

# Plazma zavarivanje nehrđajućih čelika

---

**Betlehem, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:709419>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 327/PS/2020**

## **Plazma zavarivanje nehrđajućih čelika**

**Ivan Betlehem, 0035206563**

Varaždin, rujan 2020. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 327/PS/2020

## Plazma zavarivanje nehrđajućih čelika

**Student**

Ivan Betlehem, 0035206563

**Mentor**

doc. dr. sc. Matija Bušić

Varaždin, rujan 2020. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Ivan Betlehem

MATIČNI BROJ 0035206563

DATUM 18.09.2020.

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Plazma zavarivanje nehrđajućih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Plasma welding of stainless steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva
2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član
3. Marko Horvat dipl. ing., član
4. doc.dr.sc. Zlatko Botak, zamjenski član
5. \_\_\_\_\_

## Zadatak završnog rada

BROJ 327/PS/2020

OPIS

U završnom radu potrebno je na temelju literaturnih podataka proučiti tehnologiju plazma zavarivanja. Potrebno je opisati izvore struje i opremu koja se koristi za plazma zavarivanje. Opisati parametre i specifičnosti plazma zavarivanja. Navesti sve varijante rada uređaja i načine plazma zavarivanja. U nastavku je potrebno opisati nehrđajuće čelike te definirati njihovu prikladnost za plazma zavarivanje.

U eksperimentalnome dijelu rada na odabranom primjeru potrebno je opisati šavno zavarivanje tankostijenih cijevi iz nehrđajućih čelika. Opisati opremu koja se koristi za zavarivanje i kontrolu pri zavarivanju. Navesti parametre pri zavarivanju i zaštitne plinove koji se koriste. Opisati toplinsku obradu nakon zavarivanja i kontrolu kvalitete proizvoda, posebno otpornosti na koroziju. U zaključku da ti svoje mišljenje o prikladnosti korištene tehnologije, prednostima i nedostacima za proizvodnju šavno zavarenih cijevi iz nehrđajućih čelika.

ZADATAK URUČEN

21. 09. 2020.



M. Bušić

## **Predgovor**

Zahvaljujem se svome mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na mentorstvo i pruženoj stručnoj pomoći tijekom pisanja završnog rada.

Zahvaljujem se tvrtki Oprema d.d., posebno gospodinu Arambašiću na ustupljenim dodatnim materijalima bez kojih izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Posebna zahvala roditeljima, sestri, djevojci te ostaloj obitelji na pruženoj potpori i strpljenju tijekom studiranja.

## Sažetak

U ovome radu obrađena je tema plazma zavarivanje nehrđajućih čelika. Na početku rada napravljen je uvod o razvoju nehrđajućih čelika te je navedena njihova podjela. U njihovoj podjeli navedene su karakteristike pojedinih nehrđajućih čelika. U nastavku je opisan postupak plazma zavarivanja, oprema za plazma zavarivanje, režimi rada plazma zavarivanja i specifičnosti plazma zavarivanja. U eksperimentalnome dijelu rada opisan je postupak plazma zavarivanja cijevi odnosno, opisano je koji se nehrđajući čelik koristi, koja oprema za plazma zavarivanje, parametri zavarivanja, deformacija i toplinska obrada cijevi. Na kraju rada opisana je kontrola kvalitete zavara i cijevi.

Ključne riječi: nehrđajući čelik, zavarivanje, plazma zavarivanje

## **Summary**

This paper describes plasma arc welding of stainless steel. Development of stainless steels and their classification, which also includes the characteristics of individual stainless steels, are described in the introduced. The following describes the plasma arc welding process, the plasma arc welding equipment, the modes of operation of the plasma welding and the specifics of the plasma welding. Experimental part of the paper describes the plasma arc welding process of the pipe and describes which stainless steel is used, which plasma arc welding equipment, welding parameters, deformation and heat treatment of the pipe. The quality control of welds and pipes are described at the end of the paper.

Key words: stainless steel, welding, plasma arc welding



## Popis korištenih oznaka i kratica

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
$d$	promjer cijevi	mm
$I$	jakost struje	A
$Q$	unos topline	kJ/mm
$R_m$	vlačna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>
$U$	napon	V
$v_z$	brzina zavarivanja	mm/min

Kratica	Opis kratice
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	aluminij
Ar	argon
C	ugljik
Cr	krom
Cu	bakar
DC	Direct current, istosmjerna struja
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBW	Electron beam welding
EN	Europska norma
FCC	Face Centered Cubic, Plošno centrirana kubna rešetka
H	vodik
HNO <sub>3</sub>	dušična kiselina
IKK	interkristalna korozija
ISO	International Organization for Standardization
k	koeficijent toplinske iskoristivosti zavarivanja
LBW	Laser beam welding
MIG	Metal Inert Gas, elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina
Mn	mangan
Mo	molibden

N	dušik
Nb	niobij
Ni	nikal
P	fosfor
PAW	Plasma arc welding, plazma zavarivanje
PPAW	Powder plasma arc welding
S	sumpor
Se	selenij
Si	silicij
Ta	tantal
Ti	titan
TIG	Tungsten inert gas, zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina
VF	visoka frekvencija
ZUT	zona utjecaja topline

# Sadržaj

1.	Uvod.....	12
2.	Nehrđajući čelici .....	13
3.	Podjela nehrđajućih čelika .....	16
3.1.	Feritni nehrđajući čelici.....	16
3.2.	Austenitni nehrđajući čelici.....	17
3.3.	Austenitno-feritni nehrđajući čelici.....	19
3.4.	Martenzitni nehrđajući čelici.....	21
4.	Svojstva nehrđajućih čelika .....	22
4.1.	Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika .....	22
4.2.	Svojstva feritnih nehrđajućih čelika .....	23
4.3.	Svojstva austenitno-feritnih nehrđajućih čelika .....	24
4.4.	Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika.....	25
4.5.	Zavarljivost.....	26
4.5.1.	<i>Zavarljivost austenitnog čelika .....</i>	26
4.5.2.	<i>Zavarljivost feritnih čelika .....</i>	27
4.5.3.	<i>Zavarljivost martenzitnih čelika.....</i>	27
4.5.4.	<i>Zavarljivost austenitno-feritnih čelika .....</i>	28
5.	Plazma zavarivanje kao proizvodna tehnologija.....	29
5.1.	Plazma zavarivanje.....	29
5.2.	Oprema za plazma zavarivanje .....	31
5.2.1.	<i>Izvor struje kod zavarivanja.....</i>	32
5.2.2.	<i>Pištoli za zavarivanje .....</i>	33
5.2.3.	<i>Elektroda .....</i>	33
5.2.4.	<i>Plazmeni plin.....</i>	34
5.2.5.	<i>Zaštitni plin .....</i>	35
5.2.6.	<i>Dodatni materijal .....</i>	35
5.3.	Podjela plazma postupaka zavarivanja.....	36
5.3.1.	<i>Plazma navarivanje praškom .....</i>	36
5.3.2.	<i>Plazma zavarivanje s prenesenim lukom.....</i>	37
5.3.3.	<i>Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom .....</i>	38
5.3.4.	<i>Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom.....</i>	39
5.4.	Područje rada plazma zavarivanja .....	40
5.4.1.	<i>Mikroplazma .....</i>	40
5.4.2.	<i>Zavarivanje taljenjem.....</i>	41
5.4.3.	<i>Metoda ključanice .....</i>	41
5.5.	Parametri zavarivanja .....	43
6.	Specifičnosti plazma zavarivanja nehrđajućih čelika .....	45
7.	Eksperimentalni dio .....	49
7.1.	Opis eksperimentalnog rada .....	49
7.2.	Osnovni materijal .....	49
7.3.	Oprema za zavarivanje .....	50
7.4.	Zavarivanje.....	51

7.5. Kalibriranje.....	59
7.6. Toplinska obrada .....	60
7.7. Vizualna kontrola uzorka .....	60
7.8. Korozijsko ispitivanje .....	63
8. Zaključak.....	66
9. Literatura.....	68
10. Popis slika .....	70
11. Popis tablica .....	72

# 1. Uvod

Nehrđajući čelici od svojega otkrića pronašli su široku primjenu u svim granama industrije. Najčešće korišteni nehrđajući čelici su austenitni nehrđajući čelici. Glavna karakteristika im je otpornost na koroziju koja je povećana zbog njihovog kemijskog sastava. Nehrđajući čelici su korozijski postojani zbog prisutnosti pasivnog oksidnog filma bogatog kromom na površini koji nastaje spontano prirodnim procesom oksidacije u sredinama s dovoljnom količinom kisika.

Plazma zavarivanje ili PAW (eng. Plasma Arc Welding) je zavarivanje volframovom elektrodom uz plazmeni i zaštitni plin koji karakterizira uzak plazmeni luk. U plazmenom plinu dolazi do ionizacije pri visokim temperaturama te se uspostavlja plazmeni luk. Plazma zavarivanje noviji je postupak zavarivanja i sličan je TIG postupku zavarivanja. Razlika je u pištolju za zavarivanje gdje elektroda direktno ne sudjeluje u stvaranju metala zavara. Unatoč nekim prednostima nad TIG postupkom zavarivanja, postupak plazma zavarivanja manje je zastupljen u proizvodnji.

U ovom završnom radu prikazan je postupak plazma zavarivanja i praktična primjena plazma zavarivanja na cijevima. U prvom djelu rada opisani su nehrđajući čelici, njihova svojstva, podjela i primjena. Zatim je opisan plazma postupak zavarivanja što je potrebno od opreme, parametri zavarivanja i područja rada plazma zavarivanja. U eksperimentalnome dijelu prikazano je plazma zavarivanje cijevi, odnosno, opisan je postupak proizvodnje cijevi i kontrola zavarenih spojeva.

## 2. Nehrđajući čelici

Nehrđajući čelik (eng. stainless steel) je naziv koji se koristio prije samog razvoja nehrđajućih čelika. Razvoj nehrđajućih čelika započeo je početkom dvadesetog stoljeća te se danas označavaju različite vrste i kvalitete čelika otpornih na koroziju. Sinonimi za nehrđajući čelik su korozijski postojani čelik, inox, ili prokrom, a nehrđajući čelik je slitina s minimalnim udjelom kroma od 10,5%. Dodatkom ostalih legirajućih elemenata nikla, dušika, molibdena i titana koji modificiraju strukturu čelika postižu veću korozijsku postojanost, poboljšanje obradivosti, čvrstoću ili žilavost na nižim temperaturama.

„1913. godine engleski metalurg Harry Brearly, radeći na projektu poboljšavanja učinka cijevi pušaka, slučajno je otkrio kako dodavanjem kroma niskougličnom čeliku dolazi do otpornosti na oštećenja, odnosno na koroziju. Nakon tog otkrića, Brearly se okrenuo proizvodnji pribora za jelo. Sljedeće godine, njemačka firma Krupp je počela s eksperimentima te je u navedenu slitinu dodala i nikal. Takav nehrđajući čelik imao je još jednu prednost – bio je mekši i lakši za obrađivanje. Glavni element svakog nehrđajućeg čelika je krom, koji mu daje otpornost od hrđanja. Krom se u čeliku spaja s kisikom iz atmosfere i formira tanak, nevidljivi sloj nazvan pasivni film. Uz ugljik i krom, moderni nehrđajući čelik može u sebi sadržavati i nikal, molibden i titan“.[1]

„Nehrđajući čelici svoja svojstva visoke korozijske postojanosti duguju prisutnosti pasivnog oksidnog filma bogatog kromom na njihovoj površini. On nastaje spontano, prirodnim procesima oksidacije u sredinama koje sadrže dovoljno kisika. Taj sloj je tanak, približno 1-5 nanometara ( $1-5 \times 10^{-9}$  m) i oku nevidljiv. Ovaj zaštitni film čvrsto prianja i kemijski je stabilan u uvjetima koji osiguravaju dovoljnu količinu kisika na površini, kao što je prikazano na slici 1. Dodatno, s obzirom na prirodu i spontano formiranje, zaštitni oksidni film ima i važno svojstvo samoobnavljanja, kao što je na primjer u postupcima mehaničke strojne obrade, kod uklanjanja površine, u sredinama s dovoljno kisika, gdje će se, gotovo trenutno, sam obnoviti“.[2]

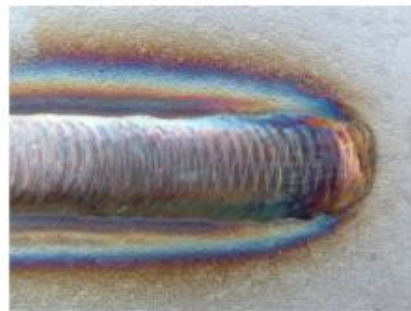


Slika 1 Prikaz mehanizma samoobnavljanja pasivnog filma kromovih oksida na površini [2]

„Ipak, nehrđajući čelici ne mogu se smatrati „neuništivima“. Pasivno stanje koje jamči korozijsku otpornost, može se, pod određenim uvjetima, razoriti, što ima za posljedicu pojavu korozijskih procesa, najčešće u obliku usko lokaliziranih korozijskih fenomena. Posebno je važno naglasiti da zavareni spojevi od nehrđajućih čelika mogu na konstrukciji predstavljati vrlo ozbiljnu opasnost zbog mogućih korozijskih oštećenja izazvanih najčešće rupičastom korozijom, ali i ostalim lokalnim korozijskim fenomenima poput korozije u procjepu, napetosne korozije, mikrobiološke korozije, interkristalne korozije, itd. Postoje mnogobrojni uzroci koji mogu dovesti do pokretanja navedenih mehanizama korozijskog razaranja, a osim, kako je ranije navedeno, pravilnog i pažljivog odabira odgovarajuće vrste nehrđajućeg čelika za pojedinu specifičnu namjenu, tj. sredinu i eksploatacijske uvjete kojima će konstrukcija biti izložena, vrlo je važno korektno i tehnološki ispravno provođenje tehnologije zavarivanja (postupak, parametri, dodatni materijali, tehnološka disciplina itd.). Naime, zavareni spojevi na konstrukcijama od nehrđajućih čelika, lokaliteti su izraženih strukturnih i površinskih nehomogenosti i kao takvi predstavljaju idealno mjesto za pokretanje korozijskih procesa“ [2], prikazano na slici 2.



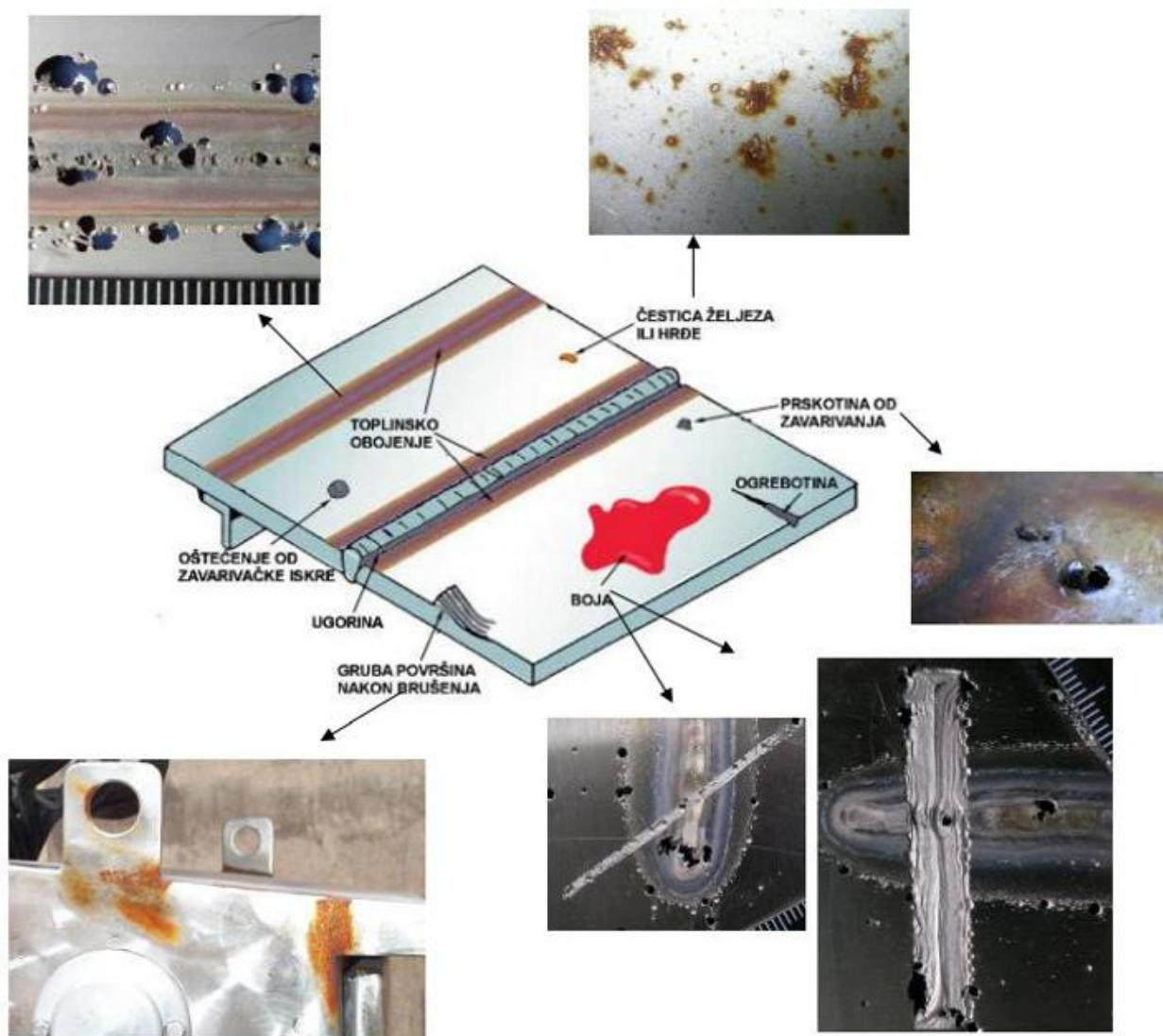
a) Razlike u strukturi: lijevo – osnovni metal  
desno – metal zavara



b) Obojenja površine nastala unosom topline zavarivanjem

Slika 2 Prikaz osnovnih struktura i površinskih nehomogenosti [2]

„Dodatno, različiti drugi površinski poremećaji, nastali na primjer prilikom rukovanja, izrade, montaže ili korištenja konstrukcija izrađenih od nehrđajućih čelika, mogu jednako tako nepovoljno djelovati na sposobnost postizanja i održavanja pasivnog stanja. Na slici 3 prikazane su glavne karakteristične posljedice – korozijska oštećenja, nastala uslijed različitih nehomogenosti površine, bilo da se radi o neuklonjenim obojenjima izazvanim unosom topline tijekom zavarivanja, kontaminacijom česticama željeza, naštrcanim metalnim kapljicama, neprimjereno gruboj mehaničkoj obradi ili neuklonjenim organskim bojama, markerima ili samoljepljivim folijama“.[2]



Slika 3 Prikaz posljedica pojedinih karakterističnih nehomogenosti površine [2]



### 3. Podjela nehrđajućih čelika

Prema mikrostrukтури nehrđajuće čelike možemo podijeliti u četiri osnovne grupe [3]:

1. feritni nehrđajući čelici,
2. austenitni nehrđajući čelici,
3. austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici,
4. martenzitni nehrđajući čelici.

#### 3.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže najčešće 11-17% Cr, uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata poput Mo, Si, Al, Ti ili Ni. Udio austenitizirajućih elemenata C, N i Cr vrlo je malen, a kako bi se poboljšala obradivost mogu se dodati sumpor i selen. U tablici 1 dani su najčešće upotrebljavani feritni nehrđajući čelici s kemijskim sastavom. Feritni nehrđajući čelici imaju centriranu kubičnu kristalnu strukturu te su feromagnetični i ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu.[3] Slika 4 prikazuje feritnu mikrostrukтуру.



Slika 4 Feritna mikrostrukтура[2]

Kod feritnih nehrđajućih čelika granice razvlačenja kreću se od 275-350 N/ mm<sup>2</sup>, vlačna čvrstoća je 415-585 N/ mm<sup>2</sup>, a duktilnost 20-35%. Njihovu obradivost i upotrebu ograničava slaba čvrstoća i osjetljivost na senzibilizaciju. Imaju slabiju čvrstoću na povišenim temperaturama u odnosu na austenitne čelike. Zbog otpornosti na koroziju i oksidaciju feritni nehrđajući čelici imaju nešto nižu cijenu te se koriste u sustavima s dušičnoj kiseline, kao što je prerada hrane i obrada otpadnih voda. Također se ugrađuju u sustave gdje postoji opasnost od pojave napetosne korozije, gdje austenitni čelici nisu prikladni.[2,3,4]

Neki feritni nehrđajući čelici kao što su X6CrAl12 i X2CrTi12 koji se koriste u ispušnim sustavima i kuhinjskim sudoperima imaju niže cijene od ostalih nehrđajućih čelika, dok su oni s manjim udjelima ugljika i dušika kao što je X2CrMoTi18-2, su skuplji, ali imaju i višu otpornost na kloride [2, 3, 4].

Tablica 1 Feritni nehrđajući čelici [5]

Feritni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	DIN	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
405	1.4002	X6CrAl12	0,08	14,50	0,60	1,00	1,00	0,30 Al
409	1.4512	X2CrTi12	0,08	11,75	0,50	1,00	1,00	0,75 Ti
430	1.4016	X6Cr17	0,12	18,00	0,75	1,00	1,00	-
442	1.4742	X10CrSiAl18-1-1	0,20	23,00	0,60	1,00	1,00	-
446	1.4762	X10CrAL18	0,20	27,00	0,75	1,50	1,00	0,25 N

### 3.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici zbog svoje dobre korozijske postojanosti, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava, dobre obradivosti te estetskih karakteristika najčešće su korištena vrsta nehrđajućih čelika. Oni su zastupljeni u svim granama industrije, građevinarstvu, te se upotrebljavaju za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta. Austenitni nehrđajući čelici većinom sadrže 0,02% – 0,15% ugljika, 15% – 20% kroma, 7% – 20% nikla, uz moguće dodavanje malih količina Mo, Ti, Nb, Ta i N. U tablici 2 dani su najčešće upotrebljavani austenitni nehrđajući čelici s kemijskim sastavom, dok su u tablici 3 dani podaci kako pojedini legirni element utječe na austenitni nehrđajući čelik.

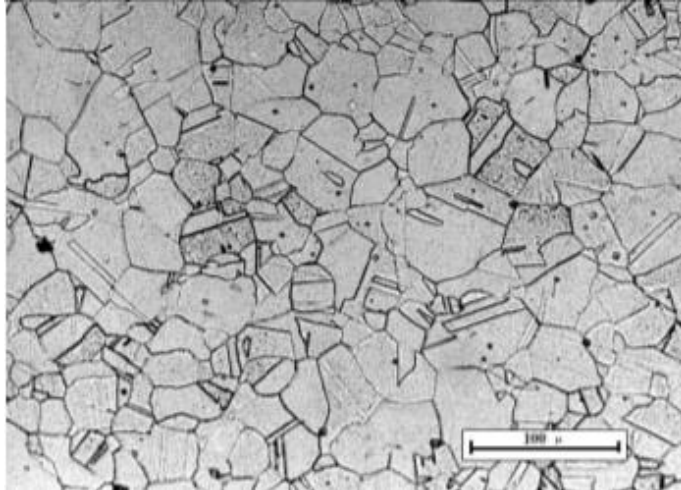
Tablica 2 Austenitni nehrđajući čelici [5]

Austenitni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	DIN	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
201	-	-	0,15	18,00	5,50	7,50	1,00	0,25N
301	1.4310	X10CrNi18-8	0,15	18,00	8,00	2,00	1,00	-
304	1.4301	X5CrNi18-10	0,08	20,00	10,50	2,00	1,00	-
304L	1.4306	X2CrNi19-11	0,03	20,00	12,00	2,00	1,00	-
316	1.4401	X5CrNiMo17-12-2	0,08	18,00	14,00	2,00	1,00	3,00 Mo
316L	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	0,03	18,00	14,00	2,00	1,00	3,00 Mo

Tablica 3 Utjecaj pojedinih elemenata na strukturu austenitnog nehrđajućeg čelika [6]

Element	Tvori strukturu	Karakteristike
C	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati $Cr_{23}C_6$ i uzrokovati interkristalnu koroziju.
Cr	F	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. povisuje čvrstoću. Pomaže stvaranju ferita.
Nb	-	Dodaje se čeliku min $Nb \geq 8 \times \% C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mn	A	Sprječava vruće pukotine stvaranjem manganovog sulfida (MnS).
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija. Pomaže stvaranje ferita.
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 stvaranju ferita.

Dodatkom dušika i nikla koji mogu djelovati na prošireno područje austenita te na snižavanje temperature početkom stvaranja martenzita. Martenzitno stanje iz austenitnih čelika može nastati hladnom deformacijom ili dubokim hlađenjem. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika prije svega može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna.[2] Slika 5 prikazuje austenitnu mikrostrukturu.

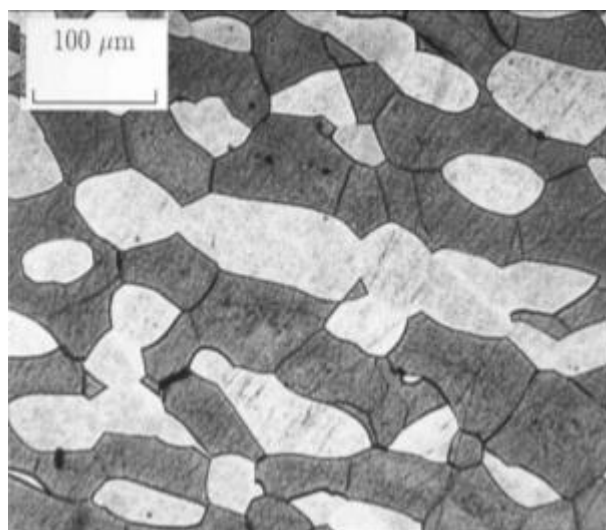


Slika 5 Austenitna mikrostruktura[2]

Osnovni austenitni nehrđajući čelik je X5CrNi18-10. To je legura na osnovi željeza koja sadrži 18% kroma i 8.5% nikla, uključujući manje količine C, N, Mn i Sc. Od osnovnog je X5CrNi18-10 austenitnog čelika razvijeno je desetak novih legura, koje se baziraju na dodavanju molibdena i dušika radi bolje otpornosti na koroziju.[2]

### 3.3. Austenitno-feritni nehrđajući čelici

Austenitno – feritni nehrđajući čelici imaju dvofaznu strukturu koja se sastoji od otprilike 50% austenita i 50% ferita. Svoju upotrebu započinjju 30-tih godina prošlog stoljeća, ali tek 70-ih ulaze u masivniju upotrebu.[3] Na slici 6 prikazana je mikrostruktura austenitno-feritna.



Slika 6 Austenitno-feritna mikrostruktura[2]

U odnosu na austenitne nehrđajuće čelike austenitno feritni nehrđajući čelici pokazali su se da imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju te poveću otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju na kloride. Također imaju veću čvrstoću o austenitnih nehrđajućih čelika.

Danas se za čelike koji sadrže 22% Cr najčešće upotrebljava oznaka duplex, a za čelike sa sadržajem 25% Cr oznaka superduplex [2, 3, 4]. U tablici 4 dani su najčešće upotrebljavani austenitno-feritni nehrđajući čelici sa svojim kemijskim sastavom legirnih elemenata.

Tablica 4 Austenitno-feritni nehrđajući čelici [5]

Austenitno-feritni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	DIN	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
-	1.4062	X2CrNiN22-2	0,03	24,00	2,90	2,00	1,00	0,45 Mo
-	1.4162	X2CrMnNiN21-5-1	0,04	22,00	1,70	6,00	1,00	0,80 Mo
-	1.4362	X2CrNiN23-4	0,03	24,00	5,50	2,00	1,00	0,60 Mo
218 LN	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	0,03	23,00	6,50	2,00	1,00	3,50 Mo
-	1.4482	X2CrMnNiMoN21-5-3	0,03	21,50	3,50	6,00	1,00	0,60 Mo

### 3.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 11-13% Cr te do 1,2% ugljika, mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade te su feromagnetični. Na slici 7 može se vidjeti martenzitna mikrostruktura.



Slika 7 Martenzitna mikrostruktura [2]

Isto kao i feritni čelici, imaju centriranu kubičnu kristalnu strukturu u očvrnulom stanju. Dodavanjem sumpora i selena poboljšava se obradivost, dok male količine nikla dodaju se za poboljšanje korozijske otpornosti. U tablici 5 dani su najčešće upotrebljavani martenzitni nehrđajući čelici sa svojim kemijskim sastavom.

Tablica 5 Martenzitni nehrđajući čelici[5]

Martenzitni nehrđajući čelici								
Norma			Kemijski sastav [%] (maksimalni udio)					
AISI	DIN	ISO	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ostalo
403	1.4000	X6Cr13	0,15	13,00	-	1,00	0,50	-
410	1.4006	X12Cr13	0,15	13,50	-	1,00	1,00	-
416	1.4005	X12CrS13	0,15	14,00	-	1,25	1,00	0,60 Mo
420	1.4021	X20Cr13	0,15	14,00	-	1,00	1,00	-
431	1.4057	X17CrNi6-2	0,20	17,00	2,50	1,00	1,00	-

Martenzitni čelici osjetljivi su prema vodikovoj krhkosti posebice u sulfidnom okolišu što im je najveći nedostatak. Kod sniženih temperatura imaju i lošiju otpornost na udarni lom. Ali zbog otpornosti na koroziju koriste se za izradu elemente kugličnih ležajeva, kirurških i zubarskih instrumenata, oštrice noževa, turbinskih lopatica i dijelova za rad na visokim temperaturama, a razlog tome je otpornost na trošenje zbog visokog sadržaja ugljika. Za eliminaciju pukotina te dobivanje korisnih svojstva najčešće je potrebno predgrijavanje i toplinska obrada nakon zavarivanja [2, 3, 4].

## 4. Svojstva nehrđajućih čelika

### 4.1. Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika

Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika[7, 8]:

- nemagnetični su,
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- odlična plastičnost, nisko naprezanje tečenja ( $185 - 225 \text{ N/mm}^2$ ),
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad  $600^\circ\text{C}$ ,
- visoka žilavost, oksidacijska i korozivna otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- postojana austenitna struktura od solidus temperature do ispod sobne temperature,
- kubično plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- visoka otpornost na rupičastu, napetosnu i interkristalnu koroziju, ali ta otpornost se može smanjiti u ZUT-u zbog visokih temperatura,
- dodavanjem Cr više od 18% općenito se povećava otpornost prema koroziji,
- titan i niobij - niski sadržaj ugljika (do 0,03%) što sprječava interkristalnu koroziju,
- koeficijent toplinskog rastezanja je za oko 50% veći s obzirom na ostale čelike, što utječe na pojavu deformacija i zaostalih napetosti tijekom i nakon zavarivanja,
- specifični električni otpor je također povećan, a utječe na određene tehnološke zahtjeve kao što su jakost struje zavarivanja, slobodni kraj žice i ostalo,
- koeficijent toplinske vodljivosti je za oko 60% manji što rezultira slabijim odvođenjem topline u području zavarivanja,
- za povećanje otpornosti prema napetosnoj i rupičastoj koroziji u leguru se dodaje molibden, dok nikal još dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji.

U tablici 6 dana su mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika.

Tablica 6 Mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika [9]

Čelik	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Granica razvlačenja [N/mm <sup>2</sup> ]	Istezljivost [%]	Suženje [%]
X5CrNi18-10	515	205	40	50
X2CrNi18-9	480	170	40	50
X3CrNiMo17-13-3	515	205	40	50
X2CrNiMo17-12-2	480	170	40	50
X6CrNiTi18-10	515	205	40	50
X6CrNiNb18-10	515	205	40	50

Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće austenitnih nehrđajućih čelika su male i slične su vrijednostima niskougličnih čelika. Minimalne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) kreću se od 205 do 275 N/ mm<sup>2</sup>, a vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) između 520 i 760 N/ mm<sup>2</sup>. Istezljivost se kreće od 40 do 60%. Vrijednosti granice razvlačenja i čvrstoće mogu se povisiti hladnom deformacijom. Austenitni čelici koji imaju visoki udjel nikla i dodatkom titana mogu očvrnuti, dok ostatak austenitnih čelika ne mogu očvrnuti precipitacijom niti strukturnom transformacijom. [9]

Austenitni nehrđajući čelici primjenjuju se u prehrambenoj, farmaceutskoj, kemijskoj, metalurškoj i građevinskoj industriji, u nekim dijelovima kućanskih aparata te ugostiteljskoj i medicinskoj opremi.

## 4.2. Svojstva feritnih nehrđajućih čelika

Svojstva feritnih nehrđajućih čelika[10]:

- relativno mekani,
- magnetični,
- imaju slabu deformabilnost,
- relativno slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna grijanjem iznad 900°C (ubrzano iznad 1150°C),
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama,
- skloni pojavi „krhkosti 475“ pri duljoj izloženosti temperaturi 350-520°C,
- skloni stvaranju krhke sigma faze (520-850°C),



- dobra obradivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih),
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama ( $\text{HNO}_3$ ),
- imaju lošu postojanost u kloridnim otopinama (npr. morska voda),
- dodatkom molibdena povećava im se otpornost na rupičastu koroziju,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- skloni lomu pri niskim temperaturama.

Feritni nehrđajući čelici primjenjuju se u proizvodnji pribora za jelo (osim oštrice noža), dijelova kućanskih aparata, kvaka, okvira prozora, vijaka, zakovica, matica, u proizvodnji octa, preša za voće i uređaja za proizvodnju sapuna.

### 4.3. Svojstva austenitno-feritnih nehrđajućih čelika

Svojstva austenitno-feritnih nehrđajućih čelika[10]:

- povećana otpornost prema napetosnoj koroziji (poseban nedostatak austenitnih čelika) i utjecaju klorida,
- postojanost prema interkristalnoj koroziji je viša što je viši sadržaj ferita,
- magnetični su,
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike,
- čvrstoća je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika,
- teže se stvaraju karbidi  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (krom se otapa u feritu, a ugljik u austenitu),
- intermetalna sigma-faza može nastati u austenitu i feritu,
- primjena na povišenim temperaturama je moguća do maksimalno  $250 - 350^\circ\text{C}$  zbog pojave „krhkosti 475“ koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi (po istom principu kao i kod feritnih čelika),
- temperatura primjene je između  $-50$  i  $+350^\circ\text{C}$ .

Austenitno-feritni nehrđajući čelici primjenjuju se u proizvodnji izmjenjivača topline, posuda pod tlakom, velikih spremnika za transport kemikalija, u petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, apsorberi, separatori, proizvodnji nafte i plina), kemijsko-procesnoj industriji, brodogradnji te industriji papira.

#### 4.4. Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika

Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [10]:

- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnoj okolini,
- imaju lošu otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura,
- mogu se kaliti jer imaju transformaciju  $\gamma - \alpha$ ,
- u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike, imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje,
- imaju poboljšanu granicu razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama,
- obično se koriste u poboljšanom stanju.

Tablica 7 prikazuje primjenu i posebnu postojanost martenzitnih nehrđajućih čelika.

Tablica 7 Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika [6]

Čelik	Posebno postojan	Primjena
<b>X20Cr13</b>	- na vodu i vodenu paru, na organske kiseline: octenu, mliječnu i voćnu	- kirurški instrumenti, pribor za jelo, strojni dijelovi: osovine, stapajice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice
<b>X20CrMo13</b>	- povišena postojanost u odnosu na X20Cr13	- kao X20Cr13, ali za radne temperature i do 500°C za toplinski napregnute opruge
<b>X22CrNi17</b>	- na organske kiseline koje se javljaju u prehrambenoj industriji, octene kiseline i sapun, na razrijeđenu HNO <sub>3</sub> , - postojan na morsku vodu	- osovine, ventili, dijelovi pumpa, dijelovi uređaja u mljekarama, u industriji papira, u proizvodnji kvasca i škroba te za dijelove kompresora
<b>X30Cr13</b>	- na vodu i paru	- opruge vijci (rad u agresivnoj atmosferi), škare te mjerni alat
<b>X45CrMoV15</b>	- otporan do 500°C	- različiti rezni alati i kirurški skalpeli
<b>X90CrMoV18</b>	- istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju	- noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, pribor za jelo otporan na abrazijske praške za čišćenje, britve i žilete

## **4.5. Zavarljivost**

Zavarljivost je svojstvo koje se uspoređuje, odnosno komparativno svojstvo. Tako se uspoređuje zavarljivost dva ili više materijala prilikom primjene iste, a može i različitih tehnologija zavarivanja. Zavarljivost nije lako definirati, ali je tehnološko svojstvo materijala koje je jedno od ključnih pojmova u zavarivačkoj tehnologiji. Zavarljivost se utvrđuje kod svakog slučaja posebno jer ne postoji opći pojam zavarljivosti. Zavarljivost pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvaruje kontinuirani zavareni spoj, koji će svojstvima udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku trajanja zavarnog spoja. Ispitivanje zavarljivosti odnosi se na ispitivanje sklonosti materijala na pojavu pukotina (npr. hladne, tople, lamelarno odvajanje/cijepanje itd.), smanjenju žilavosti, transformacijskom otvrdnjivanju. [11, 12]

### **4.5.1. Zavarljivost austenitnog čelika**

Austenitni čelici dobro su zavarljivi, no austenitni čelici koji sadrže sumpor ili selen teže se zavaruju. Austenitne čelike ne treba predgrijavati prije zavarivanja. Do pojave interkristalne korozije može doći uslijed moguće senzibilizacije odnosno precipitacije kromovih karbida na temperaturama između 425°C - 850°C. Tijekom zavarivanja austenitnih konstrukcijskih materijala treba obratiti pozornost o mogućnosti deformacija što traži odgovarajuću tehnološku razinu i disciplinu. Sama sklonost deformacija kao posljedica zavarivanja proizlazi zbog sniženog koeficijenta toplinske vodljivosti i visokim koeficijentom toplinske istežljivosti. Austenitni čelici sklone su pojavi toplih pukotina u metalu zavara, kao posljedica sklonosti deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima, dok se s druge strane javljaju kao posljedica nečistoća u samome materijalu. Danas se problem u većini slučajeva rješava pravilnim odabirom dodatnih materijala da se dobije 4-12% delta ferita, ali utječe i sama tehnika zavarivanja kao i atmosferski uvjeti. Austenitni nehrđajući čelici lakše se zavaruju od ostalih skupina nehrđajućih čelika jer kod njih ne nastupaju velike fazne transformacije te je zbog toga moguće zavarivanje bez prethodnog zagrijavanja ili naknadne toplinske obrade da se postignu zavarni spojevi sa svojstvima osnovnog materijala.[12]

Opći zahtjevi koji su preporučeni za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja austenitnih čelika su [8]:

- izbor dodatnog materijala koji osigurava sadržaj  $\delta$  – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno je dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- električni luk držati što kraćim,
- bitna je vrsta i čistoća zaštitnih plinova te omjer miješanja istih,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavanje, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100°C do 150°C,
- međuprolazna temperatura treba biti najviše do 100°C,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- posebnu pozornost obratiti na naprave za stezanja i redosljed zavarivanja zbog jakih deformacija,
- ne smije se ravnati s plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić i četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika

#### **4.5.2. Zavarljivost feritnih čelika**

Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika limitirano je zbog izrazite sklonosti prema pogrubljenju strukture, što dodatno može dovesti do ubrzanijeg izlučivanja krhkih intermetalnih faza u području visokotemperaturnog dijela zone utjecaja topline. Superferitni čelik dobiven je nešto boljom zavarljivošću i poboljšanom korozijskom postojanošću. Tako superferitni čelici osim povišenog udjela kroma (19 – 30%) te dodatnim legiranjem s molibdenom te imaju vrlo niski udjel ugljika i dušika.[2]

#### **4.5.3. Zavarljivost martenzitnih čelika**

Zavarivanje ovih martenzitnih čelika zahtjeva toplinske postupke predgrijavanja između 200-300°C i poslije postupka zavarivanja, popuštanjem između 700-750°C zbog svojstva zakaljivosti na zraku. Za zavarivanje se koriste dodatni materijali isti ili slični osnovnom materijalu ili se koriste austenitni dodatni materijali. Za izradu zavarenih konstrukcija rabe se čelici s manje od 0,15% C.[2]

#### **4.5.4. Zavarljivost austenitno-feritnih čelika**

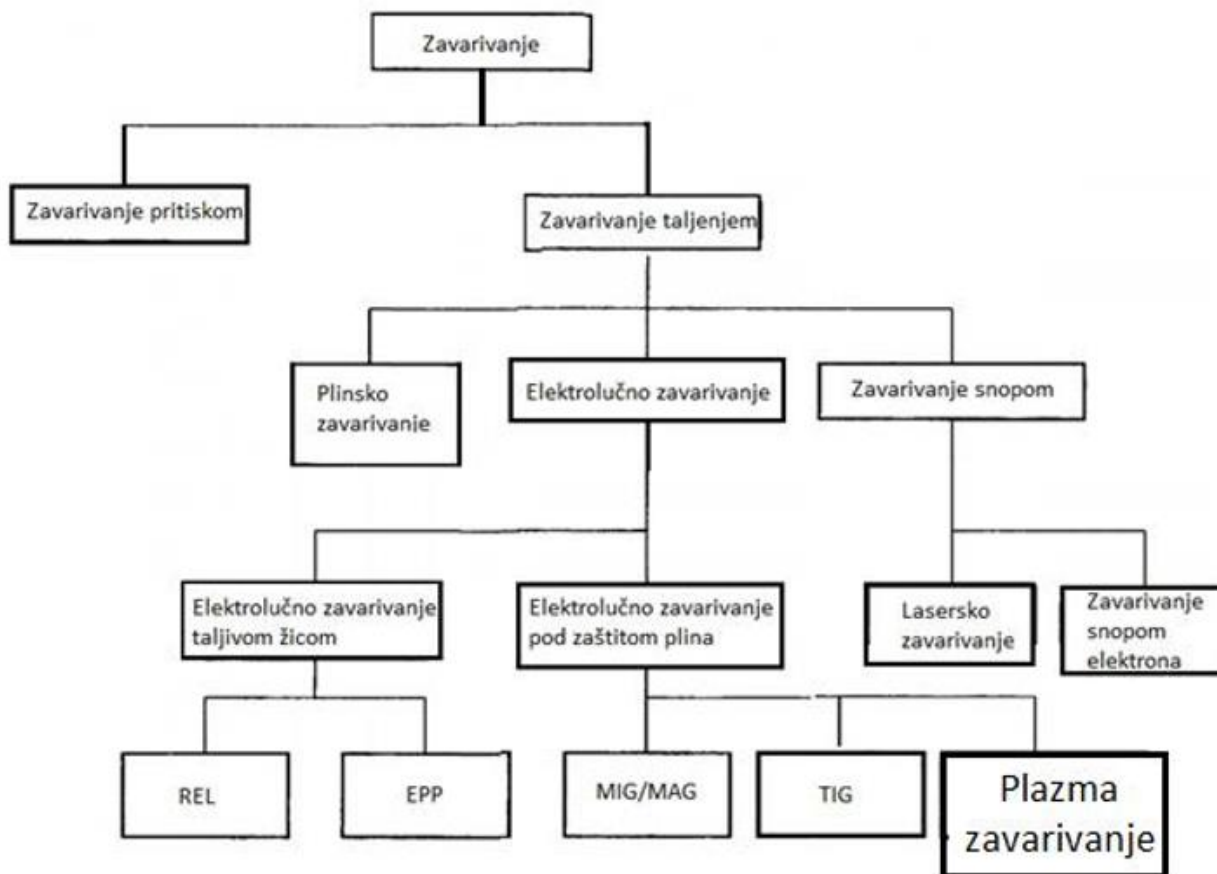
Za zadržavanje dovoljnog udjela austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni materijali predviđeni za zavarivanje austenitno-feritnih čelika, a koji su “prelegirani” s nekoliko postotaka nikla u odnosu na dodatni materijal. Rezultatima postignutim u istraživanju izučavanja utjecaja zaštitnih plinova kod zavarivanja austenitno-feritnih čelika pouzdano je utvrđen pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture, ako se u zaštitni plin dodaje dušik. Feritizacija je posljedica zavarivanja koja djeluje štetno jer je povećani udio feritne strukture neizbježno dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura u tom pojasu te do smanjenja korozijske postojanosti. Feritizirani dio strukture je najkritičnije područje zavarenog spoja kod austenitno-feritnog čelika. Zavarivanje je nužno izvoditi u kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline, odnosno pravilno podesiti parametre zavarivanja.[2]

## 5. Plazma zavarivanje kao proizvodna tehnologija

### 5.1. Plazma zavarivanje

„Plazma zavarivanje ili skraćenica PAW (eng. Plasma Arc Welding) je postupak zavarivanja zaštićenom volframovom elektrodom uz zaštitu plina koju karakterizira uzak plazmeni luk. Plazma zavarivanje samo po sebi vrlo je slično TIG-u. Osnovna razlika je u tome što je kod plazma zavarivanja netaljiva volframova elektroda uvučena u sapnicu. Plazma je plin koji je zagrijan do vrlo visokih temperatura odnosno do 50 000°C i ionizira se tako da postane električki vodljiv. Za potrebe zavarivanja plazma se dobiva tlačenjem plina kroz električni luk, a zatim se plazmeni plin vraća u stabilno stanje predajući materijalu koji se zavaruje toplinsku energiju preuzetu iz električnog luka. Električni luk se može uspostaviti između elektrode i zavarivanog dijela (preneseni luk) ili između elektrode i sapnice (nepreneseni luk).“ [13]

Plazma zavarivanje spada pod novije postupke zavarivanja taljenjem (slika 8 podjela postupaka zavarivanja) koji se počeo razvijati 1957. iz TIG-a. Za razvoj plazma zavarivanja zaslužan je Robert M. Gage koji je modificirao sapnicu i postupku dodao plazmeni plin uz prisustvo zaštitnog plina. Ciljevi novog postupka zavarivanja bili su napraviti uređaj koji neće trošiti elektrodu za uspostavu električnog luka, a da se poveća vijek trajanja uređaja bez dodatnih podešavanja. Drugi cilj bio je ukloniti nedostatke opreme za zavarivanje povezanih sa zagrijavanjem. Materijali se mogu zavarivati većim brzinama odnosu na konvencionalne metode zavarivanja, ali materijal se zagrijava uz visok stupanj toplinske učinkovitosti.[13]

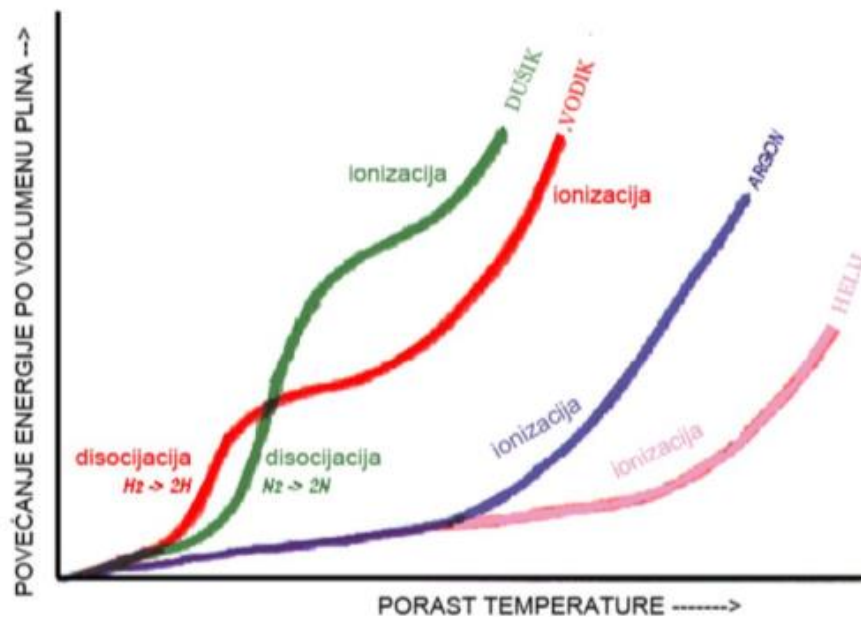


Slika 8 Shematski prikaz postupaka zavarivanja taljenjem [13]

Plazma zavarivanjem nastoji se povećati razina energije koja se ostvaruje plazmenim lukom na kontrolirani način. Plazma je vruće stanje tvari koje se sastoji od slobodnih elektrona, iona, atoma i molekula. To se postiže posebnom mlaznicom koja je spojena na izvor napajanja i smještena oko volframove elektrode. Volframova elektroda smještena je unutar pištolja za zavarivanje, dok je luk plazme odvojen od zaštitnog plina i istiskuje se kroz bakrenu sapnicu koja ga oblikuje. Postoje tri načina rada koji ovise o jačini struje, protoku plina i promjeru sapnice, a to su: mikroplazma, plazma zavarivanje taljenjem i plazma zavarivanjem protaljivanjem. Plazma se najčešće spaja na istosmjerni izvor struje s padajućom karakteristikom napona. Uređaj za plazma zavarivanje može se spajati na izvor struje za TIG zavarivanje, razlog tome su jedinstvene radne karakteristike koje su rezultat konstrukcije pištolja za plazma zavarivanje u kojem su plazma plin i zaštitni plin odvojeni. Pošto pištolj za plazma zavarivanje ima užu sapnicu, usmjereni plazmeni mlaz uži je od TIG električnog luka.[14]

U zavarivanju plazmom se kao plazmeni plin najčešće koriste plinovi: argon, helij, vodik i dušik. Međutim, plinovi nemaju jednaka svojstva te svaki ima neku prednost nad ostalim. Ionizacijom i disocijacijom plinova moguće je osigurati velike količine energije, ali postoje prilične razlike između plinova. Vodik i dušik mogu na određenoj temperaturi prenijeti više

energije od helija i argona, a razlog tome je njihov molekularni sastav.[15] Na slici 9 prikazan je odnos porasta temperature i povećanja zapremljene energije po volumenu plinova.

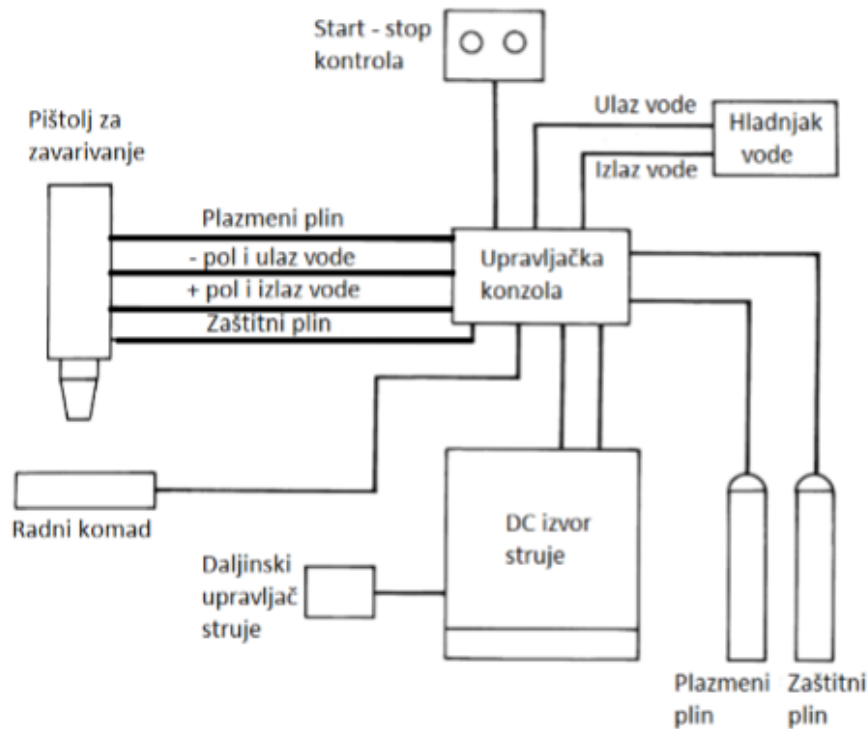


Slika 9 Prikaz odnosa temperature i povećanje zapremljene energije po volumenu plina [15]

## 5.2. Oprema za plazma zavarivanje

Osnovna oprema za plazma zavarivanje sastoji se od upravljačkog uređaja, izvora struje, pištolja za zavarivanje, sustava za opskrbu plinom koji se sastoji od plazma plina i zaštitnog plina te sustav za hlađenje. Shematski prikaz opreme za plazma zavarivanje prikazan je na slici 10.





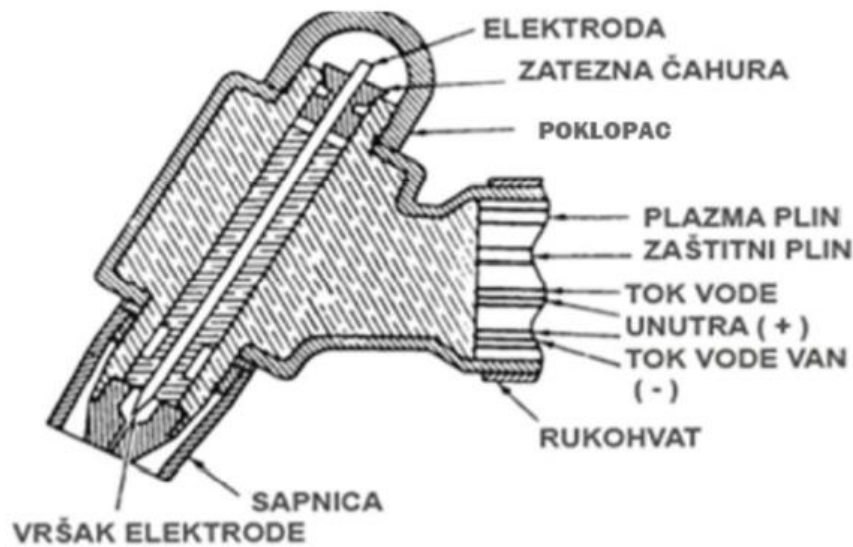
Slika 10 Oprema za plazma zavarivanje [13]

### 5.2.1. Izvor struje kod zavarivanja

Izvor struje koji opskrbljuje sustav za zavarivanje najčešće je izveden s upravljačkim i regulacijskim uređajem. Upravljački uređaj u jednostavnom obliku služi za kontrolu protoka plazmenog i zaštitnog plina, dok kroz regulacijski uređaj prolazi niz promjenjivih parametara, kao što je mjerenja vremena protoka plina, glavne struje za zavarivanje, pilot luka i ostali parametri. Suvremeni izvori za plazma zavarivanje rade na invertnom principu. Inverteri se razlikuju od konvencionalnih izvora struje jer daju visoko frekventnu pulsirajuću struju ili istosmjernu. Na koncu sam izvor struje zadužen je pretvorbu izmjenične struje iz električne mreže koja može biti na visokom naponu, pretvorbom niske struje u visoku te nižem naponu koji su potrebni za zavarivanje. Napon praznog hoda je oko 80 V, a minimalna i maksimalna struja zavise od izabranog izvora, no najčešće se ne ide ispod 0.05 A i iznad 450 A.[16]

### 5.2.2. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za zavarivanje plazmom sličan je onom kod TIG-a, ali složeniji. Prikazan je na slici 11.



Slika 11 Poprečni presjek pištolja za plazma zavarivanje [17]

Svi plazmeni pištolji i oni koji rade na najnižoj struji, moraju imati ugrađen sustav hlađenja. Toplina koju luk proizvodi unutar sapnice toliko je konstantno da bi se sapnica, ako se sustav hlađenja samo nakratko, mogla potpuno rastaliti. U samom kućištu pištolja nalazi se kanali za dovod plazmenog i zaštitnog plina te se nalazi kanal za protok rashladne tekućine. Svi ti kanali čine pištolj za zavarivanje krupnim, zahtjevnim za održavanje i često su neprikladni za zavarivanje na skućenim i uskim prostorima. Varijacije u veličini pištolja ovise uglavnom o njegovoj namjeni. Razlikuju se pištolji za automatizirano i ručno zavarivanje.[17]

### 5.2.3. 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 ISO 6848:2015“.[18] Volframove elektrode su valjkastog oblika i imaju zašiljeni vrh. Kut vrha elektrode kao i veličina zašiljenog konusa bira se prema jačini struje zavarivanja. Precizno namještanje elektrode unutar sapnice te koncentričnost elektrode sa sapnicom utječu na kvalitetu i stabilnost zavarivanja.[16] Odabir kuta vrha i veličine elektrode s obzirom na jačinu struje prikazani su u tablici 8.

Tablica 8 Odabir promjera i kuta vrha volframove elektrode s obzirom na jačinu struje [16]

Radno područje	Jakost struje [A]	Promjer elektrode [mm]	Kut elektrode [°]
Mikroplazma	5-20	1,0	15
Zavarivanje taljenjem	30-100	2,4	30
Zavarivanjem ključanicom	50-200	4,8	30
	180-200	3,2	60
	250-350	4,8	60

„Prema normi ISO 26848, volframove elektrode označavaju se prema kemijskom sastavu, odnosno prstenovima u boji na krajevima elektrode. Ovisno o kemijskom sastavu elektroda može označeno jednom ili više boja. 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“ [18].

#### 5.2.4. Plazmeni plin

Plazma plin služi za prijenos električne energije tijekom zavarivanja. Plin prolazi kroz pištolj, oko elektrode i kroz otvor na vrhu sapnice izlazi van te kao rezultat daje plazmeni luk malog promjera koji je otporan na magnetsko puhanje. Plinovi za plazma zavarivanje obrađeni u normi ISO 14175, a oni su argon i mješavina argon/vodik, s time da je u komercijalnoj upotrebi više zastupljen sam argon. Kod većine proizvođača opreme za zavarivanje plazmom moguće je vidjeti zahtjev za argonom čistoće 4.5 i više. U novije vrijeme, za rezanje se sve više koriste plazma uređaji koji kao plazmeni plin koriste zrak (što je najjeftinije), ali je elektroda u tom slučaju legirana cirkonijevim oksidom i drugačijeg je oblika. Protok plazmenog plina kreće se uobičajeno od 0,1 do 5 l/min., zavisno od metode, debljine materijala i položaja u kojem se zavaruje.[18, 19]

Argon se kao plazmeni plin ionizira i mnogo lakše tvori plazmeni tok od bilo kojeg drugog plina, čime se olakšava prijelaz luka s pištolja na radni materijal. Kako je argon inertan plin, ne kontaminira elektrodu i ne dozvoljava oksidaciju osnovnog materijala.[20]

Mješavina s udjelom od 98% argona i 2% vodika kao plazmenog plina preporučuje se samo za zavarivanje tankostjenih metala na bazi nikla poput nehrđajućih čelika. Vodik u ovoj mješavini dodatno povišuje temperaturu luka i uništava površinske okside na materijalu te stabilizira šav zavara. Upravo zbog svog erozijskog djelovanja i mogućnosti pojave pukotina njegovim difundiranjem iz metala, ne koristi se često, osim u slučajevima zavarivanja tankostjenih materijala

na niskoj jakosti struje. Također, dodatno zagrijavanje luka bitno smanjuje vijek trajanja sapnice.[20]

### **5.2.5. Zaštitni plin**

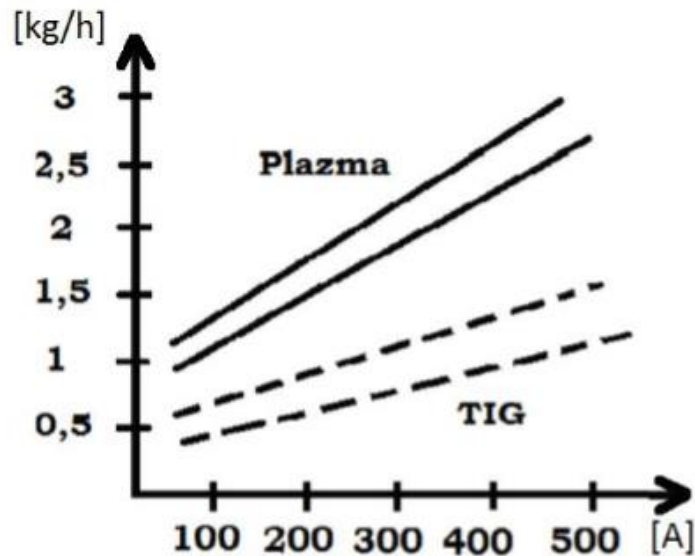
Zaštitni plin izlazi kroz vanjsku sapnicu i štiti zavar od štetnog utjecaja atmosfere. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika najčešće se kao zaštitni plin koristi argon jer je teži od zraka pa stoga pruža dobru zaštitu korita kao i dobru stabilnost luka. Isto tako pruža najbolju i najstabilniju podršku prilikom prebacivanja upravljačkog luka na osnovni materijal.[20] Drugi plinovi koji se koriste su mješavine argon/vodik (zavarivanje Cr-Ni čelika) i argon/helij. Protok zaštitnog plina kreće se od 5,0 do 18,0 litara/min, a čistoća je obično nešto niža u odnosu na plazmeni plin.[18]

Mješavina plinova argon/vodik sastavljena je od 95% argona i 5% vodika, te se koristi za nehrđajuće čelike i druge slitine na bazi nikla.[20]

Mješavina plinova argon/helij gdje je helij 25% „topliji“ od argona, koristi se za zavarivanje aluminijskih, titana, te bakra i bakrenih slitina. Helijeva prednost je u tome što unosi više topline u zavar nego što okolni zrak odnosi. Problem koji se javlja je taj da je lakši od zraka te se teže zadržava na zavaru pa je mogućnost kontaminacije nešto veća.[20]

### **5.2.6. Dodatni materijal**

Dodatni materijal se upotrebljava, kad se zavaruje „I“ priprema spoja, a sama upotreba ne ovisi o debljini materijala. U svim se ostalim slučajevima može i ne mora upotrebljavati. Dodatni materijal koristi se u obliku žice (hladne ili vruće) i praška, a njegove dimenzije ovise o osnovnom materijalu i jakosti struje. Dodavati ga se može ručno, mehanički i automatizirano. Procedura je slična onoj kod TIG-a, s jednom razlikom – zavarivaču je kod plazma zavarivanja dozvoljena nešto veća sloboda u razmaku sapnice i materijala što olakšava unos i povećava moguću količinu depozita dodatnog materijala kao što je vidljivo na slici 12 gdje su okvirne vrijednosti depozita.[18]



Slika 12 Odnos depozita po satu i jakosti struje kod TIG-a i PAW-a[17]

### 5.3. Podjela plazma postupaka zavarivanja

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 koja deklarira i numerira sve postupke zavarivanja, plazma postupak zavarivanja definiran je kao sljedeće:

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

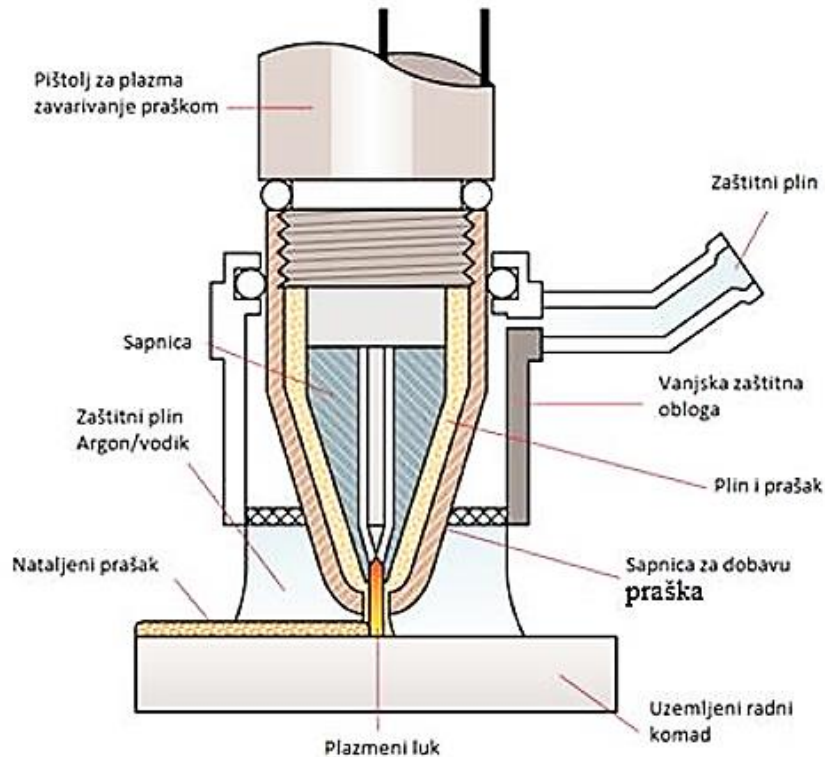
Ostale varijante plazma zavarivanja prema HRN EN ISO 4063:2012 [21]:

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

#### 5.3.1. Plazma navarivanje praškom

Plazma navarivanje praškom je postupak kojim se osnovni metal tali pomoću plazmenog luka i dovedenog praška. Tijekom zavarivanja uneseni prah kontroliran je iznosom argona u mješavini plazmenog plina i plazmenim lukom koji osigurava povezanost materijala. Precizni depozit praškastog materijala može se dobiti upravljanjem dodavača praha, jačine struje, protoka plina i

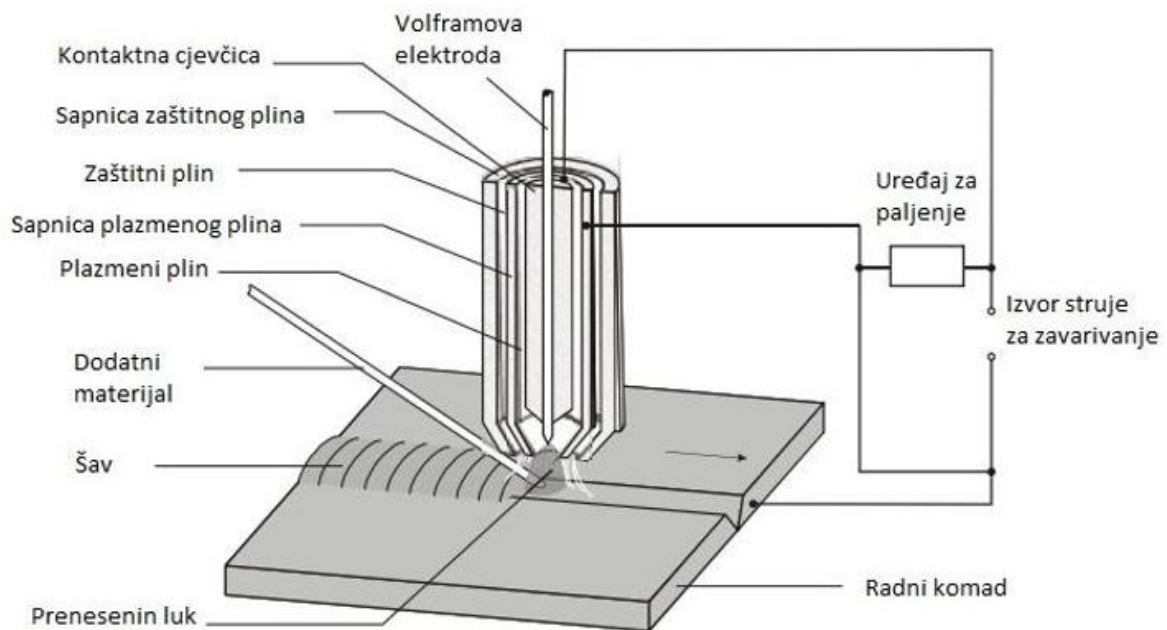
brzinom punjenja praha. Pištolj za plazma navarivanje praškom, prikazan na slici 13, spojen je na dodavač praha kojega kontrolira zavarivač. Plazma navarivanje praškom ili PPAW je najčešće korišteno za tvrdo navarivanje, za slojeve otporne na koroziju, trošenje i udarna opterećenja. Plazma navarivanje praškom koristi se za repariranje strojnih dijelova kao što su pumpe, vijci, osovine, turbinske lopatice, udarni čekići.[23]



Slika 13 Pištolj za plazma navarivanje praškom [23]

### 5.3.2. Plazma zavarivanje s prenesenim lukom

Kod plazma zavarivanja prenesenim lukom, električni luk se uspostavlja između volframove elektrode koja je na negativnom polu i radnog komada koji je na plus polu. Toplina potrebna za taljenje dobiva se plazmenim mlazom tako što je radni komad dio strujnog kruga. Prenesenim lukom mogu se postići velike brzine zavarivanja, a prednost leži i u većoj prenesenoj energiji na radni komad. U strujni krug postavljen je otpornik koji služi za pokretanje prenesenog luka. Kada se pali prvo se pali pilot luk gdje je struja do 50 A koja se stvara između elektrode i plazmenog luka. Tada je potrebno dotaknuti radni komad da glavna struja protokne između radnog komada i elektrode i uspostavlja se preneseni luk. Temperature koje se postižu plazmenim lukom su između 8 000°C i 25 000°C. Plazma zavarivanje s prenesenim lukom najčešće se koristi od ostalih tipova plazma zavarivanja.[23] Na slici 14 prikazan je postupak plazma zavarivanja prenesenim lukom.



Slika 14 Plazma zavarivanje prenesenim lukom [24]

### 5.3.3. Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom

Kod plazma zavarivanja s neprenesenim lukom, volframova elektroda spojena je na negativni pol, ali se strujni krug uspostavlja i održava preko unutrašnje sapnice koja je spojena na plus pol. Preko mlaza plazme dobiva se korisna toplina, a plazmeni mlaz izlazi kroz sapnicu pomoću plazmenog plina. Tamo gdje potrebna relativno niska koncentracija energije i za komade koji ne provode struju, nepreneseni luk koristi se za spajanje i rezanje takvih komada. Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom koristi se kod zavarivanja taljenjem, prevlačenjem i naštrcavanjem, ali i za zavarivanje folija.[24] Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom prikazano je na slici 15.





## 5.4. Područje rada plazma zavarivanja

Postoje 3 radna područja zavarivanja plazmom koje se međusobno razlikuju prema jakosti struje, protoku plazmenog plina i promjeru otvora sapnice, a samim time i prema namjeni. To su: mikroplazma, zavarivanje taljenjem i metoda ključanice. U tablici 9 prikazano je radno područje i primjena plazma zavarivanja.

Tablica 9 Prikaz područja rada pojedine metode plazma zavarivanja [18]

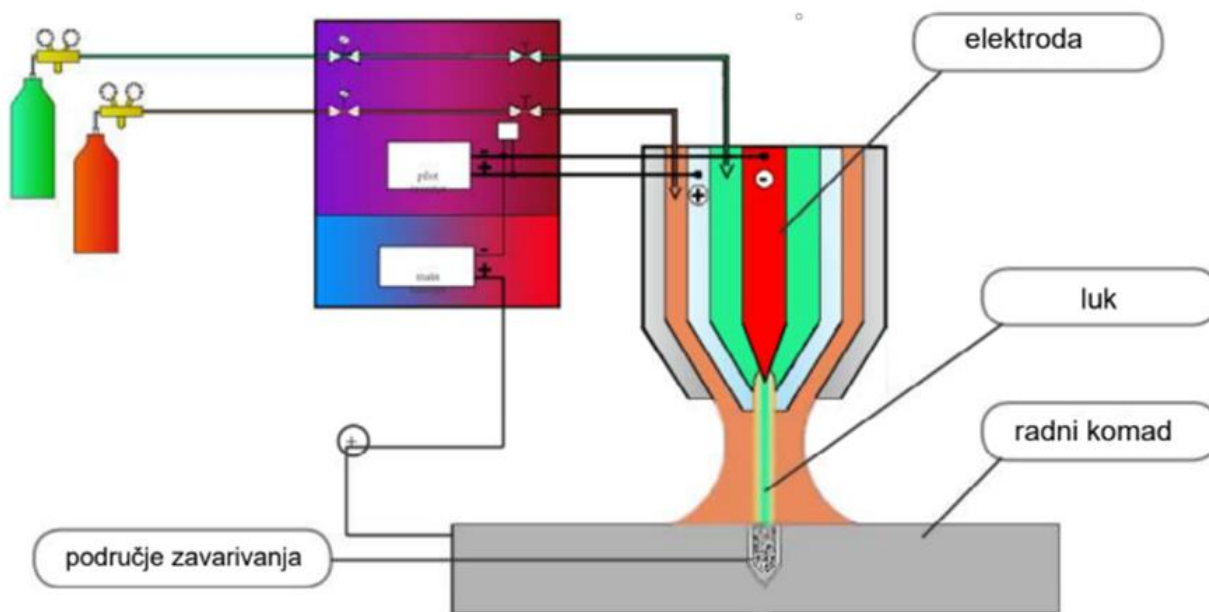
Jakost struje [A]	Područje rada	
	Mikroplazma	Plazma taljenje i zavarivanje ključanicom
0,1 - 10	Folije 0,05 do 0,2 mm	-
1 - 20	Tanki limovi 0,2 do 0,5 mm	-
5 - 40	Tanki lomovi 0,5 do 1 mm	-
40 - 100	-	Taljenje 0,5 do 1,5 mm
100 - 200	-	Taljenje 1,5 do 3 mm
100 - 300	-	Ključanica 3 do 10 mm

### 5.4.1. Mikroplazma

U području mikroplazme zavaruju se tanki materijali (od 0,05 do 1,6 mm) pretežito bez dodatnog materijala u osjetljivim okolnostima. Nerijetko se primjenjuju jako niske vrijednosti struje koje, u kombinaciji s malim promjerom sapnice, daju mogućnost zavarivanja tankih materijala. Svrha mikroplazme su sitni popravci, a u industriji se najčešće upotrebljava za popravljavanje alata i kalupa. Kako bi se protaljivalo spojno područje potrebno je osigurati precizno vođenje zbog uskog djelovanja plazmenog luka. Takvo precizno zavarivanje je vrlo teško provesti ručno te se preporučuje automatizirano vođenje pištolja. Prednost ove metode nad TIG-om je u tome što se stabilan luk može održavati i na niskoj jakosti struje. Jakost struje kod mikroplazma zavarivanja je između 0,1 i 15 A.[18]

### 5.4.2. Zavarivanje taljenjem

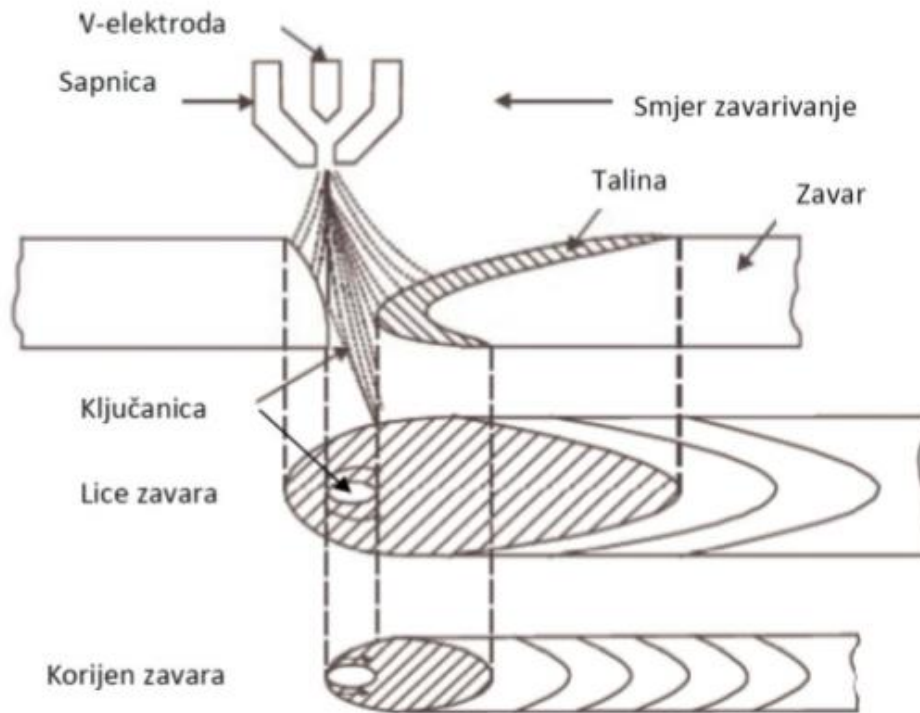
Ovo je područje zapravo najbližije TIG-u. Jačina struje kod plazma zavarivanja taljenjem je u rasponu od 15 do 100 A. Koristi se za precizne i visokokvalitetne zavare kod materijala debljina od 0,5 mm do 3,2 mm, a sve zbog stabilnosti luka i pouzdanog prijenosa. Sprječavanje pregrijavanja vrha sapnice, a da se kvalitetno može koristiti plazma zavarivanje taljenjem treba odabrati pravilnu širinu unutarnjeg otvora sapnice i preciznom kontrolom jakosti struje. Dodavanje dodatnog materijala može biti strojno ili ručno.[18] Na slici 17 prikazan je funkcijski dijagram plazma zavarivanja.



Slika 17 Funkcijski dijagram plazma zavarivanja taljenjem [25]

### 5.4.3. Metoda ključanice

Za zavarivanje metodom ključanice nije potrebna priprema spoja žlijebljenjem. Priprema spoja nije potrebna zbog svojstva velike penetracije koje se dobiva potpunim protaljivanjem u jednom prolazu. Mehanizirano vođenje je obavezno zbog veće brzine postupka i jače struje. Karakteristike metode ključanice su što se koriste jačine struje više od 100 A. Zbog djelovanja plazmenog mlaza dobivaju se rupe na šavu tijekom zavarivanja odnosno stvara se takozvana ključanica, kao što je prikazano na slici 18.



Slika 18 Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom [18]

„Površinska napetost prisiljava rastaljeni metal da teče oko plazmenog mlaza, a da se potom slijeva samostalno formirajući korijen žlijeba zavara i tako stvara rupu u obliku ključanice. Tako se postižu izrazito visoke brzine s kvalitetnim zavarom.“[18] Metodom ključanice moguće je provariti materijale debljina od 1,5 do 12 mm, ovisno o materijalu. Energija koja nastaje stvaranjem luka nalikuje laserskoj zruci te se energija raširi po čitavoj dubini metala, a ne na površini metala. Kod zavarivanja metodom ključanice važnu ulogu ima nagib pištolja odnosno primjena desne i lijeve tehnike zavarivanja.[18, 26]

U usporedbi s TIG-om, metoda ključanice svodi na minimum troškove pripreme spoja i potrebu za dodatnim materijalom. Metoda ključanice pogodna je za zavarivanje svih vrsta materijala, no najčešće se upotrebljava za nehrđajuće čelike. Plazma zavarivanje metoda ključanice primjenjuje se u mehaniziranim uvjetima zbog potrebe vođenju promjena parametara kako bi se održao efekt ključanice.[13]

## 5.5. Parametri zavarivanja

Kod plazma zavarivanja ima mnogo parametara koje je potrebno podesiti kako bi se postigao stabilan proces. Najvažniji parametri su kako slijedi [18]:

- Promjer unutarnje sapnice (najčešće 0,6 do 4 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 spoja 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 upravljačkog (pilot) luka – najčešće do 10 A, ovisno o konstrukciji uređaja. Kod nekih uređaja je to fiksna vrijednost, ali se kod novijih izvora ista može mijenjati.
- Promjer volframove elektrode – ovisno o potrebnom strujnom opterećenju može se povući analogija s TIG postupkom. Za manje struje potreban je manji, dok je za veće struje potreban 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 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 i 18 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 s 2 do 5% vodika ili dušika ako se radi o dupleks čelicima. Za zaštitu korijenske strane koriste se argon i mješavine 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 lijeve ili desne tehnike te nagibom pištolja utjecati na karakter penetracije i oblik provara. Udaljenost od radnog komada od 2 do 5 mm ovisi o jačini struje, količini taline i obliku 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 te reducira unos topline što je važno kod tankih materijala.
- Predprotok i postprotok plina - za čišćenje prostora u kojem će nastati plazmeni mlaz potrebno je nekoliko sekunda propuhati zaštitni i 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 do 2 m/min).

## 6. Specifičnosti plazma zavarivanja nehrđajućih čelika

Zavarivanje plazmom većinom se koristi u uzdužnom zavarivanju cijevi i spojnica. Nakon zavarivanja cijevi potrebna je toplinska obrada zbog visokih temperatura i promjena mikrostrukture uz šav zavara. U obzir treba uzeti i ekonomičnost plazma zavarivanja i naknadnu toplinsku obradu.

Plazma zavarivati se mogu folije i do 4 mm debljine, ali i debljine do 18 mm uz plazmeni plin koji je mješavina argona i vodika gdje je udio vodika 5-8%. Plazma zavarivanje standardnih 22% Cr čelika pokazuje se kao dobar postupak, dok kod austenitno-feritnih čelika dolazi do znatnih problema, jer se formira sigma faza koja uzrokuje gubitkom udarnih svojstava materijala.[27]

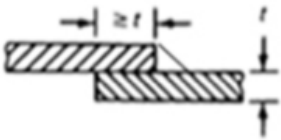


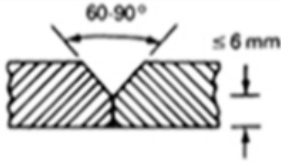
Za svaki postupak zavarivanja važno je da rubovi spojeva i dodatni materijali budu čisti i bez oksida, organskih materijala ili drugih kontaminacija. Toplinski rezani rubovi moraju se očistiti kako bi se uklonio oksidni film. Grubo obrađene površine kod pripreme ruba zavara trebaju se izbjegavati da se spriječi nakupljanje nečistoća. Kod nehrđajućih čelika za zavarivanje lukom unos topline treba smanjiti kako bi se smanjile deformacije i minimizirala mogućnost osjetljivosti zone zahvaćene toplinom. To je posebno važno za standardne austenitne nehrđajuće čelike.[28]

Visokokvalitetni zavarni spojevi od nehrđajućeg čelika moraju biti čisti. Izbor četkanja, odmašćivanja, kiselog četkanja, brušenja ili jednostavno brisanje ovisi o količini prljavštine. Postupak kako pravilno pripremiti materijal za zavarivanje [4]:

1. Ukloniti svu vlagu puhanjem suhim zrakom ili grijanjem plamenom. Paziti na vlagu u zračnim vodovima, vlažne krpe i vlagu taloženu preko noći.
2. Eliminirati organska onečišćenja poput ulja, boja, sredstava protiv prskanja, masti, tragova olovke, smjesa za rezanje, ljepila sa zaštitnog papira, sapuna koji se koriste za ispitivanje curenja i sl.
3. Nehrđajući čelici ne mogu se rezati plamenom. Prihvatljivi rezultati postižu se elektrolučno plazmenim rezanjem
4. Posebno obratiti pozornost kako bi se izbjeglo onečišćenje cinka. Ne koristiti četke ili alate koji su prethodno bili korišteni na pocinčanom čeliku.
5. Na nehrđajućem čeliku koristiti samo žičane četke od nehrđajućeg čelika

Odluka o obliku materijala za zavarivanje ovisit će o nekoliko čimbenika. Oni uključuju dostupne oblike potrebnog materijala za punjenje, dostupnu opremu za zavarivanje, dimenzije zavarivanja i broj komada za zavarivanje. U tablici 10 prikazane su tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja.

Tablica 10 Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja [18]

Vrsta spoja	Preporučena debljina [mm]	Priprema spoja	Način zavarivanja	Broj prolaza	Napomena
Preklopni	0,5 do 1,0		Mikroplazma	1	Rub potpuno pretaliti. 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 dodatnim materijalom

Opći zahtjevi koji su preporučeni za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja austenitnih čelika su [8]:

- izbor dodatnog materijala koji osigurava sadržaj  $\delta$  – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno je dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- električni luk držati što kraćim,
- odabrati pravilan vrh i volfram za amperažu,
- bitna je vrsta i čistoća zaštitnih plinova te omjer miješanja istih,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavanje, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100°C do 150°C,
- međuprolazna temperatura treba biti najviše do 100°C,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- posebnu pozornost obratiti na naprave za stezanja i redosljed zavarivanja zbog velikih deformacija,
- ne smije se ravnati s plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić i četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika.

Problematika plazma zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika je ta što može doći do pojave interkristalne korozije. Pojava interkristalne korozije odnosno izlučivanje karbida na površini može se spriječiti [8]:

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

Prilikom zavarivanja postoji mogućnost izlučivanja sigma ( $\sigma$ ) i hi ( $\chi$ ) faze, koje nepovoljno utječu na zavareni spoj radi smanjenja žilavosti, istezljivosti i smanjenja korozijske otpornosti. Također, problem se može javiti pojavom toplih pukotina koje su uzrok unošenja nečistoća, posebno fosfora i sumpora u zavar metala. Djelovanjem naprezanja tijekom hlađenja zavarenog spoja dolazi do nastajanja toplih pukotina na mjestima gdje se nalaze nečistoće.[8]

Problemi prilikom zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika predstavlja i stvaranje sigma ( $\sigma$ ) faze, koji je intermetalni spoj kroma i željeza veće tvrdoće, krhkosti, ali slabe otpornosti na koroziju. Osim toga, moguća je pojava izlučivanja Cr karbida, a pri dugotrajnom zagrijavanju na temperaturi između 400°C i 540°C, može se pojaviti takozvana „krhkosti 475“.[8]

U tablici 11 dani su nedostaci i prednosti plazma zavarivanja čelika.



Tablica 11 Prednosti i nedostaci plazma zavarivanja [29]

Karakteristike	Prednosti	Nedostaci
Zaštićena elektroda	Manja opasnost od kontaminacije i dulji vijek trajanja.	Skuplja, kompleksnija, velika oprema hlađenja, nemogućnost zavarivanja u malim prostorima.
Duljina luka	Kontinuiran i stabilan zavar bez potrebe automatske kontrole luka. Razmak između elektrode i osnovnog materijala nije kritična veličina kao dok TIG-a.	TIG je fleksibilniji i jeftiniji postupak.
Stabilan prijenos luka	Pogodan za zavarivanje tankih stijenki, žica i minijaturnih komponenata bez pojave iskre.	
Mala površina ZUT-a	ZUT je uzak i paralelnim rubovima smanjuje kutne deformacije.	
Stabilnost luka prilikom zavarivanja	Zavaruje mjesto na koje je pištolj naciľjan.	Na stabilnost utjeće plazmeni i zaštitni plin čija je potrošnja veća u odnosu na druge postupke.
Minimalna VF utjecaj	Nakon starta upravljačkog luka gubi se potreba za VF uređaj.	Koristi se samo za inicijaciju upravljačkog luka, nužan VF generator.
Gustoća luka	3 puta gušći od TIG-a, omogućuje uže zavare i veće brzine.	LBW i EBW imaju manju ZUT i veće brzine zavarivanja.
Trajanje zavarivanja do 0,005 s	Kratki i precizni zavari omogućuju točkasto zavarivanje sitnih žica i limova.	S obzirom na prirodu luka plazma postupak ima uske tolerancije pripreme spoja.
Zavarivanje na strujama niske jakosti (0,05A)	Dozvoljava zavare minijaturnih komponenti i dobru kontrolu u pozicioniranju luka na osnovni materijal.	Ako je promjer sapnice preuzak, vijek trajanja joj se bitno smanjuje.
Razlike u promjeru otvora sapnice	Postižu se različite tehnike zavarivanja ovisno o promjeru.	Ako je promjer sapnice preuzak, vijek trajanja joj se bitno smanjuje.

## 7. Eksperimentalni dio

### 7.1. Opis eksperimentalnog rada

Eksperimentalan rad proveden je u pogonu tvrtke Oprema d.d. Cilj eksperimentalnog rada jest opisati postupak plazma zavarivanja kod nehrđajućih čelika, odnosno opisati plazma zavarivanje kod proizvodnje cijevi. Cijevi se proizvode od nehrđajućeg čelika: X5CrNi18-10 dvaju različitih dobavljača. Za cijevi promjera 10 mm nabavlja se traka širine 30 mm i debljine 0,5 mm. Automatiziranim postupkom valjaka traka se savija u šest koraka te se automatizirano plazma zavaruje. Pošto je potrebno dobiti cijev promjera 8 mm zavarena cijev se prvo kalibrira na 9 mm, a zatim na 8 mm. Nakon kalibracije, cijev je potrebno omekšati radi daljnje lakše obrade. Cijev se provjerava između svakog postupka vizualno, magnetski i kemijski. Konačni cilj je otkriti moguće pogreške kod zavarivanja.

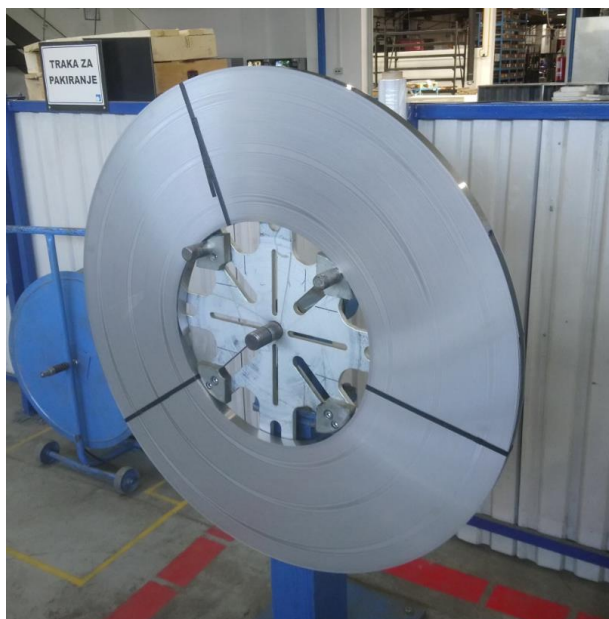
### 7.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je nehrđajući čelik naziva X5CrNi18-10. Utvrđena mehanička svojstva navedenog materijala koja su dobivena atestom materijala, prikazana su u tablici 6. Radi se o visokolegiranom austenitnom nehrđajućem čeliku kojeg odlikuje dobra čvrstoća i odlična korozivna otpornost zbog malog udjela ugljika. Tablica 12 prikazuje kemijski sastav osnovnog materijala. Više o navedenom čeliku opisano je u poglavlju 4.1.

Tablica 12 Kemijski sastav materijala

MATERIJAL	max %				% Cr	% Ni	% Mo
	% C	% Si	% Mn	% P			
X5CrNi18-10	0,03	1,00	2,00	0,045	17,5-19,5	8-10,5	/

Na slici 19 prikazani je kolut trake nehrđajućeg austenitnog čelika X5CrNi18-10 koji se koristio u proizvodnom procesu. Širina trake je 30 mm dok je debljina 0,5mm, a masa koluta 160 kg.



Slika 19 Kolut trake 30x0,5

### 7.3. Oprema za zavarivanje

Kao izvor za plazma zavarivanje korišten je uređaj tipa „PMI-350 TL“ marke SBI international, prikazan na slici 20. Navedeni uređaj može se koristiti za plazma zavarivanje i TIG zavarivanje. Najveća moguća struja zavarivanja iznosi 350 A pri intermitenciji od 35%. Uređaj je težine 110 kg te nije pogodan za prenošenje pa se koristi u automatiziranim sustavima. Zbog toga je opremljen vodenim hlađenjem i ne smije raditi na temperaturi većoj od 45°C. Uređaj se primjenjuje za zavarivanje konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika i aluminija.

Tehničke karakteristike navedenog uređaja za zavarivanje prikazane su u tablici 13.



Slika 20 Aparat za plazma zavarivanje [25]

Tablica 13 Karakteristike aparata za plazma zavarivanje

<b>Napajanje</b>	230V / 50/60Hz
<b>Strujni opseg</b>	3A/12V – 350A/24V
<b>Struja zavarivanja 10min/40°C 35%ED</b>	350 A
<b>Struja zavarivanja 10min/40°C 60%ED</b>	320 A
<b>Struja zavarivanja 10min/40°C 100%ED</b>	290 A
<b>Napon praznog hoda</b>	93,2 V DC
<b>Stupanj zaštite</b>	21S
<b>Dimenzije/dužina/širina/visina</b>	1193/518/937

Pištolj za plazma zavarivanje pričvršćen je na sustav za automatsko zavarivanje. Navedeni uređaj za automatiziranje procesa zavarivanja ima mogućnosti gibanja preko nosača paralelno uz radno mjesto te mogućnost namještanja željene udaljenosti pištolja od radnog komada i upravljanje brzinama zavarivanja.

## 7.4. Zavarivanje

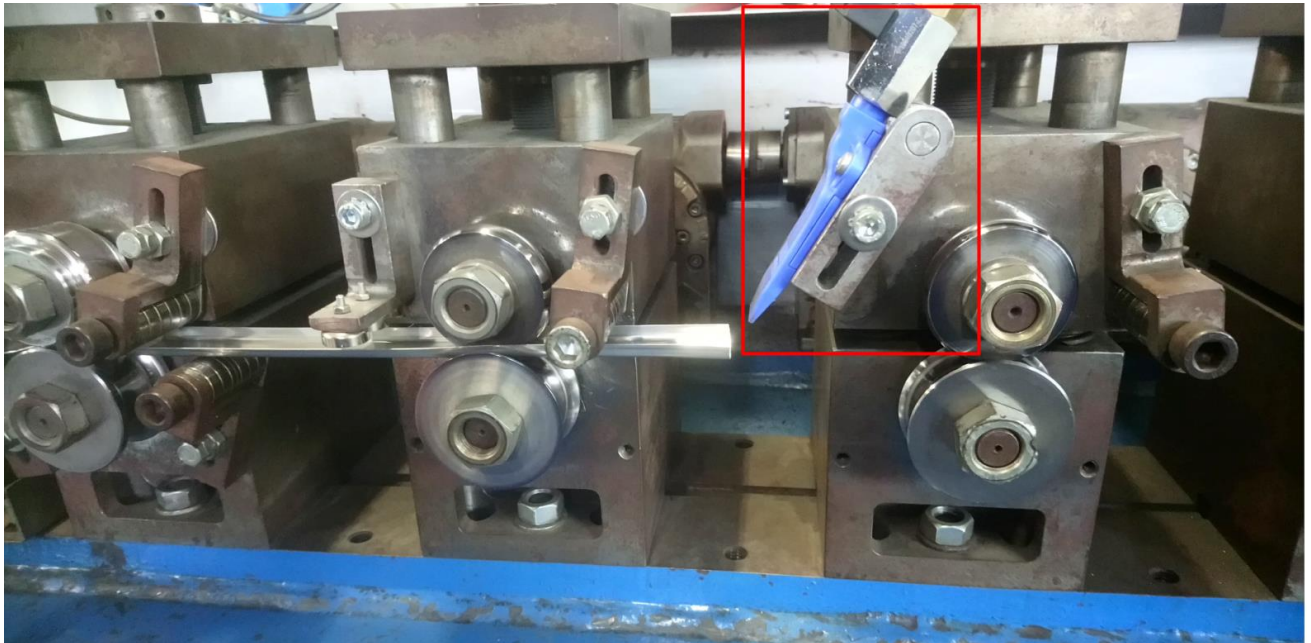
### Priprema zavarivanja

U procesu su korištene trake od nehrđajućeg austenitnog čelika X5CrNi18-10 širine 30 mm i debljine 0,5 mm. U ovom procesu zavarivanja sučeljeni je spoj sa „I“ pripremom. Priprema je učinjena tako da se kroz šest različitih valjaka traka širine 30 mm savija u cijev promjera 10 mm. Prvi korak savijanja prikazan je na slici 21.



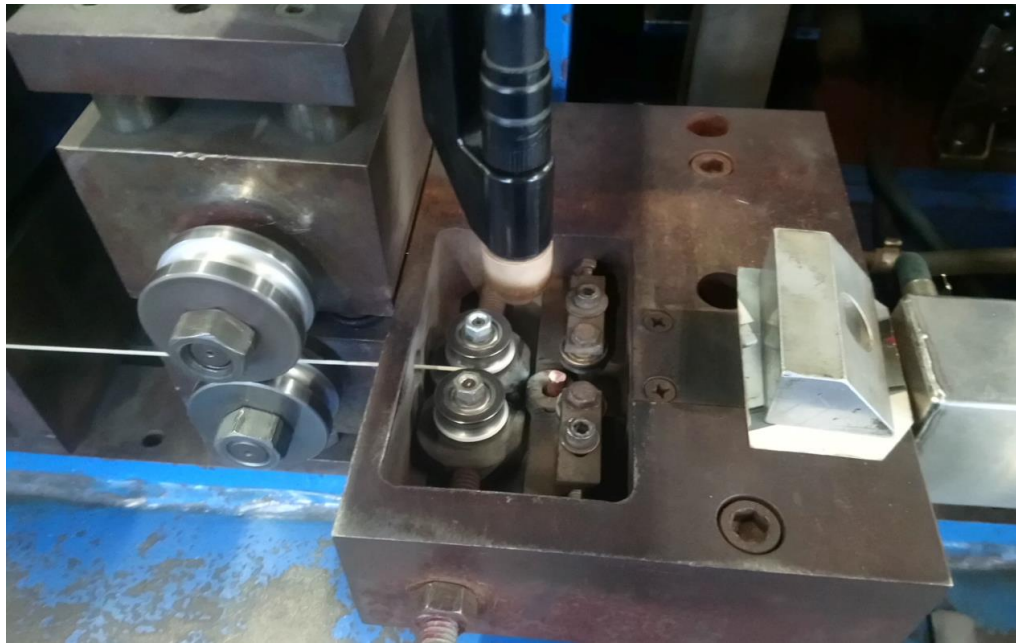
Slika 21 Prvi korak savijanja trake

Površina materijala očišćena je od površinskih nečistoća etanolom i acetonom da se kasnije tijekom procesa i uporabe cijevi izbjegne moguća pojava korozije. Također potrebno je ukloniti moguće krupnije nakupine s površine trake kao što je špena. Za to se koristi sustav ispuhivanja zrakom prikazan na slici 22. Potrebno je voditi računa o obliku spoja, što znači da trake moraju biti što bolje savijene i pozicionirane za dobivanje cijevi što idealnijeg kružnog oblika te da se postigne sučeljeni „I“ spoj i da taj spoj bude okomit na pištolj za zavarivanje.



Slika 22 Čišćenje od fizičkih nečistoća

Priprema pištolja za zavarivanje se sastoji od oštrenja elektrode koja se višestruko koristi pa ju je stoga poslije svakoga zavarivanja potrebno očistiti i našiljiti da bude što tanji i oštiji vrh pošto se postiže kvalitetniji plazmeni luk. Kada se pričvrsti elektroda, sapnice i bakrena podloga se stavljaju u konzolu za zavarivanje. Na slici 23 prikazana je priprema pištolja za zavarivanje i konzole u kojoj se provodi zavarivanje cijevi.



Slika 23 Priprema pištolja za plazma zavarivanje

### **Postupak zavarivanja**

Za izradu cijevi koristi se automatizirani postupak plazma zavarivanja. Kada se traka savije ulazi u komoru gdje se provodi plazma zavarivanje. Za plazma zavarivanje potrebno je koristiti zaštitni i plazmeni plin. Zaštitni plin koji se koristi je Formir 95/5 (95%  $N_2$  + 5%  $H_2$ ), a plazmeni plin je Varigon H 2 – 15 (85%  $Ar$  + 15%  $H_2$ ). Na slici 24 prikazano je radno mjesto proizvodnje cijevi.



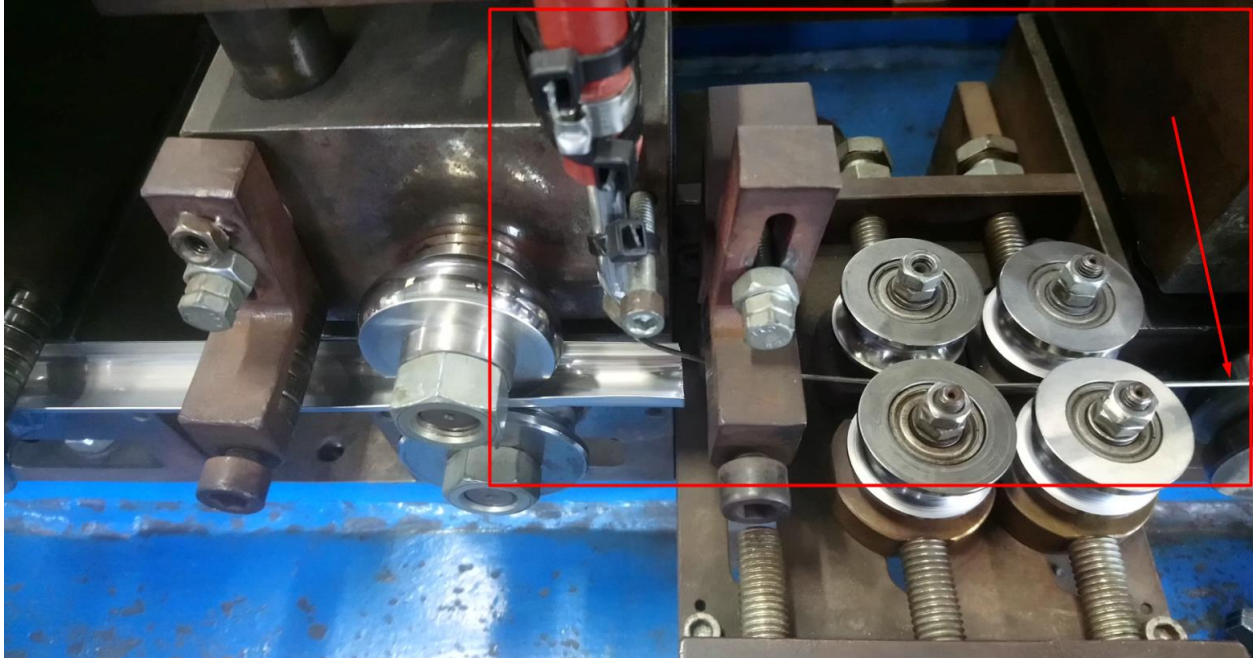
Slika 24 Radno mjesto proizvodnje cijevi

Postupak zavarivanja kreće od pripreme pištolja za zavarivanje. U pištolj se prvo stavlja elektroda koja treba biti šiljasta. Tada se stavlja potrebna sapnica. U komoru za zavarivanje stavlja se bakrena podloška, a zatim se komora zatvara. Podešavaju se parametri zavarivanja na sučelju te se uključuju dotoci zaštitnog i plazmenog plina. Na slici 25 prikazano je paljenje pištolja za plazma zavarivanje.



Slika 25 Paljenje pištolja za plazma zavarivanje

Po potrebi je potrebno podesiti jakost struje, koja se kreće od 60 A do 80 A, zavisno o materijalu trake. Može se uočiti da prema teoriji, jakost struje spada u plazma zavarivanje taljenjem, ali ovdje je to zavarivanje mikroplazmom zbog debljine stijenke od 0,5 mm. Jakost struje utječe na debljinu zavara. Zavar ne smije biti deblji od stijenke cijevi jer nije pogodan za daljnju obradu. Dotok zaštitnog plina izveden je tako da se upuhuje unutar savijene trake i iz pištolja za zavarivanje, dok se plazmeni plin dovodi samo kroz pištolj za zavarivanje. Na slici 26 prikazan je dovod zaštitnog plina unutar cijevi.



Slika 26 Dovod zaštitnog plina u unutrašnjost cijevi

Kada se otvore dotoci plina pali se plazmeni luk i približava se cijevi kako bi započelo zavarivanje. Na slici 27 prikazano je kako savijena cijev spremna ulazi u komoru za zavarivanje, dok se na slici 28 vidi nagli unos topline i provarivanje te se pali automatizirani sustav gdje je brzina zavarivanja 3,5 m/min.



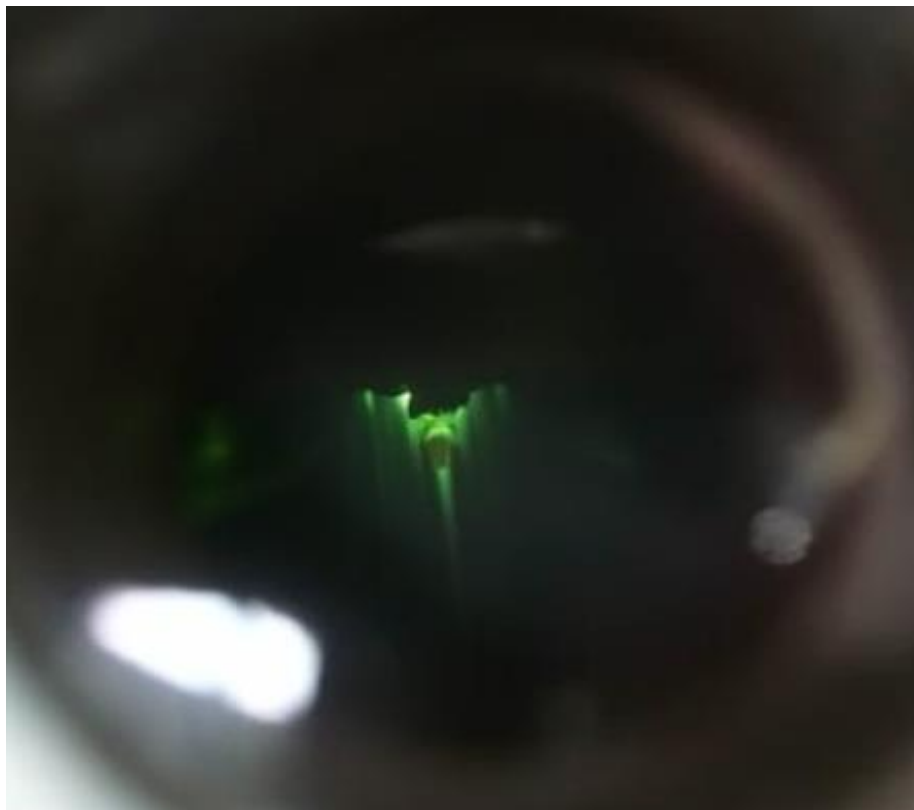
Slika 27 Savijena traka u cijev, ulaz u konzolu za zavarivanje





Slika 28 Početak zavarivanja

Kada se uspostavi dovoljan unos topline kreće kontinuirano zavarivanje. Tijekom samog početka potrebno je poravnati spoj cijevi da bude točno nad vrhom elektrode i korigirati visinu pištolja. Kada cijev izlazi iz komore vrši se kontrola zavara. Na slici 29 prikazani je plazmeni luk.



Slika 29 Plazmeni luk

## Parametri zavarivanja

Konstantni parametri zavarivanja korišteni u pogonu proizvodnje cijevi:

Protok plina: formir 2,5 l/min

varigon 21 l/min

Brzina zavarivanja:  $v_z = 3,5$  m/min

Jakost struje:  $I = 60-80$  A

Napon:  $U = 12-18$  V

Zaštitni plin: formir

Udaljenost vrha elektrode od uzorka: 1 - 3 mm

Promjer elektrode:  $d = 2,4$  mm

Broj prolaza: 1

Bakrena podloga debljine 15 mm

Neutralna tehnika zavarivanja (nagib pištolja od 90 stupnjeva)

Unos topline izračunat je prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{k * U * I * 60}{v_z * 1000}$$
$$Q_1 = \frac{0,6 * 14,4 * 76,2}{3,5 * 1000} = 0,188 \text{ kJ/mm}$$
$$Q_2 = \frac{0,6 * 15,4 * 65,4}{3,5 * 1000} = 0,173 \text{ kJ/mm}$$

gdje je:

$Q$  = Unos topline [kJ/mm]

$U$  = Napon [V]

$I$  = Struja [A]

$v_z$  = Brzina zavarivanja [mm/min]

$k$  = Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja,  $k=0,6$

## Plazmeni plin

Plazmeni plin ionizira se pomoću visokog napona te se kroz plazmu ioniziranog plina propušta struja zavarivanja gdje se dobiva potrebna toplina za zavarivanje. Za plazmeni plin koristi se varigon. U ovome slučaju koristi se varigon koji čini mješavina 97% argona i 3% vodika. Protok varigona kod zavarivanja u procesu iznosi 21 l/min.

## Zaštitni plin

Nehrđajući čelici sklone su u zoni utjecaja topline stvarati okside koji mogu uzrokovati neke oblike korozije, a najčešće je to rupičasta korozija, stoga je potrebno osigurati određeni protok odgovarajućeg inertnog zaštitnog plina koji će štititi zavar tijekom zavarivanja od vanjske atmosfere. Za zaštitni plin odabran je industrijski formir. Formir je mješavina dušika koji sadrži 90% dušika i 10% vodika. Protok formira kod zavarivanja u procesu iznosi 2,5 l/min.

## Usporedba zavarivanja dviju različitih cijevi

Za svaku novu traku treba podesiti nove parametre zavarivanja da se postigne što kvalitetniji i ravniji zavar unutar stijenke cijevi, odnosno da nema brijega od zavara s unutarnje strane stijenke cijevi. Tako je proveden pokus s dvije trake različitih dobavljača istog sastava. Prva traka se zavarivala s parametrima danima u tablici 14. S tim parametrima postignuta je tražena debljina zavara koji zadovoljava sve tražene zahtjeve. Druga traka počela se zavarivati s istim parametrima kao prva traka, ali nakon početne kontrole nisu zadovoljili tražene zahtjeve pa su se podesili na parametre prikazane u tablici 14 pod traka 2.

Tablica 14 Parametri zavarivanja dviju različitih cijevi

<b>Parametri</b>	<b>Traka 1</b>	<b>Traka 2</b>
<b>Brzina zavarivanja [m/min]</b>	3,5	3,5
<b>Jakost struje [A]</b>	76,2	65,4
<b>Napon [V]</b>	14,4	15,4
<b>Udaljenost vrha elektrode [mm]</b>	2	2,2
<b>Promjer elektrode [mm]</b>	2,4	2,4
<b>Broj prolaza</b>	1	1

Problem koji se javio tijekom zavarivanja druge trake s parametrima zavarivanja prve trake je taj što se kod druge trake pojavilo nadvišeno lice zavara. Takav zavar veći je od debljine stijenke i nije pogodan za daljnju obradu cijevi. Također, takav zavar je tamnije boje zbog unosa veće količine topline od optimalne i estetski nije prihvatljiv jer se unutar cijevi hlade tekućine za konzumaciju. Stoga se kod druge cijevi smanjivala jačina struje da se dobije debljina zavara kao debljina stijenke te je bilo potrebno udaljiti vrh elektrode od cijevi. Jačina struje se smanjuje amper

po amper dok se ne postignu traženi zahtjevi. Kod druge trake razlika u odnosu na prvu je 10,6 A, samim time smanjen je unos topline u zavar. Uzmemo li u obzir da se koristi mikroplazma zavarivanje, razlika je velika. Uzrok velike razlike leži u tome što trake nisu od istoga dobavljača. Traka 1 došla je od slovenskog dobavljača, dok je traka 2 došla od talijanskog dobavljača. Tako materijali istoga naziva X5CrNi18-10 očito nemaju iste sastave legiranih elementa te zahtijevaju veliku opreznost zavarivača kod provjere kvalitete zavara.

## 7.5. Kalibriranje

Za potrebe dobivanja manjih promjera od zavarene cijevi provodi se postupak kalibracije. Kalibracija je deformacijski postupak valjanjem kojim se postiže točno određeni promjer cijevi. Tako se s početnog promjera cijevi 10 mm treba dobiti cijevi promjera 8 mm. Za potrebu dobivanja promjera 8 mm potrebne su konusna dijamantna matrica 9 mm i konusna dijamantna matrica 8 mm. Cijevi se magnetski kontroliraju prije ulaska u matrice. Provlačenje kroz matrice provodi se silom od 4 kN. U slučaju potrebe za cijevima manjih promjera, potrebno je nakon kalibracije na promjer 8 mm cijev toplinski obraditi te ponovno kalibrirati na željeni promjer. Na slici 30 prikazan je stroj za kalibriranje cijevi.



Slika 30 Postupak kalibriranja cijevi

## 7.6. Toplinska obrada

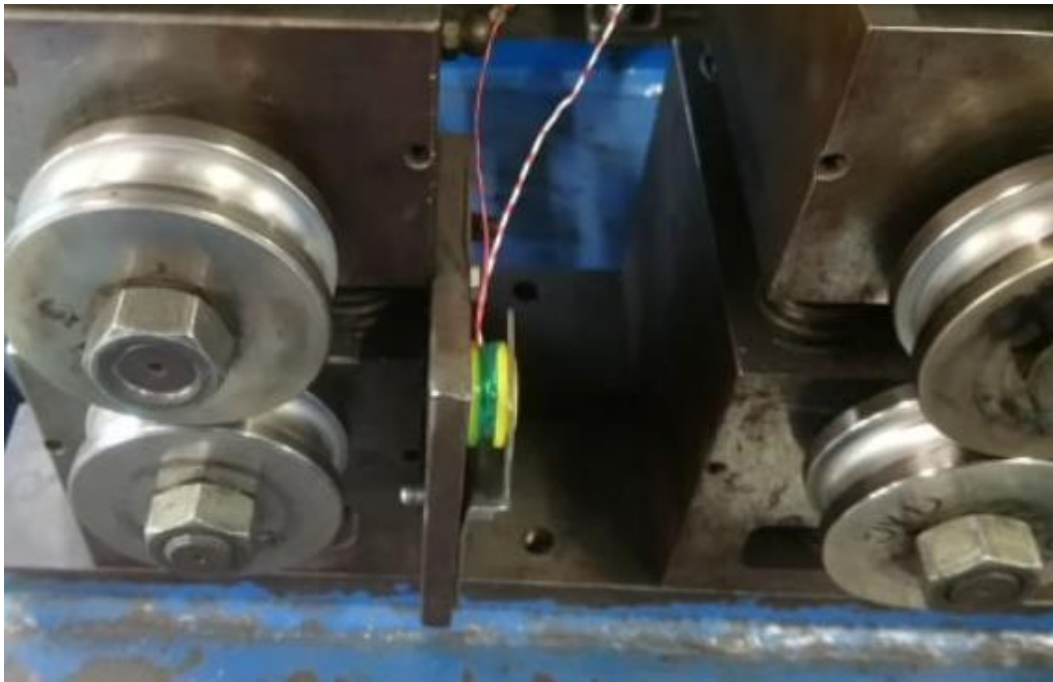
Zbog prethodnog kalibriranja cijevi narušena je mikrostruktura cijevi koja nije pogodna za daljnju obradu stoga ju je potrebno omekšati. Za omekšavanje se koristi peć za odžarivanje cijevi Tip 322-20-160-COMPACT s opcijom transportne trake. Odžarivanje se provodi na temperaturi od 1080°C. Brzina transporta cijevi unutar peći je 70 cm/min. Na slici 31 prikazana je peć za odžarivanje.



Slika 31 Peć za toplinsku obradu cijevi

## 7.7. Vizualna kontrola uzorka

Vizualna kontrola uzorka provodi se tijekom zavarivanja, kalibriranja i nakon toplinske obrade. Tijekom zavarivanja vizualna kontrola provodi se na početku i na kraju koluta cijevi koji sadrži po nekoliko stotina metara cijevi. Tijekom kontinuiranog zavarivanja također se provjerava kontrola zavara, tako da se neposredno iza konzole za zavarivanje nalazi senzor za pukotine, koji je prikazan na slici 32. Senzor radi na principu magnetske indukcije, oko žutog valjka vidljivog na slici 32 namotana je lakirana bakrena žica i pusti se struja kroz zavojnicu. Kada cijev prolazi kroz unutrašnjost žutog valjka javlja je homogeno magnetsko polje gdje je magnetska indukcija konstantna. Kada se pojavi pukotina dolazi do male razlike u magnetskoj indukciji i uključi se alarm.



Slika 32 Kontrola od pukotina nakon zavarivanja

U slučaju pukotine upali se alarm i cijeli postupak staje kako bi operater mogao označiti i ukloniti dio s pukotinom. Sljedeća kontrola provodi se prije kalibriranja na isti način kako i nakon zavarivanja, što prikazuje slika 33.



Slika 33 Kontrola od pukotina prije kalibriranja

Kada se cijev iskalibrira također se provjerava na početku i na kraju koluta. Posljednja kontrola vrši se nakon odžarivanja gdje se provjerava čistoća cijevi na početku i na kraju koluta cijevi. Kod kontrole početka koluta uklanja se prvih nekoliko metara jer cijev nije pročišćena, odnosno ima tragova oksida na unutrašnjoj stijenci cijevi. Na slici 34 prikazana je vizualna kontrola zavora nakon zavarivanja, dok je na slici 35 prikazana vizualna kontrola zavora nakon toplinske obrade. Kod vizualne kontrole kontrolira se boja zavora i ne smije se vidjeti nadvišenje lica zavora u odnosu na stijenkun unutrašnjosti cijevi. Crta koju strelice prikazuju je lice zavora na unutrašnjoj stijenci cijevi.



Slika 34 Vizualna kontrola zavora nakon zavarivanja



Slika 35 Vizualna kontrola zavora nakon kalibriranja i toplinske obrade

## 7.8. Korozijsko ispitivanje

Korozijsko ispitivanje provodi se na cijevima nakon zavarivanja i nakon toplinske obrade. S obzirom na to da se cijevi koriste kod rashladnih uređaja pića, nije dozvoljena njihova korozija. Korozijsko ispitivanje provodi se u dvije tekućine: u običnoj vodi, kako je prikazano na slici 36, i u vodenoj otopini natrijevog klorida, kako je prikazano na slici 37.



Slika 36 Ispitivanje u vodi



Slika 37 Ispitivanje cijevi u vodenoj otopini natrijevog klorida



Vodena otopina natrijevog klorida priprema se tako da se u 2 litre vode stavi 10 dag natrijevog klorida. Ispitni uzorci ostavljaju se 24 sata u obje tekućine, tako da je pola uzorka uronjeno u tekućinu, a ostatak je na zraku. Kada se uzorci izvade iz tekućina, ostavljaju se na zraku 7 dana te se kontrolira ima li na njima znakova korozije. Ako se pojave znakovi korozije na nekom dijelu uzorka, on se proglašava nesukladnim. Tada je potrebno iz daljnjeg procesa proizvodnje ukloniti kolut cijevi s kojeg je uzet uzorak.



Slika 38 Ispitni uzorci nakon ispitivanja u vodenoj otopini natrijevog klorida

Na slici 38 strelicama su označene naslage soli ispod kojih se može razviti korozija. Tada se uzima broj cijevi te se taj kolut pronalazi u skladištu, a zatim cijeli kolut ide na testiranje na koroziju. Cijeli koluti se testiraju samo u vodi i to u periodu od 24 sata kako je prikazano na slici 39. Slika prikazuje kako je kolut cijevi uronjen u vodi.



Slika 39 Ispitivanje koluta cijevi u vodi

Kritično mjesto na kojem se najčešće javlja korozija je mjesto zavora na unutarnjoj strani cijevi, što je teško kontrolirati. Kada se pojavi korozija s vanjske strane stijenke, a nije na mjestu zavora, najčešće je problem u početnoj traci iz koje se rade cijevi, koja ima svoje nedostatke u sastavu materijala ili je oštećena tijekom izrade. Kada se korozija pojavi na zavarnom spoju to je znak unosa prevelike topline i izlučivanja kroma i stvaranje karbida koji pospešuju koroziju. No, može biti i zbog unosa nečistoća tijekom zavarivanja i ako zavarivač ne vodi brigu o količini zaštitnog plina ili ostane bez njega.

## 8. Zaključak

Cilj rada bio je opisati plazma zavarivanje nehrđajućih čelika i moguće probleme koji se javljaju. U radu su izneseni teorijski podaci o nehrđajućim čelicima i plazma zavarivanju te eksperimentalni dio gdje je opisan postupak proizvodnje cijevi od nehrđajućeg čelika. U uvodnom djelu dani su podaci o razvoju i osnovnim karakteristikama nehrđajućih čelika. Nehrđajući čelici po mikrostrukturi podijeljeni su u četiri skupine. Najkorišteniji su austenitni nehrđajući čelici koji imaju širok spektar upotrebe u svim granama, od industrije do dekora.

Plazma zavarivanje je postupak zavarivanja taljenjem nastao iz TIG-a. Plazma zavarivanje nije zastupljeno kao što je bilo za očekivati njegovim otkrivanjem da će se više koristiti od TIG-a. Za plazma zavarivanje najpovoljnije je da je to automatizirani postupak zbog toga što je plazmeni luk uzak i treba velika preciznost za unos velike topline na usko područje. Plazma zavarivanje ima nekoliko načina rada. Najviše se koristi mikroplazma zavarivanje i zavarivanje metodom ključanice. Mikroplazma se koristi kod tankostjenih materijala, dok se metoda ključanice koristi kod debljih materijala. Opisana je oprema koja se koristi kod plazma zavarivanja. Plazmeni i zaštitni plin koji se koriste kod plazma zavarivanja u većini slučajeva su argon ili mješavina argona i vodika u različitim omjerima. Kod plazma zavarivanja bitno je unijeti pravilne parametre zavarivanja za postizanje kvalitetnih zavara.

U eksperimentalnom dijelu zavarivale su se dvije cijevi od različitog dobavljača, materijal koji se koristi je X5CrNi18-10. Trake koje se savijaju u kružni oblik su dimenzija 30x0,5 mm i potrebno ih je zavariti da se dobije cijev. Pošto se radi o debljini stijenke od 0,5 mm, postupak plazma zavarivanja je mikroplazma. Teorijski, za mikroplazma zavarivanje jačina struje je do 15 A, dok se kod postupka zavarivanja cijevi koristi jačina struje u rasponu od 60 A do 80 A. Razlog tome je što se za proizvodnju cijevi traži da debljina zavara bude kao debljina stijenke. U eksperimentu su zabilježeni različiti parametri za dvije različite trake i to od 10 A, a samim time je razlika u naponu. Razlog takve razlike u jačini struje za postizanje debljine zavara kao debljina stijenke bez pregorijevanja je taj što materijali traka nisu od istog dobavljača i samim time nisu istog kemijskog sastava kako dobavljač garantira. Osim promjene jačine struje promijenila se udaljenost vrha elektrode od cijevi za 0,2 mm čime se dobiva da se lice zavara stopi s vanjskom stijenkom cijevi i ne primjećuje se šav na cijevi. Izračunate vrijednosti unosa topline kod trake 1 je 0,188 kJ/mm dok je kod trake 2 0,173 kJ/mm, gdje se vidi da jačina struje mijenja unos topline kod zavarivanja. Iako su trake od različitih proizvođača, parametri odstupaju i na trakama od istog proizvođača što zbog zavarivača koji želi postići željenu kvalitetu zavara, što zbog kvalitete trake. Nakon plazma zavarivanja cijevi potrebno je testirati cijevi da na korozijsku postojanost. Ako se tijekom testa pokaže da cijev korodira, a to je najčešće na mjestu zavara, znači da je tijekom

postupka plazma zavarivanja u zavar unesena prevelika toplina te su se na površinu izlučili karbidi ili su unesene nečistoće unutar zavara tijekom zavarivanja.

## 9. Literatura

- [1] [http://www.konimb.hr/blog/sto\\_je\\_inox.html](http://www.konimb.hr/blog/sto_je_inox.html), dostupno 23.5.2020.
- [2] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I.; Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, 4. seminar Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.
- [3] <https://app.aws.org/wj/1998/11/kotecki/>, dostupno 30.5.2020.
- [4] D. Kotecki, F. Armao: Stainless steels properties – how to weld them where to use them, The Lincoln Electric Company, 2003.
- [5] L. Lovrenčić: Nehrđajući čelik – zavarivanje i naknadne površinske obrade, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2019.
- [6] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Slavonski Brod 1998.
- [7] Kožuh, S.: Skripta - Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [8] Juraga I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [9] [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), dostupno 31.5.2020.
- [10] <https://www.scribd.com/document/372705781/Steel-Metallurgy>, dostupno 2.6.2020.
- [11] [http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/zav\\_mat.html](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/zav_mat.html), dostupno 6.6.2020
- [12] „Predavanja i vježbe iz kolegija TEHNOLOGIJA 3; prof.dr.sc. Ivan Samardžić i dipl. ing. stroj. Marko Horvat; Sveučilište Sjever; Varaždin 2019
- [13] I.Hajdu: Primjena aktivacijskog premaza pri plazma zavarivanju austenitnih čelika, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [14] 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), 10.6.2020.
- [15] <https://www.gordonengland.co.uk/pft.htm>, dostupno 11.6.2020.
- [16] 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), 11.6.2020.
- [17] <http://www.weldguru.com/plasma-welding.html>, 12.6.2020.
- [18] Garašić, I., Kožuh, Z., Kralj, S., (2011). Specifičnosti i primjena plazma zavarivanja, Slavonski Brod: FSB
- [19] <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVASPE1.pdf>, dostupno 13.6.2020.
- [20] Gary, R., (2009). The fundamentals of plasma welding [online]. Canadian Industrial Machinery. Dostupno na: <http://www.cimindustry.com/article/welding/the-fundamentals-ofplasma-welding> 13.6.2020.

- [21] D. Delač, Klasifikacija postupaka zavarivanja prema HRN EN ISO 4063, Završni rad, FSB, Zagreb, 2014.
- [22] <http://www.iiwindia.com/pdf/XII-1972-09.pdf>, dostupno 13.6.2020.
- [23] [http://www.processwelding.com/data\\_sheet.pdf/pwsPowderFeed.pdf](http://www.processwelding.com/data_sheet.pdf/pwsPowderFeed.pdf), dostupno 13.6.2020.
- [24] <http://www4.hcmut.edu.vn/~dantn/WT/WT1-c4.pdf>, dostupno 13.6.2020.
- [25] Uputstva za upotrebu za PMI/PSW – 350/500 TL, SBI, version 4.0.2016., 7.1.2017
- [26] Kralj S., Andrić Š.; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilišna tiskara, Zagreb, 1992.
- [27] R. Gunn, Duplex Stainless Steels, Microstructure, Properties and Applications, Woodhead Publishing, 1997.
- [28] [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/BrochureWeldability\\_EN.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_EN.pdf), dostupno 15.6.2020.
- [29] <https://www.pro-fusiononline.com/welding/plasma.htm>, dostupno 14.6.2020.

## 10. Popis slika

Slika 1 Prikaz mehanizma samoobnavljanja pasivnog filma kromovih oksida na površini [2]....	13
Slika 2 Prikaz osnovnih struktura i površinskih nehomogenosti [2] .....	14
Slika 3 Prikaz posljedica pojedinih karakterističnih nehomogenosti površine [2].....	15
Slika 4 Feritna mikrostruktura[2] .....	16
Slika 5 Austenitna mikrostruktura[2] .....	19
Slika 6 Austenitno-feritna mikrostruktura[2] .....	20
Slika 7 Martenzitna mikrostruktura [2] .....	21
Slika 8 Shematski prikaz postupaka zavarivanja taljenjem [13] .....	30
Slika 9 Prikaz odnosa temperature i povećanje zapremljene energije po volumenu plina [15]....	31
Slika 10 Oprema za plazma zavarivanje [13] .....	32
Slika 11 Poprečni presjek pištolja za plazma zavarivanje [17] .....	33
Slika 12 Odnos depozita po satu i jakosti struje kod TIG-a i PAW-a[17] .....	36
Slika 13 Pištolj za plazma navarivanje praškom [23].....	37
Slika 14 Plazma zavarivanje prenesenim lukom [24] .....	38
Slika 15 Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom [24] .....	39
Slika 16 Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom [24].....	39
Slika 17 Funkcijski dijagram plazma zavarivanja taljenjem [25] .....	41
Slika 18 Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom [18].....	42
Slika 19 Kolut trake 30x0,5 .....	50
Slika 20 Aparat za plazma zavarivanje [25] .....	50
Slika 21 Prvi korak savijanja trake .....	51
Slika 22 Čišćenje od fizičkih nečistoća .....	52
Slika 23 Priprema pištolja za plazma zavarivanje .....	53
Slika 24 Radno mjesto proizvodnje cijevi .....	53
Slika 25 Paljenje pištolja za plazma zavarivanje .....	54
Slika 26 Dovod zaštitnog plina u unutrašnjost cijevi .....	55
Slika 27 Savijena traka u cijev, ulaz u konzolu za zavarivanje .....	55
Slika 28 Početak zavarivanja .....	56
Slika 29 Plazmeni luk .....	56
Slika 30 Postupak kalibriranja cijevi .....	59
Slika 31 Peć za toplinsku obradu cijevi .....	60
Slika 32 Kontrola od pukotina nakon zavarivanja.....	61
Slika 33 Kontrola od pukotina prije kalibriranja .....	61

Slika 34 Vizualna kontrola zavara nakon zavarivanja.....	62
Slika 35 Vizualna kontrola zavara nakon kalibriranja i toplinske obrade .....	62
Slika 36 Ispitivanje u vodi .....	63
Slika 37 Ispitivanje cijevi u vodenoj otopini natrijevog klorida .....	63
Slika 38 Ispitni uzorci nakon ispitivanja u vodenoj otopini natrijevog klorida.....	64
Slika 39 Ispitivanje koluta cijevi u vodi .....	65



## 11. Popis tablica

Tablica 1 Feritni nehrđajući čelici [5] .....	17
Tablica 2 Austenitni nehrđajući čelici [5] .....	18
Tablica 3 Utjecaj pojedinih elemenata na strukturu austenitnog nehrđajućeg čelika [6] .....	18
Tablica 4 Austenitno-feritni nehrđajući čelici [5] .....	20
Tablica 5 Martenzitni nehrđajući čelici[5] .....	21
Tablica 6 Mehanička svojstva nekih austenitnih nehrđajućih čelika [9] .....	23
Tablica 7 Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika [6] .....	25
Tablica 8 Odabir promjera i kuta vrha volframove elektrode s obzirom na jačinu struje [16] .....	34
Tablica 9 Prikaz područja rada pojedine metode plazma zavarivanja [18] .....	40
Tablica 10 Tipične pripreme spoja kod plazma zavarivanja [18] .....	46
Tablica 11 Prednosti i nedostaci plazma zavarivanja [29] .....	48
Tablica 12 Kemijski sastav materijala .....	49
Tablica 13 Karakteristike aparata za plazma zavarivanje .....	51
Tablica 14 Parametri zavarivanja dviju različitih cijevi .....	58



SVEUČILIŠTE  
SIEVER

IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, IVAN BETHLEHEM (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom PLAZMA ZAVARIVANJE NEHRAJIVIH ČELIKA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

IVAN BETHLEHEM

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, IVAN BETHLEHEM (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom PLAZMA ZAVARIVANJE NEHRAJIVIH ČELIKA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

IVAN BETHLEHEM,

(vlastoručni potpis)