 29. Dobiveni makro izbrusci za TIG i plazma zavarivanje [25]

Također, iz slike se može vidjeti da je lice navara kod TIG zavarivanja s akt. talilom vrlo slično kao kod konv. PAW-a. Kao što je prije spomenuto, kod konv. TIG zavarivanja zavar je širok i plitak, dok se upotrebom akt.talila povećava tečenje taline unutar materijala, što osigurava uzak i dubok zavar.

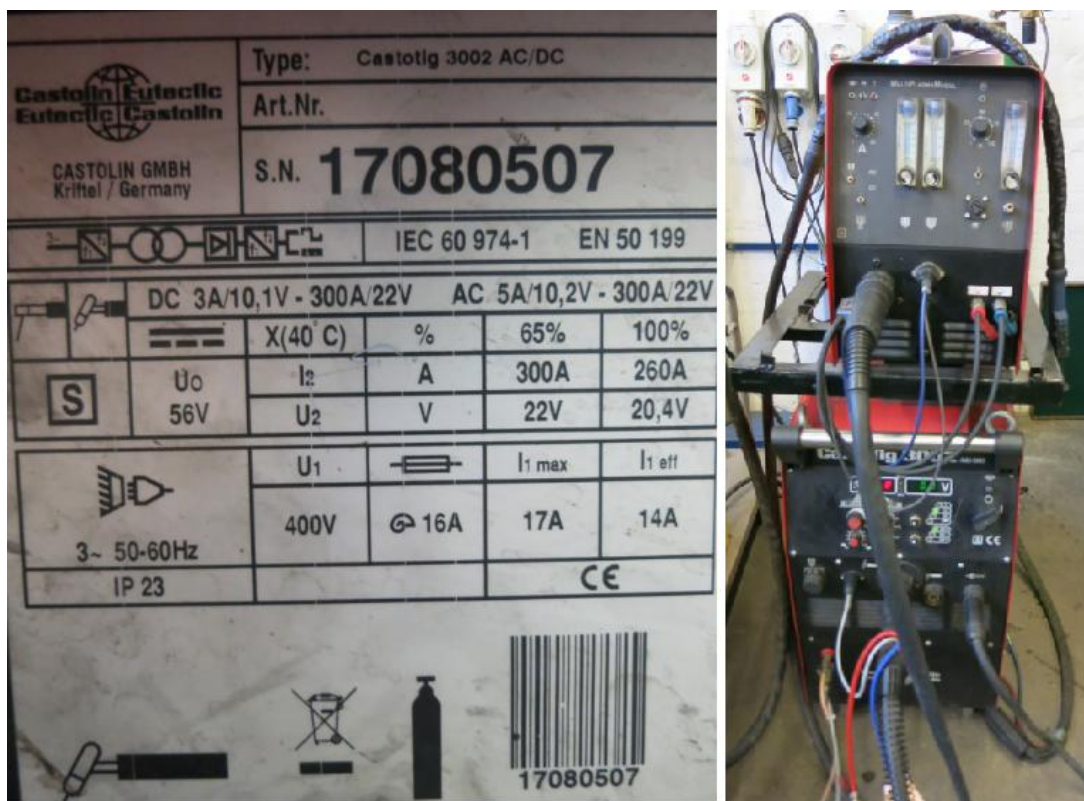
Oba procesa s aktivacijskim premazom imaju značajno veću penetraciju.

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

Cilj ovog eksperimentalnog rada je utvrditi utjecaj pojedinog aktivacijskog premaza pri plazma navarivanju austenitnog čelika. Za nekoliko razina parametara navareni su ispitni uzorci te naknadnom analizom su određeni utjecaji pojedinog premaza na geometriju spoja i kemijski sastav navara, kao i utjecaj aktivacijskog premaza na tehnološku primjenjivost za automatizirano plazma zavarivanje.

### 5.1 Oprema i izvor struje za zavarivanje

Za ovaj rad korišten je inverterski izvor struje Castotig 3002 AC/DC. Uređaj je primjenjiv za plazma zavarivanje, uz to također je primjenjiv za REL i TIG zavarivanje. Karakteristike inverterskih uređaja i opreme za plazma zavarivanje detaljno su objašnjeni u poglavlju 3.9. Na slici 30., prikazan je izvor struje korišten u ovom eksperimentu i njegova natpisna pločica.



Slika 30. Izvor struje Castotig 3002 AC/DC

## 5.2. Osnovni materijal

Korišteni osnovni materijal je bio austenitni čelik AISI 304 – W.Nr 1.4301 čiji je točan kemijski sastav dobiven kemijskom analizom. AISI 304 je austenitni nehrđajući čelik dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti. Čelik s oznakom 304 je temeljni čelik skupine i skupa s čelikom 304L je najčešći u upotrebi. Mehanička svojstva korištenog čelika prikazana su u tablici 17., a u tablici 18. nalazi se kemijska analiza materijala AISI 304.

Tablica 17. Mehanička svojstva niskougličnog austenitnog čelika [30]

Oznaka čelika			Mehanička svojstva				
EN	stara HRN	AISI	R <sub>m</sub> , min [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>5</sub> ,min [%]	Z, min [%]	KU,min [J]
X2CrNi18-9	Č45701	304L	450...700	175	50	60	85

Tablica 18. Kemijska sastav čelika AISI 304

Kem. element	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	V	Cu
Udio [%]	71,75	18	7,81	1,32	0,262	0,32	0,19	0,34

### 5.3. Aktivacijski premazi

U svrhu ovog eksperimenta korištene su pojedine komponente u obliku sitnog praška koje tvrtka Elektroda Zagreb d.d. primjenjuje u izradi obloženih elektroda.

Komponente su sljedeće :

- $\text{SiO}_2$  – Kvarc A04,
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Željezni III oksid A20,
- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – Kromov oksid A16,
- $\text{TiO}_2$  – Rutil A01,
- $\text{CaF}_2$  – Flušat B03.

Na slici 31., prikazane su komponente u obliku sitnog praška.



Slika 31. Aktivacijske komponente premaza [31]

Na temelju dosadašnjih ispitivanja s aktivacijskim premazima baziranih na TIG postupku odabrana su 3 aktivacijska premaza koja daju najbolje rezultate na austenitnom čeliku. Zbog svojih karakteristika dobivenih kod TIG postupka, odabrana su sljedeća 3 aktivacijska premaza:

- $\text{SiO}_2$  – najveći unos topline, napon raste s porastom brzine navarivanja.
- $\text{TiO}_2$  – napon pada s porastom brzine, smanjuje širinu navara.
- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – ima smirenu karakteristiku napona, stabilan električni luk, širok navar.

## 5.4 Tehnologija plazma zavarivanja austenitnih čelika

### 5.4.1 Zaštitni i plazmeni plin

Austenitni čelici prilikom navarivanja u zoni utjecaja topline stvaraju okside koji kasnije mogu uzrokovati neki od oblika korozije. Zbog toga je potrebno osigurati odgovarajući protok inertnog zaštitnog plina, koji će štititi navar tijekom navarivanja od utjecaja vanjske atmosfere. U ovom radu kao zaštitni plin odabran je 100 % argon, čistoće 5,5.

U ovom radu kao plazmeni plin odabran je 100 % argon, čistoće 4,5.

### 5.4.2 Priprema uzoraka za navarivanje – čišćenje površine

Čišćenje površine je vrlo važno za kvalitetu navarenog spoja, a provodi se brušenjem četkama od nehrđajućeg čelika, brušenjem brusnim papirom, pjeskarenjem, obradom odvajanjem čestica i kemijskim čišćenjem.

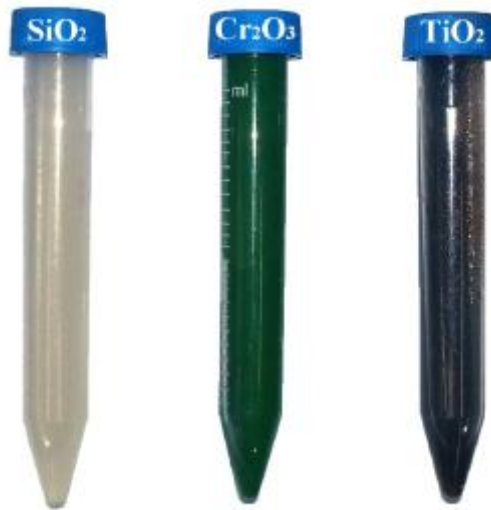
U ovom eksperimentu površina osnovnog materijala očišćena je od površinskih oksida brusnim papirom i to počevši sa grubim gradijentom 80, pa sve do finijeg gradijenta 320. Slika 32., prikazuje izgled površine prije (lijevi dio slike) i poslije čišćenja brusnim papirom (desni dio slike).



Slika 32. Priprema osnovnog materijala, lijevo-neočišćeno, desno-očišćeno

### 5.4.3. Priprema aktivacijskih premaza

Aktivacijski premaz je načinjen u obliku emulzije 96 % etilnog alkohola i praškastih komponenti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{TiO}_2$ . Komponente su pomiješane u volumnom omjeru 2:1, što znači da je u 10 ml etilnog alkohola stavljeno 5 gr pojedine praškaste komponente. Slika 33., prikazuje već prethodno pripremljene aktivacijske premaze. Može se uočiti da pojedine komponente različito dispergiraju u alkoholnoj emulziji. Fine čestice u obliku praha kao kod  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  bolje dispergiraju te tvore finu pastu, dok  $\text{TiO}_2$  ima grublje čestice u obliku pijeska te zbog toga teže dispergira u etilnom alkoholu. Prije samog navarivanja na osnovni materijal kistom je nanešen premaz u smjeru navarivanja.



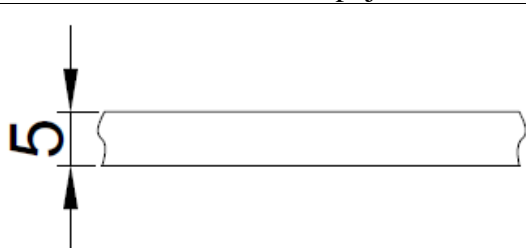
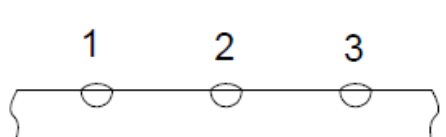
Slika 33. Izgled pripremljenih aktivacijskih A-TIG premaza [31]

## 5.4.4. Specifikacija postupka navarivanja

Navarivanje je bilo izvedeno na način da su navarena po 3 navara na svaku ploču, ukupno 12 navara. Prva ploča je bila navarena bez primjene aktivacijskog praška za 3 različite brzine navarivanja koje su također bile iste kod drugih ploča.

U tablici 18. su upute za navarivanje :

Tablica 18. Specifikacija postupka navarivanja

Projekt		DIPLOMSKI RAD	
Postupak (EN ISO 4063)	14	Osnovni materijal	
Proces navarivanja	Mehanizirano	Oznaka materijala	Debljina
Izvor struje	CastoTIG 3002	AISI 304	5 mm
Položaj navarivanja (EN ISO 6947)	PA	Vrsta spoja	-
Izvedba spoja		Redoslijed navarivanja	
			
Promjer i vrsta elektrode	d=1,6 mm WT 20-40 [5]		
Zaštitni plin	Argon 99,998 % I1		
Protok zaštitnog plina	10 l/min		
Plazmeni plin	Argon I1 [5]		
Protok plazmenog plina	1 l/min		
Brzine navarivanja	1.) 15 cm/min 2.) 20 cm/min 3.) 25 cm/min		
Visina luka	4 mm		
Promjer unutarnje sapnice			
Unutarnji promjer vanjske sapnice	14 mm		
Jakost stuje	85 A		
Početna struja	15 A		
Jakost pilot luka	15 A		
Završna struja	15 A		
Vrijeme rasta struje	$t_u = 1$ s		
Vrijeme pada struje	$t_d = 1$ s		
Temperatura predgrijavanja	-		
Međuslojna temperatura	max. 100 °C		
Način pripreme i čišćenje	Brusnim papirom		



## 5.2 Navarivanje uzoraka

Prije samog navarivanja bilo je potrebno odrediti optimalne parametre za zavarivanje. Kod plazma zavarivanja postoji velik broj parametara koji mogu utjecati na kvalitetu zavarenog spoja. U svrhu dobivanja optimalnih parametara izvršeno je nekoliko probnih prolaza i dobiveni su navari pomoću kojih je određena maksimalna i minimalna brzina navarivanja kao i struja navarivanja. Navarivanje je izvedeno pomoću automata za zavarivanje „BUG-O Systems MDS 1002“. Na slici 34., prikazana je oprema za automatizirano plazma zavarivanje.



Slika 34. Oprema za automatizirano plazma zavarivanje

Odabrana je struja od 85 A, to je i maksimalna dozvoljena struja za bakrenu sapnicu ugrađenu na pištolju. Određene su brzine navarivanja i to redom 15 cm/min, 20 cm/min i 25 cm/min. Prvo je navarena ploča bez aktivacijskog premaza.

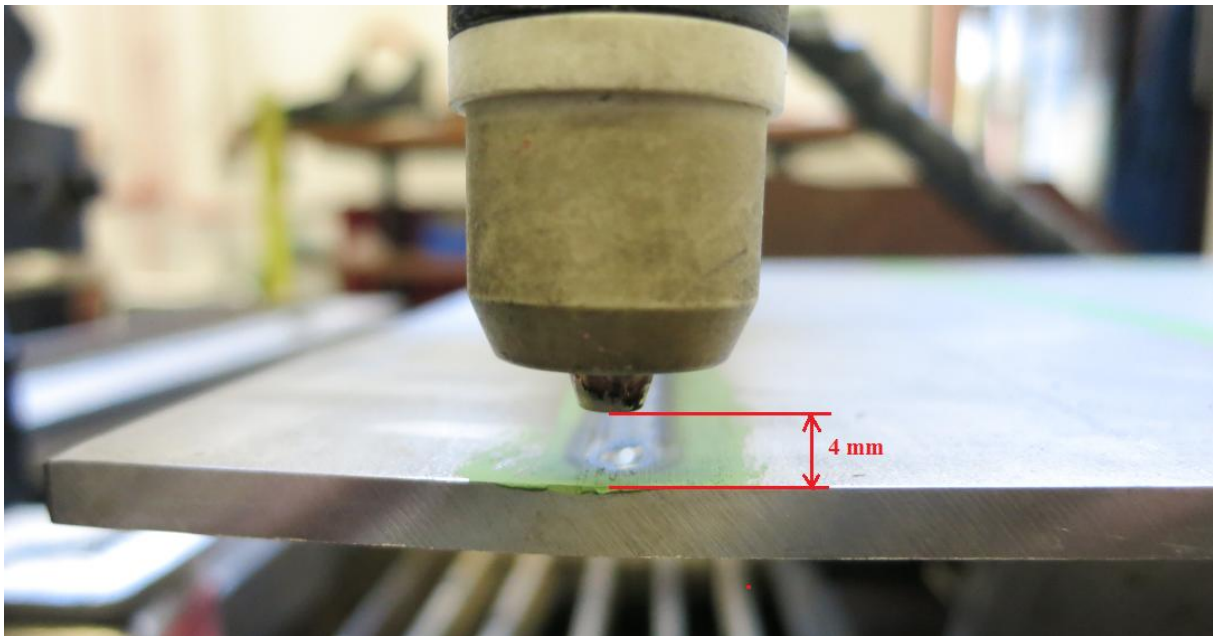
Za navarivanje su bile pripremljene dvije ploče dimenzija 300 x 500 x 5 mm, te je na svakoj ploči izvedeno po 6 navara. Navari su rađeni ovim redoslijedom:

**1 – 2 – 3 – B1 – B2 – B3 – A1 – A2 – A3 – C1 – C2 – C3**

Tijekom navarivanja je zbog velikog unosa topline u osnovni materijal dolazilo do pojave deformacija, te je stoga nakon prva tri navara na prvoj ploči., ista ploča maknuta da se ohladi

te je navarivana druga ploča. Unos topline kod navarivanja austenitnih čelika mora biti mali i kontroliran. Iz tog razloga navarivanje je potrebno izvoditi u što hladnijem stanju što znači da nema predgrijavanja, a temperatura između prolaza treba biti što niža, maksimalno 100 °C.

Udaljenost između pištolja i radnog komada iznosio je 4 mm. Zbog povećanog unosa topline i moguće deformacije ploče, udaljenost od radnog komada je kontrolirana nakon svakog prolaza pomoću etalona od 4 mm. Na slici 35., prikazana je udaljenost između pištolja i radnog komada nakon procesa navarivanja.



*Slika 35.* Prikaz udaljenosti pištolja od radnog komada

Svi parametri navarivanja, iznosi vrijednosti unosa topline u osnovni materijal ovisno o vrsti aktivacijskog premaza i brzini navarivanja navedeni su u tablici 19. Iz dobivenih podataka moguće je vidjeti da su vrijednosti napona varirale ovisno o vrsti aktivacijskog premaza.

Tijekom zavarivanja svi parametri osim brzine navarivanja i napona su bili konstantni. Na temelju dobivenih parametara u tablici 19., izračunati su unosi topline za svaki prolaz. Izračun za unos topline je pokriven normom HRN EN 1011-1.

Izračun unosa topline:

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v_z \times 1000}$$

Q = Unos topline [kJ/mm]

U = Napon [V]

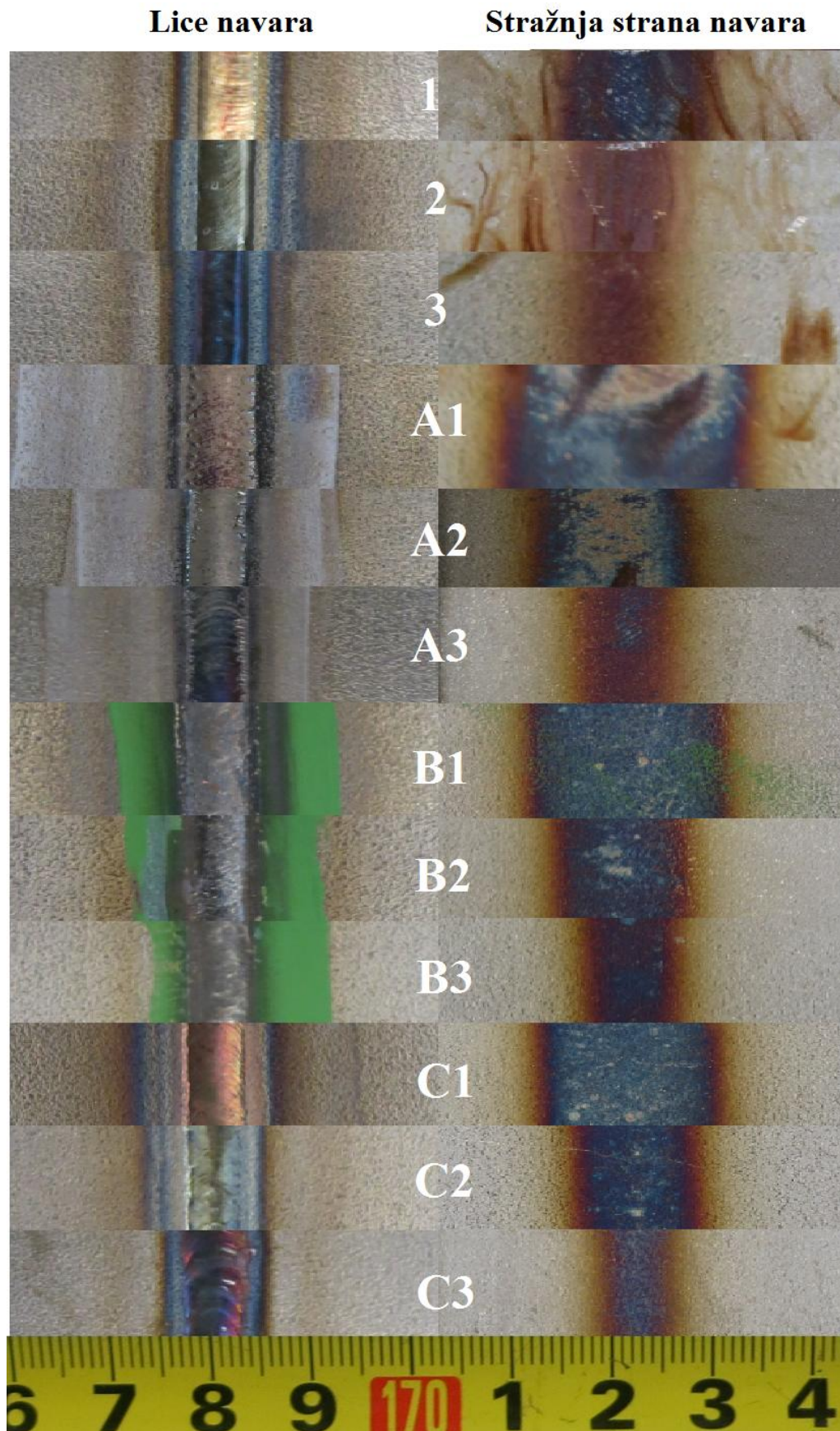
I = Struja [A]

$v_z$  = Brzina navarivanja [mm/min]

k = Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (k=0,6 za plazma postupak)

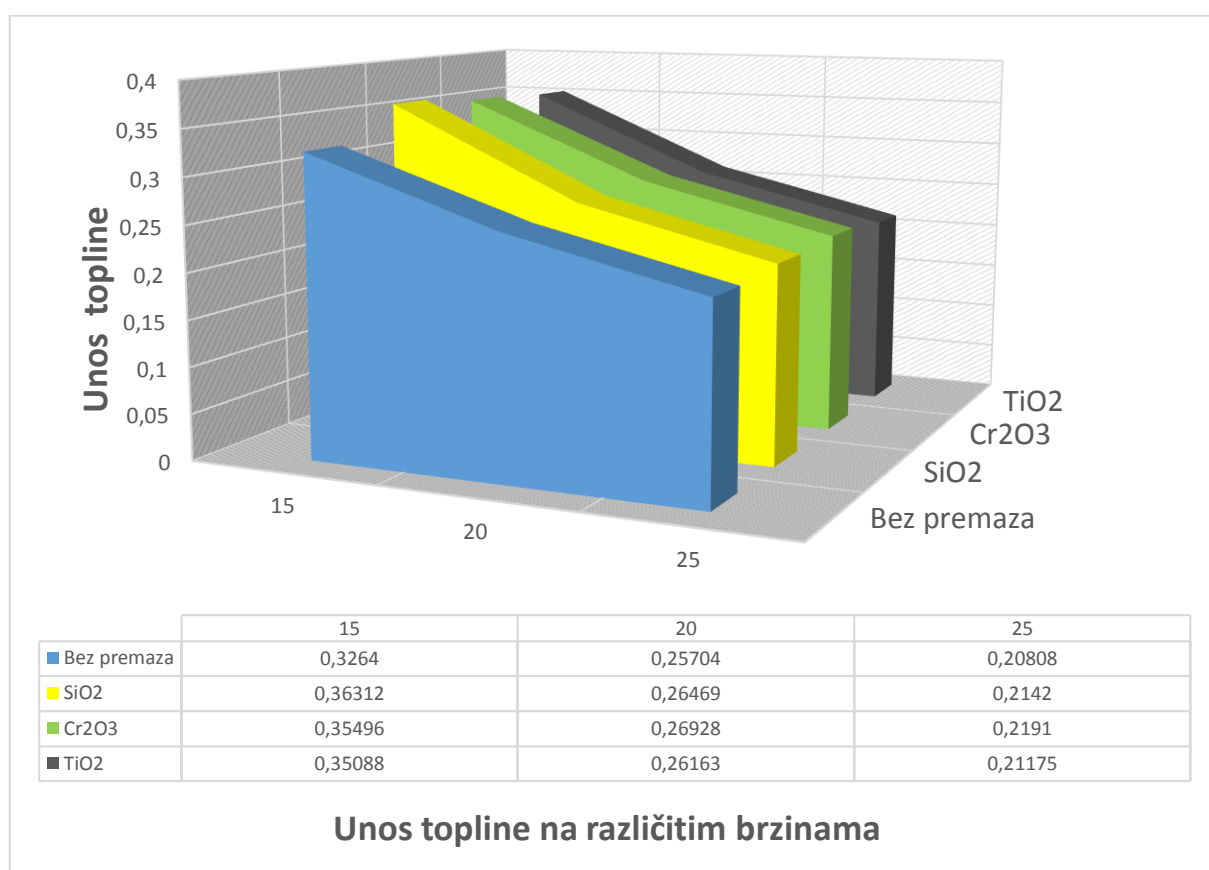
Tablica 19. Parametri automatiziranog plazma navarivanja austenitnih ploča AISI 304 debljine 5 mm s različitim aktivacijskim premazima

Uzorak	Premaz	Vrsta struje i polaritet	Protok zaštitnog plina [l/min]	Protok plazmenog plina [l/min]	Brzina navarivanja [cm/min]	Struja [A]	Napon [V]	Unos topline [kJ/mm]
1	-	DC (-)	10	1	15	85	16	0,3264
2	-	DC (-)	10	1	20	85	16,8	0,25704
3	-	DC (-)	10	1	25	85	17	0,20808
A1	SiO <sub>2</sub>	DC (-)	10	1	15	85	17,8	0,36312
A2	SiO <sub>2</sub>	DC (-)	10	1	20	85	17,3	0,26469
A3	SiO <sub>2</sub>	DC (-)	10	1	25	85	17,5	0,2142
B1	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DC (-)	10	1	15	85	17,4	0,35496
B2	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DC (-)	10	1	20	85	17,6	0,26928
B3	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	DC (-)	10	1	25	85	17,9	0,2191
C1	TiO <sub>2</sub>	DC (-)	10	1	15	85	17,2	0,35088
C2	TiO <sub>2</sub>	DC (-)	10	1	20	85	17,1	0,26163
C3	TiO <sub>2</sub>	DC (-)	10	1	25	85	17,3	0,21175



Slika 36. Prikaz navara svih ispitnih uzoraka

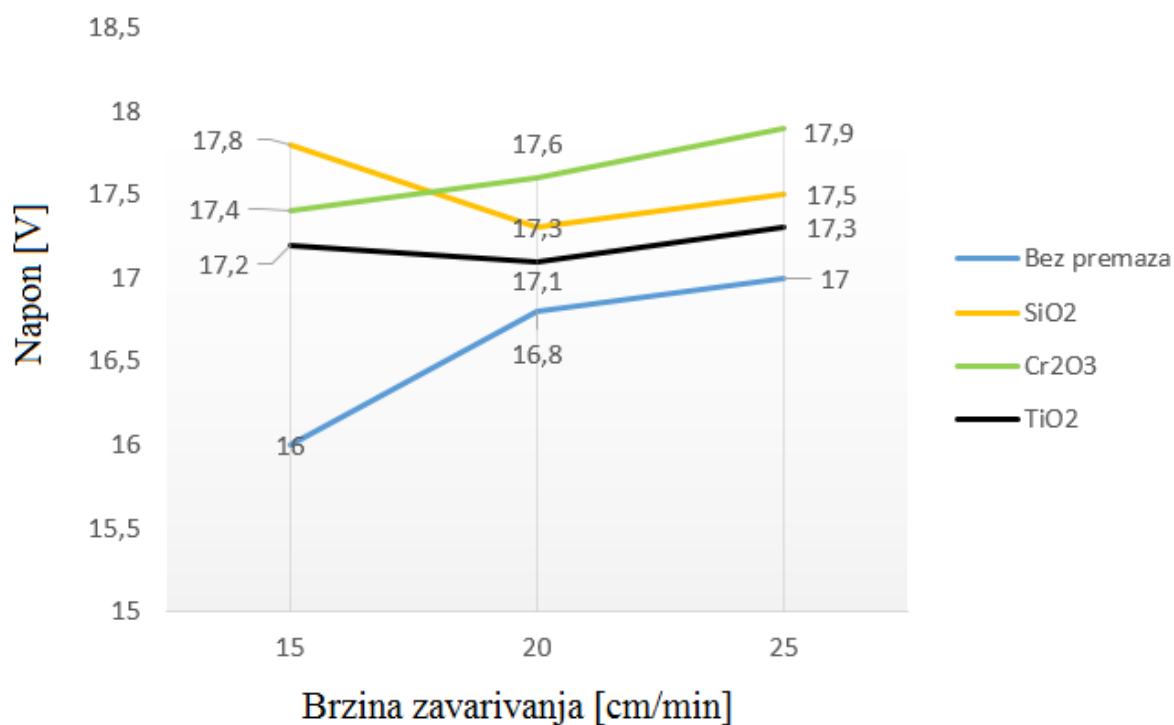
Na slici 36., prikazana su lica i stražnje strane svih navara. Slika prikazuje razliku između uzoraka s aktivacijskim premazom i one bez njega. Iz tablice 19., je vidljivo da je jedini parametar koji je bio variran je brzina navarivanja i napon, s porastom brzine navarivanja padala je i širina navara. Sudeći prema slici jedino kod premaza  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  nije primjećena pojava površinskih oksida, kao što je to jasno izraženo kod uzoraka bez premaza. Vrsta i i debljina oksida ovisi o jačini i trajanju zagrijavanja ali i o vrsti atmosfere u kojoj se odvija zavarivanje. Oksidi nisu poželjni na površini austenitnih čelika, jer zavari kod kojih oksidi nisu uklonjeni imaju slabiju korozijsku otpornost, osobito prema rupičastoj koroziji. Kod premaza  $\text{SiO}_2$  obojenost oksida je vrlo malo izražena. Kod premaza  $\text{TiO}_2$  obojenost oksida je jako izražena, isto kao kod navara bez premaza, u tom slučaju oksidi se uklanjaju mehaničkim, kemijskim ili elektrokemijskim postupcima.



Slika 37. Usporedba unosa topline i brzine navarivanja ovisni o vrsti aktivacijskog premaza

Sa slike 37., se može vidjeti usporedba unosa topline u odnosu na različite brzine navarivanja. Jasno se može vidjeti da je unos topline kod svih premaza bio veći nego kod uzoraka bez premaza. Uzorak s  $\text{SiO}_2$  aktivacijskim premazom ima najveći unos topline za najmanju brzinu navarivanja. Uzorci s premazima  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  imaju također povećan unos topline u odnosu na uzorak bez premaza, no, uspoređujući ta dva,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  pokazuje nešto veću promjenu napona, a time i veću promjenu unosa topline. To se može vidjeti gledajući stražnju stranu navara kod koje uzorak B3 ima izraženiji trag unosa topline od uzorka C3, a oba su navarena pri istoj brzini.

Na slici 38., prikazan je odnos napona i brzine navarivanja ovisno o vrsti aktivacijskog premaza. Svi rezultati mjerenja napona očitani su u trenutku kada se napon ustalio, tj. kada je napon poprimio stalnu veličinu. Naime, napon je tijekom navarivanja varirao u rasponu od 0,1 V do 1,9 V, a najizraženije promjene su bile kod premaza  $\text{SiO}_2$ , gdje je kod uzorka A3 napon bio u rasponu od 16 V do 17,9 V, da bi se na kraju ustalio na 17,5 V.



Slika 38. Prikaz odnosa napona i brzine navarivanja ovisno o vrsti aktivacijskog premaza

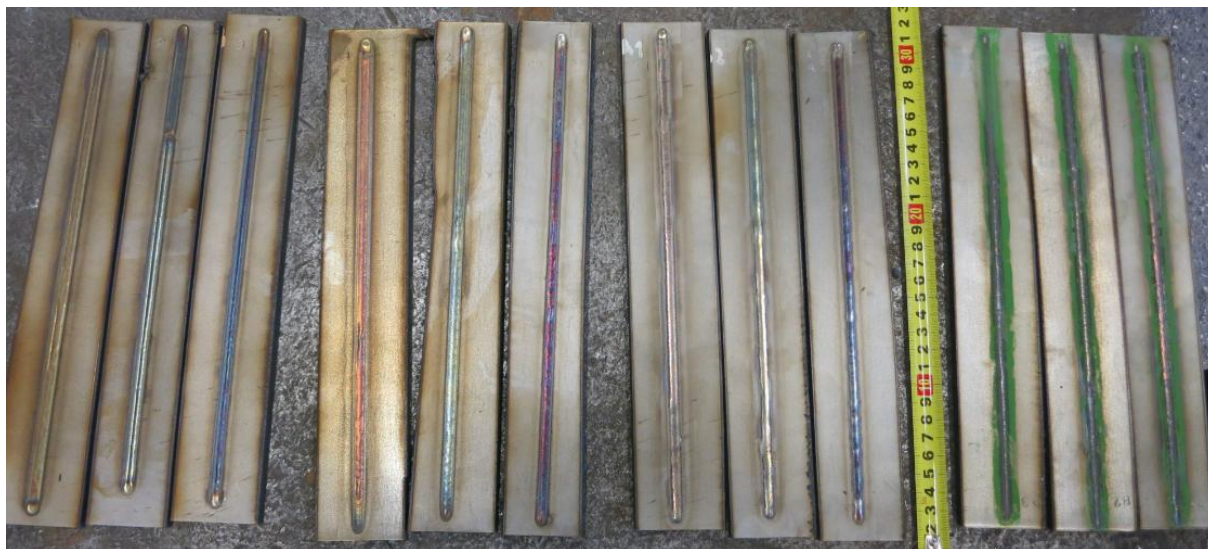
Na slici 38., prikazani su rezultati mjerenja napona navarivanja u odnosu na različite brzine navarivanja ispitnih uzoraka. Ionizacijski potencijal električnog luka kod svih aktivacijskih premaza je bio povišen u odnosu na uzorak bez premaza, što znači da je napon navarivanja kod svih aktivacijskih premaza bio povišen u odnosu na uzorak bez premaza. Uspoređujući ponašanje napona na premazanim pločama kod plazma navarivanja može se primjetiti da jedino premaz  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ima pravilnu blago rastuću vrijednost napona s porastom brzine. Kod uzoraka A3 i C3 je primjećen malo viši napon nego kod navarivanja uzoraka s višom brzinom zavarivanja (A2 i C2). Prateći rezultate očekivan je bio i daljni pad napona kod uzoraka A3 i C3. Razlog malo povećanog napona kod tih uzoraka može biti u velikom unosu topline kod navarivanja trećeg prolaza i promjeni geometrije ploče, naime, tijekom navarivanja dolazi do deformacija ploče što utječe na stalan razmak između pištolja i ploče. U tom slučaju potrebno je upotrijebiti stezne naprave kako bi se smanjio utjecaj deformacije uslijed povećanog unosa topline. Zaključno, radi se vrlo maloj promjeni napona i to se može zanemariti jer puno veći utjecaj na širinu i penetraciju navara ima brzina navarivanja.

### 5.3 Geometrijske značajke makroizbrusaka navara

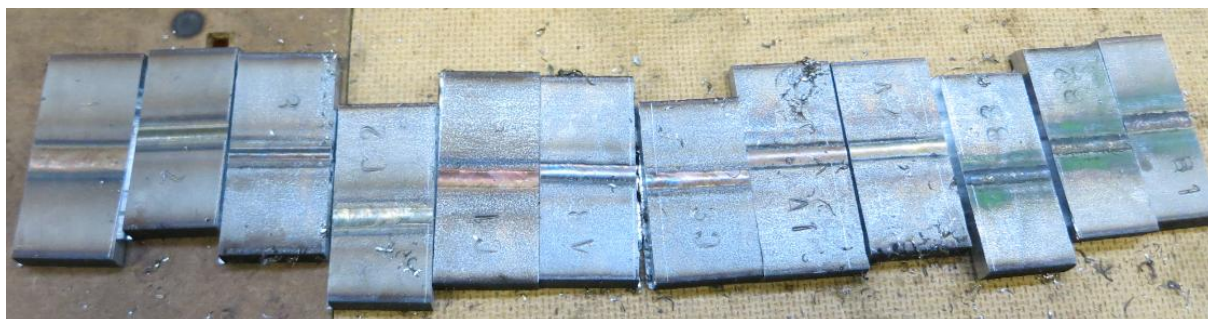
Za analizu svakog pojedinog navara i utjecaj aktivacijskog premaza na geometriju spoja potrebno je izraditi makroizbruske. Za pripremu uzoraka za analizu potrebno je napraviti sljedeće:

1. Na plazma rezačici iz ploča izrezati manje ploče s navarima iz kojih će kasnije biti izrezani makroizbrusci. Izrezane ploče prikazane su na slici 39.
2. Na tračnoj pili izrezati uzorke 5 x 25 x 50 mm za makrostrukturno ispitivanje. Uzorci su izuzeti iz onog dijela ploče gdje su očitane vrijednosti napona, tj. na dijelu ploče gdje je napon bio stalan. Izrezani uzorci prikazani su na slici 40.
3. Očistiti površinu makroizbrusaka od srhova na rotirajućoj ploči hrapavosti P80, P160, P280, P320.
4. Strojno polirati uzorke nizom brusnih papira sve do P4000.
5. Elektrokemijsko nagrizanje u 10% oksalnoj kiselini –  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  u vremenskom intervalu od 3 minute, pri naponu od 14 V i struji 5 A. Nakon vađenja iz kiseline, reakciju je potrebno prekinuti ispiranjem u toploj vodi.
6. Izvršiti vizualnu kontrolu na makroizbruscima.

Na makroizbruscima nije bilo nikakvih znakova pora, uključaka ili bilo kakvih znakova nepravilnosti.



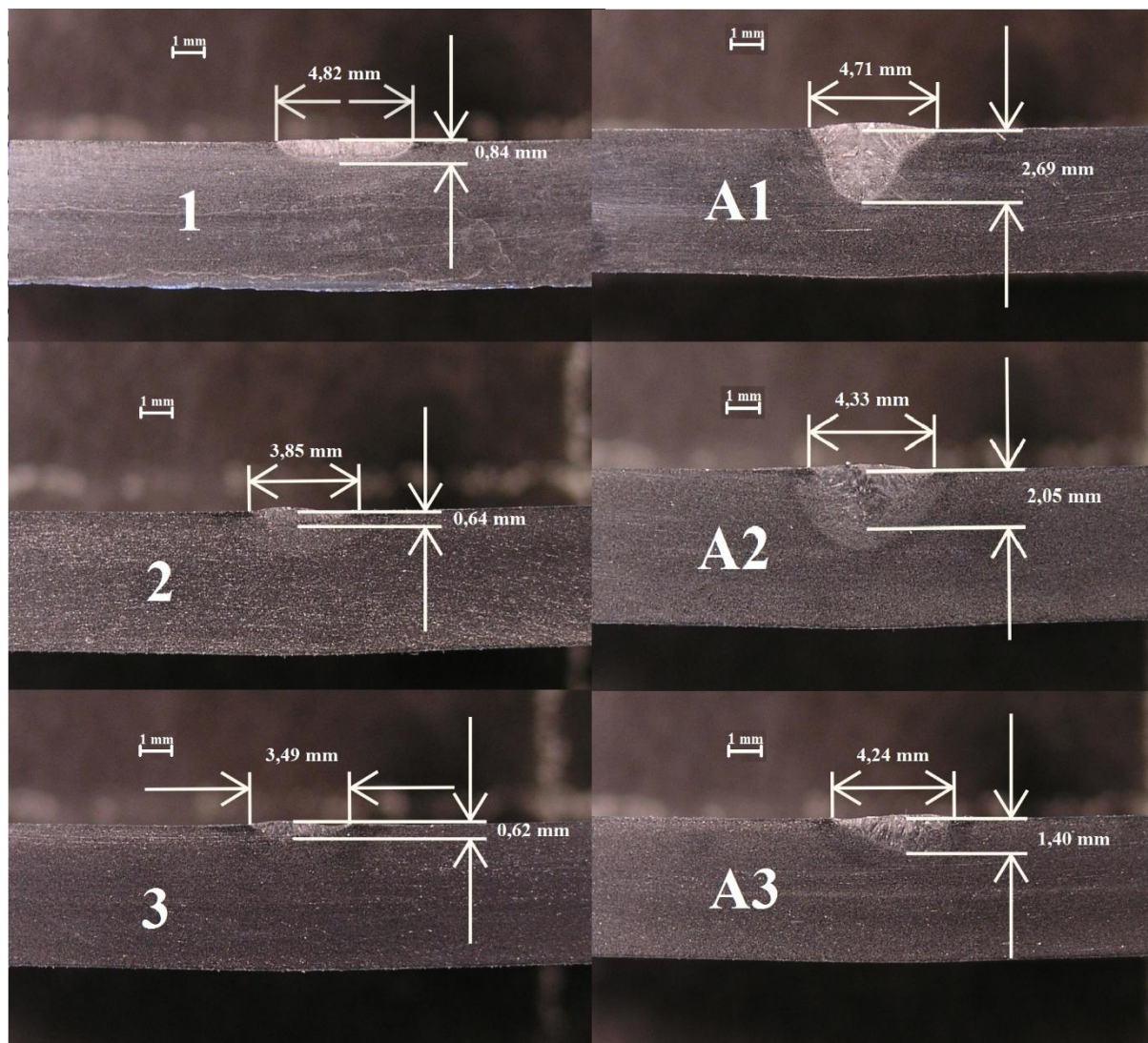
*Slika 39.* Izrezane ploče na plazma rezačici



*Slika 40.* Izrezani uzorci na tračnoj pili

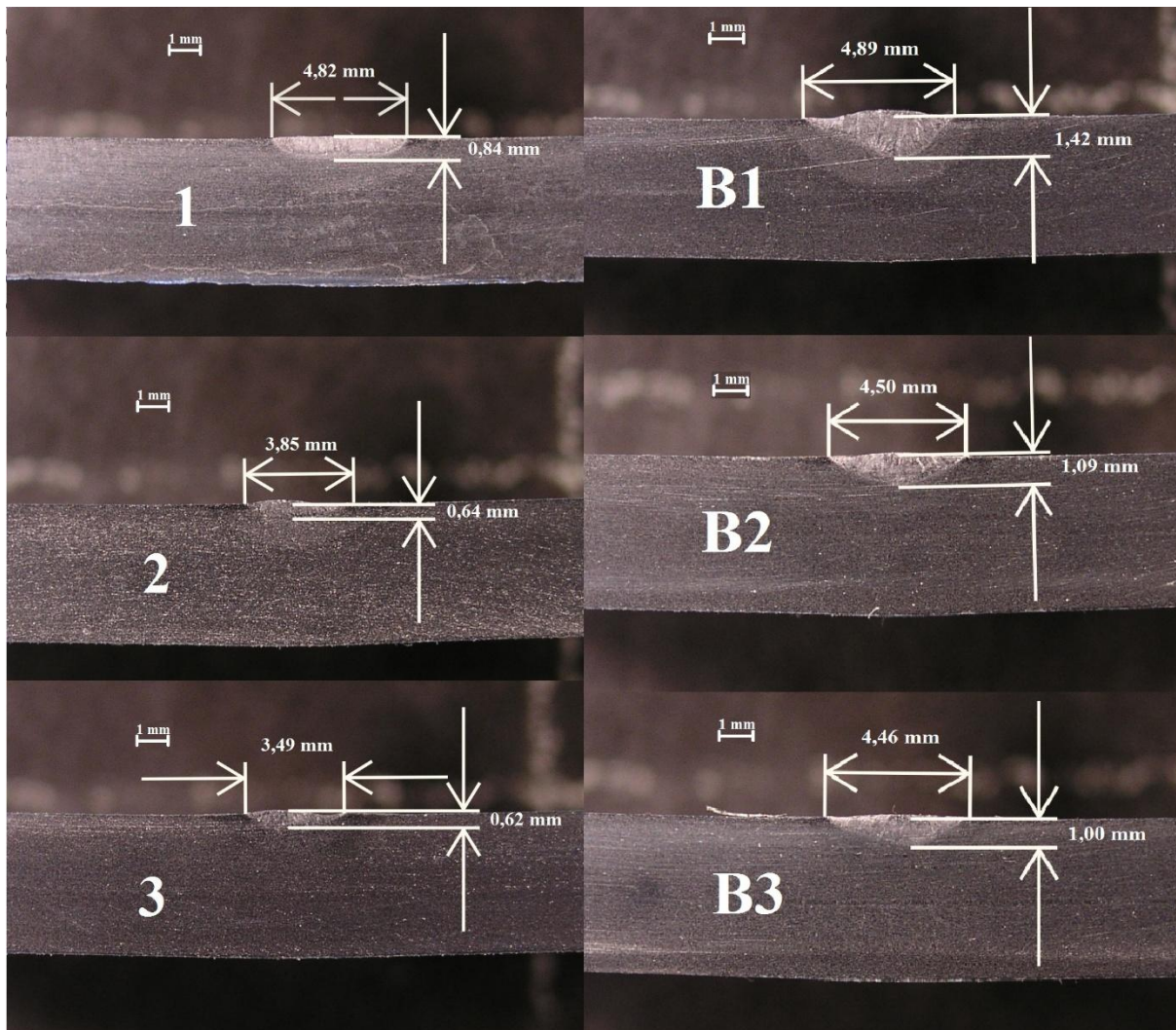
Nakon nagrizanja postala su vidljiva područja zahvaćena električnim lukom, tj. područje navara. U slijedećih nekoliko slika prikazane su usporedbe navara bez premaza i one s aktivacijskim premazom. Uzorci 1, 2 i 3 izvedeni su bez premaza i u odnosu na njih praćena je promjena geometrije zavara svih ostalih navara. Kod uzoraka bez premaza primjećena je manja penetracija nego kod uzoraka s aktivacijskim premazom. Manja penetracija poskupljuje proizvodnju, što znači da bi kod zavarivanja bez aktivacijskog premaza bilo potrebno zavarivati u više prolaza nego što je to slučaj kod premazanih ploča.





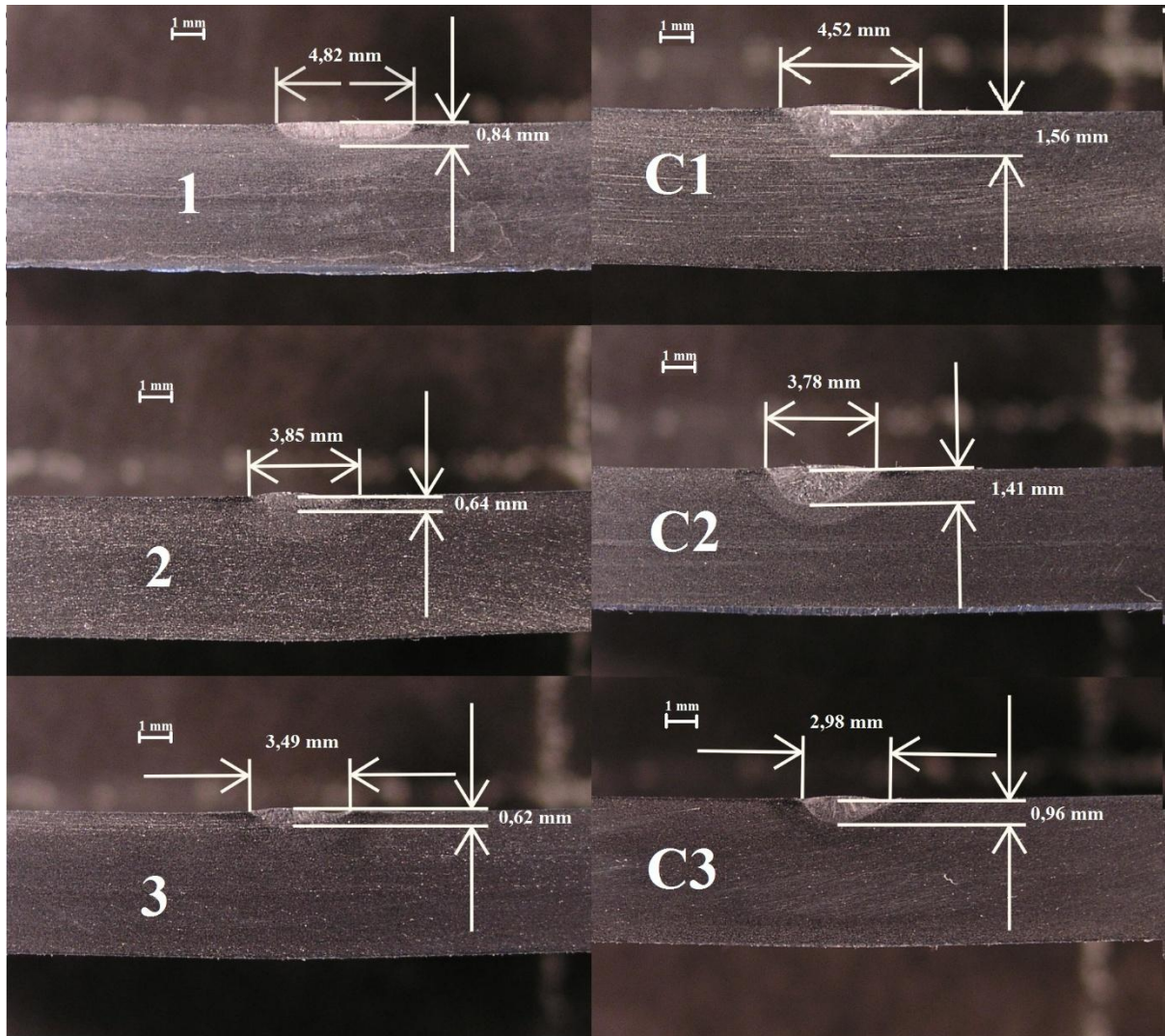
Slika 41. Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (1, 2 i 3) i s aktivacijskim premazom  $\text{SiO}_2$  (A1, A2 i A3)

Uzorci 1, 2 i 3 izvedeni su bez aktivacijskog premaza te se može vidjeti da je penetracija vrlo mala usporedno s uzorcima s aktivacijskim premazom. Uzorak 1 ima najveću širinu navara od 4,82 mm. Kod uzoraka s aktivacijskim premazom primjećena je veća širina navara nego je to kod uzoraka bez aktivacijskog premaza, jedino uzorak A1 ima manju širinu navara, ali zato se može uočiti drastično veća penetracija. Uzorak A1 ima blago nadvišenje navara pri najmanjoj brzini, isto se može primjetiti kako se širina navara s dubinom navara naglo smanjuje. Na istom uzorku A1 iz oblika metala navara može se također vidjeti posljedica djelovanja centripetalnog Marangonijevog efekta na oblik penetracije navara, dok se na uzorku 1 može vidjeti djelovanje centrifugalnog Marangonijevog efekta. Premaz s aktivacijskom komponentom  $\text{SiO}_2$  bilježi najveće vrijednosti penetracije u odnosu na ostale premaze.



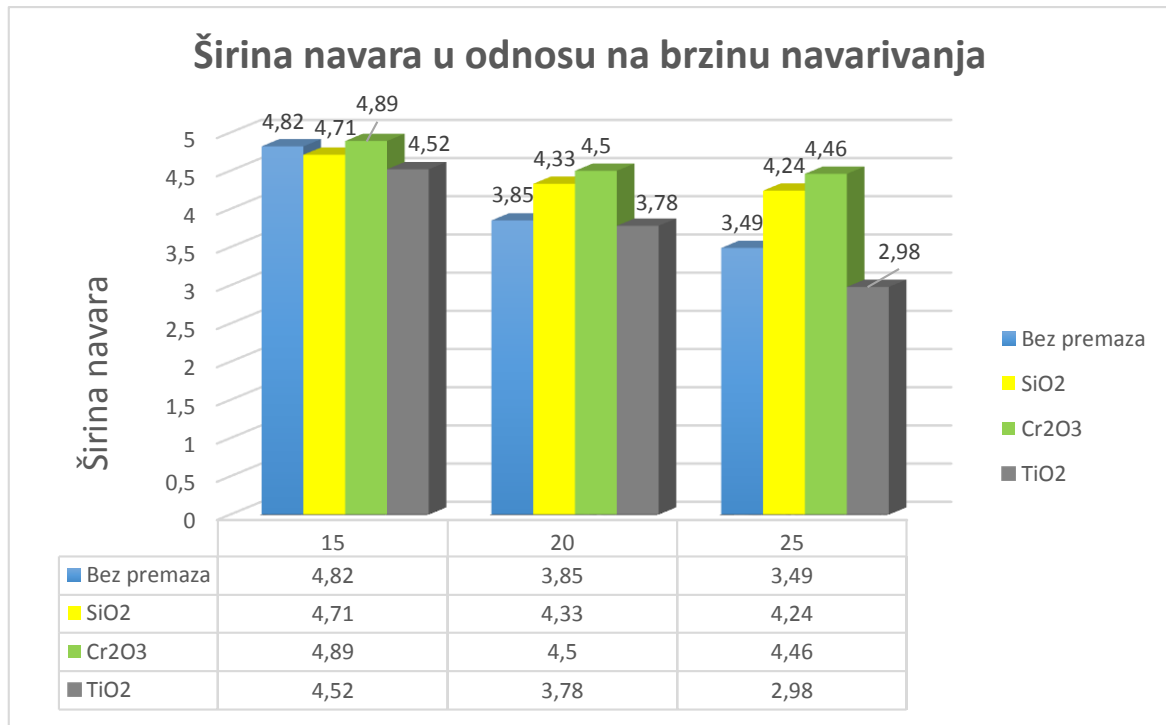
Slika 42. Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (1,2 i 3) i s aktivacijskim premazom  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (B1, B2 i B3)

Kod uzoraka s  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  aktivacijskim premazom širina i penetracija navara je znatno veća u odnosu na uzorke bez premaza. Na uzorku B1 se može primjetiti blago nadvišenje. Uzorci s aktivacijskim premazom  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  jedini bilježe blagi rast napona s povećanjem brzine navarivanja. Također, s porastom brzine navarivanja penetracija i širina navara kod svih uzoraka postaje veća. Profili navara su pravilni i simetrični.

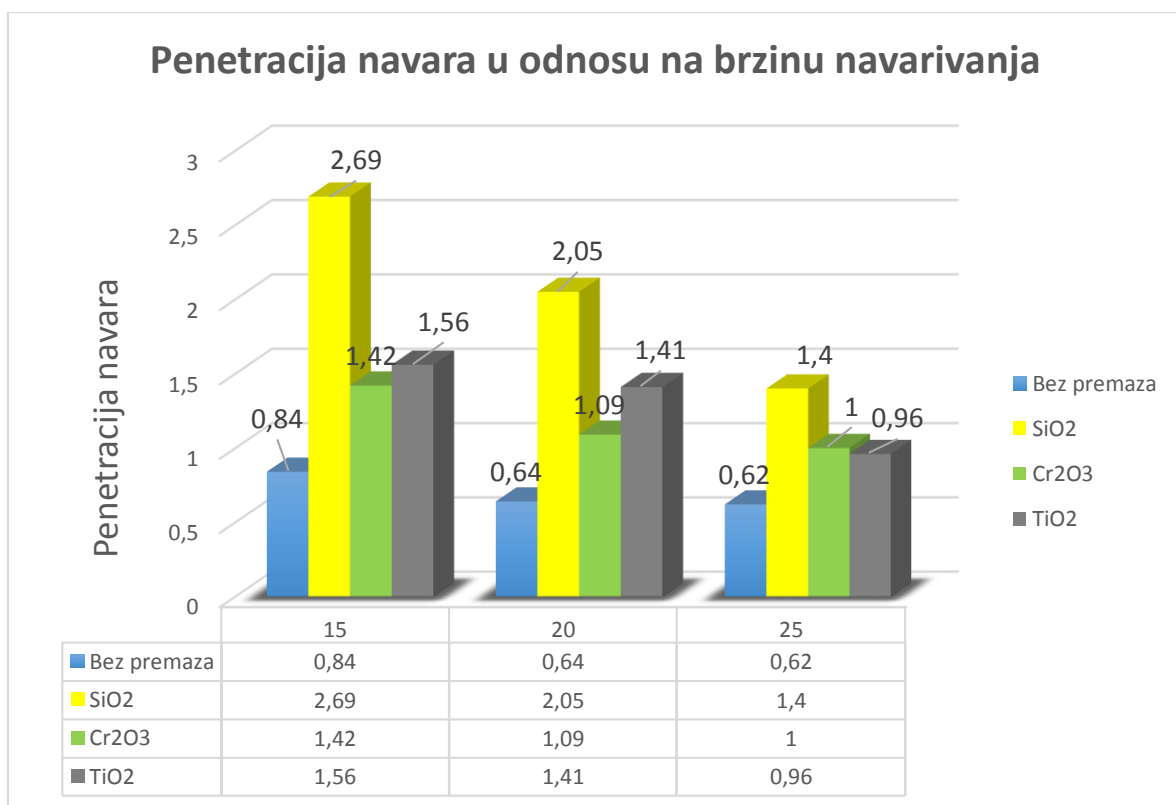


Slika 43. Usporedba makrouzoraka navara bez premaza (1,2 i 3) i s aktivacijskim premazom  $\text{TiO}_2$  (C1, C2 i C3)

Kod uzoraka s  $\text{TiO}_2$  aktivacijskim premazom dubina penetracije je veća u odnosu na uzorke bez premaza. Dubina penetracije je veća u odnosu na uzorke s  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  premazom, ali manja u odnosu na uzorke s  $\text{SiO}_2$ . No, kod ovog premaza zanimljiva je činjenica da su svi navari uži u odnosu na navare bez premaza. Posljedica toga može biti djelovanje aktivacijske komponente koje ima za posljedicu suženje jezgre električnog luka. Nadvišenja navara kod ovog tipa aktivacijskog premaza nema, a profili navara su pravilini i simetrični.



Slika 44. Grafički prikaz širine zavara u odnosu na brzinu navarivanja



Slika 45. Grafički prikaz penetracije navara u odnosu na brzinu navarivanja

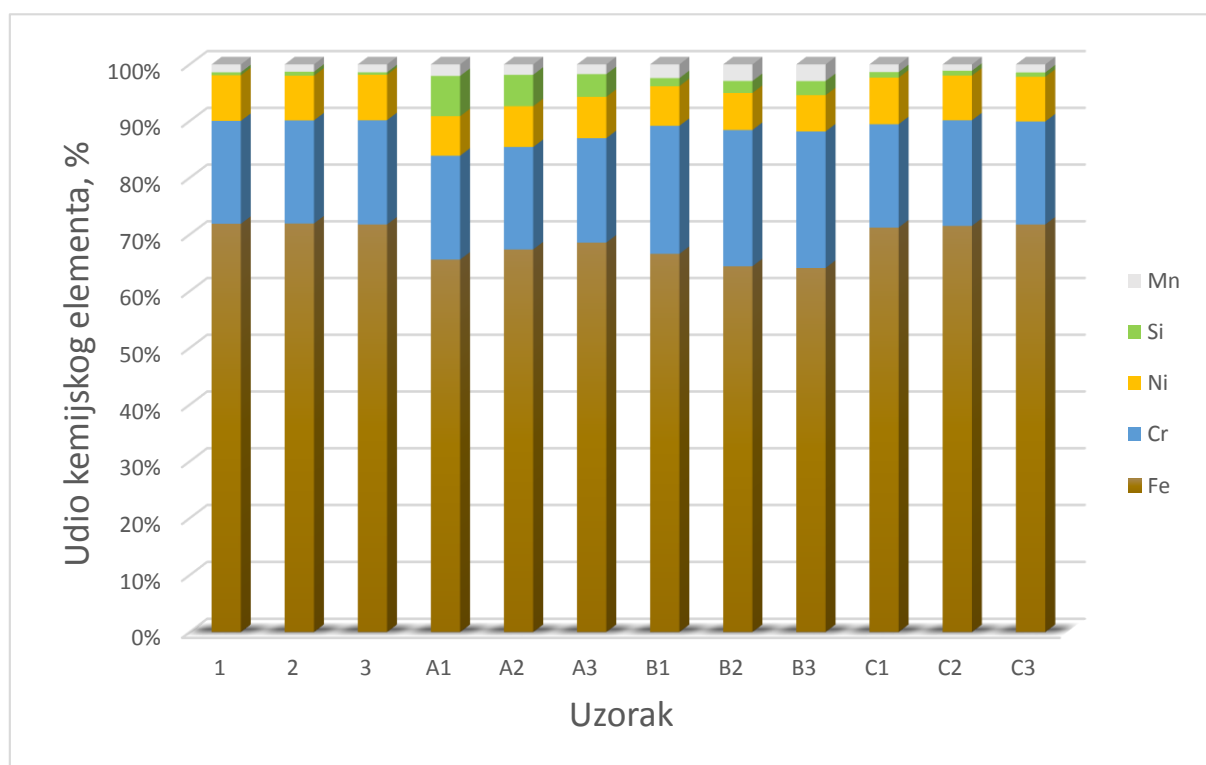
Iz analize makroizbrusaka izrađeni su grafički prikazi na slikama 44 i 45. Najveću širinu navara imaju uzorci sa aktivacijski premazom na bazi  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , ali zato imaju manju dubinu penetracije kod brzine 15 cm/min i 20 cm/min od ostalih uzoraka sa aktivacijskim premazom. Kod brzine 25 cm/min uzorak B3 ima penetraciju navara 1 mm te je svega 0,04 mm veći od uzorka C3. Međutim, to nije velika razlika u penetraciji navara i zato se uzorci sa aktivacijskim premazom  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  mogu svrstati na zadnje mjesto po dubini penetracije navara. Najuzi navar kod sva tri uzorka imaju uzorci s aktivacijskim premazom na bazi  $\text{TiO}_2$ , dok se po dubini penetracije mogu svrstati na drugo mjesto. Kod uzoraka sa  $\text{SiO}_2$  aktivacijskim premazom već je i ranije u analizi makroizbrusaka uočena drastično veća penetracija u odnosu na ostale uzorke s aktivacijskim premazom, a to se može pokrijepiti i slikom 45. Po širini navara uzorci sa  $\text{SiO}_2$  aktivacijskim premazom nalaze se u sredini između druge dvije komponente.

#### 5.4 Rezultati određivanja kemijskog sastava metala navara

U tablici 20., i na slici 46., prikazani su rezultati kemijske analize sastava metala navara.

Tablica 20. Rezultati analize kemijskog sastava metala navara

Uzorak	Aktivacijska komponenta	Udio kemijskog elementa, %						
		Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Ti	
<b>1</b>	bez premaza	0,51	18,01	8	1,38	71,39	-	
<b>2</b>		0,69	18,03	7,83	1,29	71,43	-	
<b>3</b>		0,43	18,24	7,96	1,38	71,25	-	
<b>A1</b>	$\text{SiO}_2$	7,05	18,18	6,90	2,02	65,09	-	
<b>A2</b>		5,51	17,94	7,13	1,82	66,89	-	
<b>A3</b>		3,97	18,25	7,23	1,71	68,03	-	
<b>B1</b>	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	1,41	22,36	6,92	2,40	65,97	-	
<b>B2</b>		2,09	23,79	6,46	2,90	63,77	-	
<b>B3</b>		2,47	23,88	6,34	2,92	63,61	-	
<b>C1</b>	$\text{TiO}_2$	0,96	18,09	8,16	1,35	70,73	-	
<b>C2</b>		0,83	18,46	7,82	1,12	70,92	0,15	
<b>C3</b>		0,77	18,03	7,81	1,40	71,23	-	
<b>Ograničenja udjela kemijskih elemenata čelika AISI 304</b>		Min.	-	18	8	-	-	-
		Max.	1	20	10,5	2	-	-



Slika 46. Dijagram promjene masenih udjela kemijskih elemenata u metalu zavora ispitivanih uzoraka

Slika 46., prikazuje dijagram udjela kemijskih elemenata prema podacima iz tablice 20. Iz dijagrama i tablice se može primjetiti da neki premazi ne utječu puno na kemijski sastav. Takav je  $\text{TiO}_2$  kod kojeg su svi kemijski elementi unutar dozvoljenih granica za čelik AISI 304. Udio kroma (Cr) je najveći kod premaza s aktivacijskom komponentom  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , gdje kod sva tri uzorka prelazi maksimalno ograničenje od 20%. Povećan udio kroma ne šteti mikrostrukturi jer povećava otpornost koroziji, no, problem se javlja kod uzorka B2 i B3 gdje je udio željeza (Fe) vrlo nizak, ispod minimalne vrijednosti za čelik AISI 304. Udio kroma (Cr) najmanji je kod uzorka A2 gdje iznosi 17,94%. Dobiveni rezultati pokazuju da jedino uzorak C1 ulazi u dozvoljeni raspon udjela nikla (Ni) koji je od 8 % do 10,5 %, a na uzorku C1 je izmjereno 8,16 % Ni. Međutim, ne mora značiti da ostali uzorci nisu dobre kvalitete, tj. da ne zadovoljavaju kvalitetu AISI 304. Svaki proizvođač čelika određuje svoje raspone udjela kemijskih elemenata, ali svakako veći udio nikla je poželjan, jer on povisuje žilavost i smanjuje toplinsku rastezljivost čelika [32]. Udio mangana (Mn) je povećan kod uzorka sa  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  aktivacijskom komponentom i kod uzorka A1 gdje prelazi maksimalno ograničenje od 2 %. U uzorcima gdje se koristio aktivacijski premaz s komponentom  $\text{SiO}_2$  detektiran je povećan udio silicija (Si), također se sa slike 46., može primjetiti da udio silicija pada s povećanjem brzine. Kod uzorka B2 i B3

primjećen je također povećani udio silicija, no, kod njih udio silicija raste s povećanjem brzine. Silicij je dobar dezoksidator te povišuje čvrstoću, otpornost na trošenje i granicu elastičnosti [32]. Udio titana je detektiran i uočen samo u uzorku C2.

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog eksperimentalnog rada bio je utvrditi utjecaj aktivacijskih premaza pri plazma navarivanju austenitnog čelika na geometriju spoja i kemijski sastav navara. Geometrijskom analizom makroizbrusaka te kemijskom analizom dobivenih navara utvrdio se utjecaj pojedinih komponenata aktivacijskog premaza na svojstva navara i tehnološku primjenu u praksi. U istraživanju su ispitani utjecaji 3 različite aktivacijske komponente ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{TiO}_2$ ). Zavarivanje je izvedeno pomoću uređaja za automatizirano zavarivanje kako bi se što više smanjio ljudski utjecaj na dobiveni rezultat te kako bi se utvrdila moguća primjena aktivacijskog premaza za automatizirano zavarivanje austenitnih čelika.

Analizom dobivenih rezultata utvrđeno je da svi aktivacijski premazi pozitivno utječu na tehnologiju navarivanja kao i na sam navar. Vizualnom kontrolom lica navara utvrđeno je da premazi sa aktivacijskom komponentom  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  imaju najmanju obojenost oksida u području navara.

Analizom geometrijskih karakteristika navara utvrđeno je da svaki aktivacijski premaz pozitivno utječe na sam navar povećavajući penetraciju. Kod aktivacijskog premaza  $\text{SiO}_2$  uočeno je da daje najveći unos topline što za posljedicu ima najdublju penetraciju navara. Kod  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  premaza izmjerena penetracija je najmanja između svih premaza. Napon je tijekom navarivanja bio stabilan te jedini ima blago rastuću vrijednost napona pri promjeni brzine navarivanja. Ovaj premaz je uzrokovao najšire navare. Kod  $\text{TiO}_2$  premaza utvrđena je najmanja širina navara kod sva tri uzorka, ali vrijednosti penetracije su veće nego kod uzorka  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Problem kod  $\text{TiO}_2$  premaza su grubozrnate čestice koje su slabo dispergirale u emulziji s alkoholom, pa je dio čestica otpuhan u struji zaštitnog plina nakon hlapljenja alkohola. Ovaj problem se može riješiti primjenom finijih čestica ili primjenom vodenog stakla.

Analizom kemijskog sastava se može zaključiti da  $\text{TiO}_2$  i  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  premazi ne utječu značajno na kemijski sastav metala navara. Kod  $\text{TiO}_2$  premaza sve vrijednosti su unutar maksimalnih ograničenja za čelik AISI 304. Kod premaza  $\text{SiO}_2$  utvrđen je povećan udio silicija (Si). Prekoračenje maksimalnih vrijednosti udjela kemijskih elemenata za zadani čelik ne mora nužno značiti da će se smanjiti mehanička svojstva čelika.

U konačnici, može se zaključiti da je primjena aktivacijskih premaza za automatizirano zavarivanje austenitnih čelika moguća, te da je moguće postići uštede. Najveće uštede se mogu postići kod smanjenja troškova same tehnologije zavarivanja, time se smatra smanjenje



ljudskog utjecaja automatiziranjem postupka. Upotrebom aktivacijskih premaza moguće je zavarivati većim brzinama uz dovoljno veliku penetraciju. To rezultira povećanjem produktivnosti procesa. Plazma postupak se razvija za masovnu industriju gdje nalazi svoju najveću primjenu i isplativost, a upotrebom aktivacijskih premaza moguće je smanjiti utjecaj visoke cijene opreme za plazma zavarivanje. Daljnim istraživanjem moguće je otvoriti neka nova pitanja kao primjenu različitih mješavina aktivacijskih komponenti i njihov utjecaj na sastav navara kao i na tehnologiju zavarivanja plazma postupkom.

Moguće je zaključiti da se upotrebom aktivacijskih premaza pri plazma zavarivanju austenitnih čelika može značajno poboljšati produktivnost i isplativost postupka.

## 7. POPIS LITERATURE

- [1] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I.; *Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje*, 4. seminar Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.
- [2] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*, Slavonski Brod 1998.
- [3] Juraga, I., Šimunović, V.: *Utjecaj obrade površine zavarenih spojeva od nehrđajućih čelika na povećanje korozivne postojanosti*, Zbornik radova međunarodnog savjetovanja: Ekonomski i kvalitativni aspekti visokoučinskih postupaka zavarivanja, Slavonski brod,
- [4] HRN EN 10088-1:2007 ; *Nehrđajući čelici 1.dio : Popis nehrđajućih čelika*
- [5] Weman K.; *Welding processes handbook*, CRC Press, Cambridge, England, 2003.  
Dostupno na: [www.opendrive.com/files/.../Welding%20processes%20handbook.pdf](http://www.opendrive.com/files/.../Welding%20processes%20handbook.pdf)  
(25.3.2015)
- [6] European federation for welding; *Technical sheets-plasma welding*, Instituto superior tecnico, 2008. Dostupno na: [http://www.ewf.be/media/documentosdocs/doc\\_31\\_plasma\\_welding\\_-\\_processos.pdf](http://www.ewf.be/media/documentosdocs/doc_31_plasma_welding_-_processos.pdf) (26.3.2015)
- [7]..... : [www.sttiworkerunion.weebly.com/uploads/.../08.paw.pps](http://www.sttiworkerunion.weebly.com/uploads/.../08.paw.pps) (2.4.2015)
- [8] Garašić I., Kožuh Z., Kralj S.; *Specifičnosti i primjena plazma zavarivanja*, SBZ 2011, Slavonski Brod, 2011.
- [9] ..... : [http://eskola.hfd.hr/proc\\_za\\_vas/proc-21/pus.htm](http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-21/pus.htm) (6.4.2015)
- [10] ..... : <http://www.gordonengland.co.uk/pft.htm> (6.4.2015)
- [11] ..... : <http://eskola.chem.pmf.hr/odgovori/odgovor.php3?sif=1370> (6.4.2015)
- [12] Garašić I.; *Plazma zavarivanje, predavanje iz predmeta „Postupci zavarivanja“*  
Dostupno na : [http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/?action=view&site\\_id=90&id=2072](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=90&id=2072)  
(7.4.2015)
- [13] ..... : <http://www.iwindia.com/pdf/XII-1972-09.pdf> (9.4.2015)
- [14] ..... : [http://www.processwelding.com/data\\_sheet.pdf/pwsPowderFeed.pdf](http://www.processwelding.com/data_sheet.pdf/pwsPowderFeed.pdf) (9.4.2015)
- [15] ..... : <http://www4.hcmut.edu.vn/~dantn/WT/WT1-c4.pdf> (9.4.2015)
- [16] ..... : [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma\\_arc\\_welding](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_arc_welding) (9.4.2015)

- [17] EWM Welding Dictionary; The Plasma Primer, 2nd edition, EWM Hightec Welding, 2009. Dostupno na: <https://www.ewm-group.com/...ewm-welding-dictionary/download.html> (10.4.2015)
- [18] ..... : <http://www.weldguru.com/plasma-welding.html> (11.4.2015)
- [19] Kralj S., Andrić Š.; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilišna tiskara, Zagreb, 1992.
- [20] ..... : [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv\\_str.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv_str.html) (13.4.2015)
- [21] DIN EN 26848; Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding and for plasma cutting and welding, 1991.
- [22] ...: [http://www.messergroup.com/mostar/O\\_nama/Za\\_titni\\_plinovi\\_za\\_zavarivanje\\_.pdf](http://www.messergroup.com/mostar/O_nama/Za_titni_plinovi_za_zavarivanje_.pdf) (20.4.2015)
- [23] ..... : <http://www.pro-fusiononline.com/welding/plasma.htm> (20.4.2015)
- [24]..... : <http://www.arcraftplasma.com/welding/plasma-welding.htm> (21.4.2015)
- [25] ..... : [http://www.e-mmi.org/upload/pdf/mmi\\_16\\_5\\_819.pdf](http://www.e-mmi.org/upload/pdf/mmi_16_5_819.pdf) (25.5.2015)
- [26] Ruckert, Guillaume; Perry, Nicolas; Sire, Stephane; Marya, Surendar: *Enhanced Weld Penetrations In GTA Welding with Activating Fluxes Case studies: Plain Carbon & Stainless Steels, Titanium and Aluminum*, THERMEC 2013, United States., pp-202, 2013.
- [27] Muthukumaran, Vasudevan; Nadu, Tamil; Bhaduri, Arun Kumar: *Penetration enhancing Flux formulation for Tungsten Inert Gas (Tig) Welding of Austenitic Stainless Steel and its Application*, United States Patent, Patent No.: US 8,097,826 B2, Jan. 17, 2012.
- [28] Huang, H. Y.; Shyu, S. W.; K. H. Tseng, K. H.; Chou, C. P.: *Evaluation of TIG flux welding on the characteristics of stainless steel*, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, No. 5, 2005.
- [29] Babić N.; *Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri robotiziranom A-TIG navarivanju čelika AISI 304*, Zagreb, 2015.
- [30] ..... : <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-investigation-into-arc-constriction-by-active-fluxes-for-tig-a-tig-welding-2000/> (29.6.2015)
- [31] Čolić L.; *Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom*, Zagreb, 2015. 2001.

[32] ..... : [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1354629739-0-ssnc\\_7i8\\_pred\\_tekst.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf)