

# Plazma rezanje

---

**Božičević, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:186:869697>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences - FHSSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
FILOZOFSKI FAKULTET  
ODSJEK ZA POLITEHNIKU**

**ZAVRŠNI RAD  
PLAZMA REZANJE**

**Rijeka, 2017.**

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
Filozofski fakultet  
Odsjek za politehniku

Studijski program: Preddiplomski studij politehnike  
Student: Luka Božičević, mat. broj:

Tema završnog rada: Plazma rezanje

Mentor: Prof.dr.sc. Marko Dunder

Rijeka, 2017.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**Odsjek za politehniku**  
Rijeka, Sveučilišna avenija 4.  
**Povjerenstvo za završne i diplomske ispite**

U Rijeci, .6.2017.

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupnik: Luka Božičević**

**Zadatak: Plazma rezanje**

**Rješavanjem zadatka potrebno je obuhvatiti sljedeće:**

1. Uvod. Razvoj i primjena tehnologije rezanja.
2. Plazma – definicija plazme rezanja
3. Zaštitni plinovi i plinovi za rezat plazmom
4. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija (standardna plazma), rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin) i rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka
5. Eksperimentalni dio – parametri procesa i geometrijska specifikacija proizvoda (EN ISO 9013:2002) pri rezanju materijala S275JR2 debljine 0,5 do 3 mm.
6. Zaključak

U završnom se radu obavezno treba pridržavati **Pravilnika o završnom radu i Uputa za izradu završnog rada sveučilišnog preddiplomskog studija.**

**Zadatak uručen pristupniku: .6.2017.**

**Rok predaje završnog rada: .9.2017.**

**Datum predaje završnog rada: \_\_\_\_\_**

**Koordinator povjerenstva za  
diplomske ispite:**

**Zadao zadatak:**

**Doc.dr.sc. Tomislav Senčić**

**Prof.dr.sc. Marko Dunder**

## **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam Završni rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Filozofskom fakultetu u Rijeci odsjeka za Politehniku, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora prof.dr.sc. Marka Dundera, kome se srdačno zahvaljujem.

Nadalje se zahvaljujem svojim roditeljima i obitelji koji su mi kroz cijelo vrijeme mog školovanja potaknuli i bili najveća podrška.

Luka Božičević

---

## **POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Preneseni i nepreneseni plazmeni luk rezanja

Slika 2.2. Nepreneseni luk

Slika 2.3. Preneseni luk

Slika 2.4. Početak plazma rezanja

Slika 2.5. Ionizacija plazmenog plina

Slika 2.6. Stvaranje glavnog luka

Slika 2.7. Putanja plazmenog luka do radnog komada

Slika 2.8. Plazma rezanje

Slika 4.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija

Slika 4.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin)

Slika 4.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka

Slika 5.1. Brzina rezanja u ovisnosti o debljini materijala

Slika 5.2. Sustav izvora za plazma rezanje

Slika 5.3. Slika CNC plazma rezač

Slika 5.4. Mlaznica plazma rezača

Slika 5.5. Prikaz tijeka gibanja mlaznice plazma uređaja

Slika 5.6. Prikaz kontrolne jedinice

Slika 5.7. Driveri za pogon motora

Slika 5.8. Izrada crteža u AutoCAD-u

Slika 5.9. LazyCam softver

Slika 5.10. Mach3 softver

Slika 6.1. Primjer uzoraka uz 3 promjene brzine

Slika 6.2. Uzorci nakon plazme rezanja

Slika 6.3. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem

Slika 6.4. Uzorak plazma rezanja uz promjenu struje debljine 3 mm

Slika 6.5. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem debljine 3 mm

Slika 6.6. Uzorak plazma rezanja uz promjenu struje debljine 2 mm

Slika 6.7. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem debljine 2 mm

Slika 6.8. Uzorak plazma rezanja uz promjenu struje debljine 1 mm

Slika 6.9. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem debljine 1 mm

## **POPIS TABLICA**

Tablica 3.1. Prikaz kvalitete reza pojedinim plazma postupcima na određenim materijalima

Tablica 5.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika S275JR2

Tablica 6.1. Prikaz Parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu brzine rezanja

Tablica 6.2. Prikaz Parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu jakosti struje

Tablica 6.3. Prikaz Parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu jakosti struje

Tablica 6.4. Prikaz Parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu jakosti struje

## Sažetak:

IZJAVA.....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
1. Uvod. Razvoj i primjena tehnologije rezanja.....	1
2. Plazma - definicija plazme rezanja.....	3
2.1. Nepreneseni luk.....	5
2.2. Preneseni luk .....	6
2.3. Proces plazma rezanja .....	7
3. Zaštitni plinovi i plinovi za rezanje plazmom.....	10
3.1. Plinovi za rezanje .....	11
3.2. Sekundarni plinovi .....	12
3.3. Smjernice za izbor plina za rezanje plazmom.....	13
4. Postupci rezanja plazmom.....	15
4.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija (standardna plazma).....	15
4.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin).....	16
4.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka .....	17
5. Eksperimentalni dio.....	19
5.1. Parametri procesa .....	19
5.1.1. Izvor struje i napon.....	19
5.1.2. Brzina rezanja.....	20
5.2. Radni materijal .....	21
5.3. Izvor struje.....	22
5.4. CNC plazma rezač.....	24
5.5. Mlaznica plazma rezača .....	25
5.6. Regulacija visine mlaznice za plazma rezanje od radnog komada .....	27
5.7. Kontrolna jedinica za upravljanje plazma stroja .....	28
5.8. Korištenje softvera za plazma rezanje.....	30
6. Pokus plazma rezanje konstrukcijskog čelika S275JR2 .....	32
6.1. Plazma rezanje uz promjenu brzine rezanja.....	32
6.2. Plazma rezanje uz promjenu jakosti struje rezanja materijala debljine 3 mm .....	35
6.3. Plazma rezanje uz promjenu struje rezanja materijala debljine 2 mm.....	37
6.4. Plazma rezanje uz promjenu struje rezanja materijala debljine 1 mm.....	39
7. Zaključak.....	41
8. Literatura .....	42



## **1. Uvod. Razvoj i primjena tehnologije rezanja**

Proces rezanja primarni je postupak metalne industrije u tehnološkom slijedu operacija izrade nekog proizvoda zbog čega je potrebno pomno odabiranje tehnologija rada te osigurati da se proizvodnja odvija bez prekida i u predviđenom vremenskom roku.

Postupak tehnologije rezanja treba biti takav da proizvod nakon obrade rezanja bude spreman za slijedeću tehnološku operaciju (npr. zavarivanje, lijepljenje), odnosno bez potrebe naknadne obrade obrađenog predmeta tj. reza (čist rez, sa što manje deformacija), što u protivnom iziskuje dodatne troškove te povisuje cijenu proizvodnje istog.

Zbog toga je odabir odgovarajućeg postupka rezanja materijala od odlučujuće važnosti za upravljanje troškovima. Tehnologija obrade materijala rezanjem bez naknadne obrade reza snižava troškove što je ujedno i cilj ka putu povećanja konkurentnosti poduzeća. Pri izboru postupka rezanja jedan od važnijih čimbenika je uzeti u obzir troškove rezanja kako bi se dobila stvarna cijena postupka rezanja izražena po satu rezanja odnosno po metru reza. Često se nakon analize može doći i do takvih rezultata kod kojih je postupak rezanja koji je jeftiniji po metru reza u konačnici skuplji uzimajući u obzir i troškove naknadnih operacija. Sve veća internacionalizacija tržišta i pojačani pritisak konkurencije zahtijevaju porast ekonomičnosti proizvodnje u pogonima i postizanje više razine kvalitete.

Plazma rezanje je razvijeno 1950 - tih za rezanje metala koji nisu mogli biti rezani plinskim plamenom, kao što su nehrđajući čelik, aluminij i bakar. U novije vrijeme plazma rezanje koristi sve prednosti automatizacije, mogućnosti integracije s izvorom energije i CNC sustave što rezultira s mogućnošću postizanja velikih brzina rezanja i jako dobre kvalitete rezanja. Pojava i korištenje CNC sustava upravljanja značajno je promijenila proizvodnju, odnosno znatno se smanjio broj koraka koji je zahtijevao prisutnost čovjeka. CNC sustavi su donijeli povećanje automatizacije proizvodnje, postignuta su poboljšanja u kvaliteti reza te je znatno smanjen broj pogrešaka.

U ovome završnom radu obrađena je tema eksperimentalnog dijela plazme rezanja konstrukcijskog čelika S275JR2 debljine 0,5 do 3 mm gdje upravljamo parametrima procesa i geometrijske specifikacije proizvoda pomoću EN ISO 9013:2002 norme. Iako na tržištu plazma rezanju konkuriraju plinsko i laser rezanje, ona ima veliku prednosti u određenim segmentima rezanja.

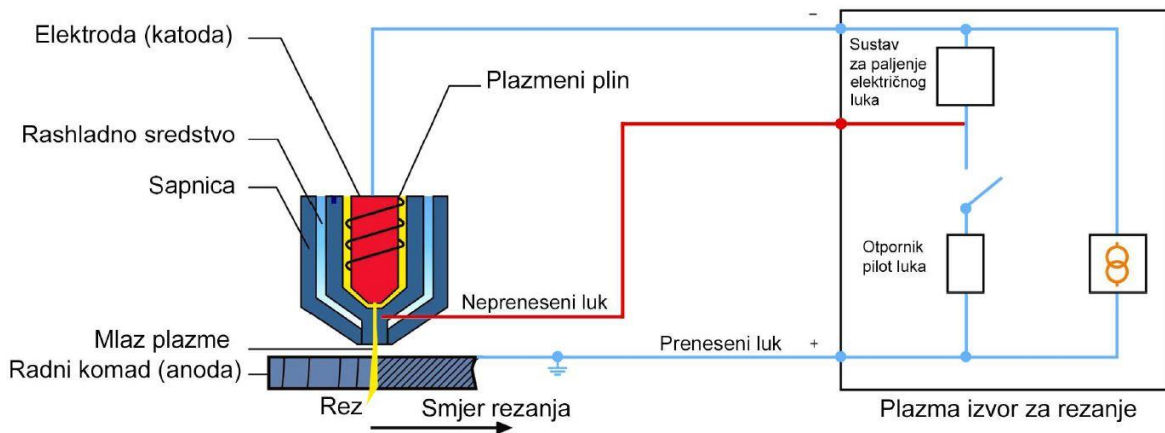
Cilj ovog rada bio je odrediti optimalnu brzinu rezanja za zadani nehrđajući čelik S275JR2 norme EN ISO 9013:2002 te temeljem norme odrediti kvalitetu reza.

## 2. Plazma - definicija plazme rezanja

Plazma je stanje tvari u kojoj su plinovi ionizirani. Slična je fluidu i često je nazivaju četvrtim agregatnim stanjem. Rezanje plazmom je postupak rezanja koji se zasniva isključivo na energiji dovedenoj izvana, to jest energijom termičke plazme koja tali radni komad, a nastalu talinu izbacuje mlaz plinova koji se koriste za stvaranje plazme.

Plazmeni mlaz dobiva se tlačenjem određenog plina kroz električni luk tj. luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na (-) pol izvora struje i radnog komada (preneseni luk) ili sapnice pištolja uređaja (nepreneseni luk). Slika 2.1. prikazuje preneseni i nepreneseni plazmeni luk rezanja. Plazma rezanje veoma je slično postupku zavarivanja plazmom tako što je razlika u konstrukciji gorionika glave za rezanje i dosta višem naponu struje.

Za rezanje se najčešće koristi proces s prenosivim lukom, kojim se mogu rezati svi elektroprovodljivi materijali. Proces s neprenosivim lukom, koristi se za rezanje predmeta manjih debljina (ispod 1 mm) i materijala koji nisu elektroprovodljivi (npr. keramika).



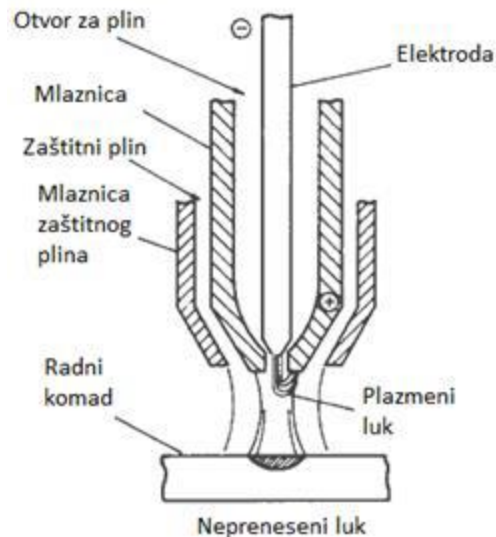
Slika 2.1. Prensene i neprensene plazmene luke rezanja [4]

Električni luk održava se u cilindričnom kanalu hlađenim vodom. U kanal se pod tlakom dovodi plin (Ar, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, njihove mješavine te zrak ili kisik) koji se prolaskom električnim lukom disocira i ionizira zbog toplinske energije električnog luka. Na taj način dobiva se mlaz plazme visoke temperature (20 000 – 40 000°C) i visoke gustoće snage koji može taljenjem rezati sve metale.

Nakon izlaska mlaza plazme iz sapnice dolazi do prenošenja energije preuzete iz električnog luka na radni tj. rezni komad i plin se vraća u stabilno stanje. Postupak rezanja plazmom može biti ručni i strojni. Brzina rezanja plazmom može biti i do 2 m/min, a ovisi o materijalu koji obrađuje, debljini istog i struji električnog luka.

## 2.1. Nepreneseni luk

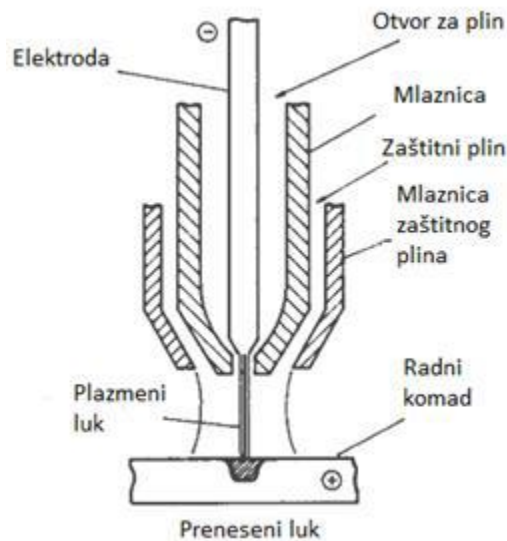
Plazmeni luk se formira između elektrode (negativan pol) i vodom hlađene mlaznice (pozitivan pol). Plazmeni mlaz je istisnut kroz sapnicu preko plazmenog plina. Luk je neovisan o radnom komadu te radni komad nije uključen u strujni krug. Ova vrsta luka koristi se za plazma naštrcavanje ili za jako niske struje kod obrade nemetala. Nepreneseni plazmeni luk ima manju gustoću energije nego preneseni luk te se koristi za plazma zavarivanje taljenjem, prevlačenjem, te za naštrcavanje. Ovaj tip luka se koristi i za zavarivanje keramike, metalnih oplata kao radnih materijala te folija. Princip rada s neprenesenim lukom prikazano je na slici 2.2.



Slika 2.2. Nepreneseni luk [5]

## 2.2. Preneseni luk

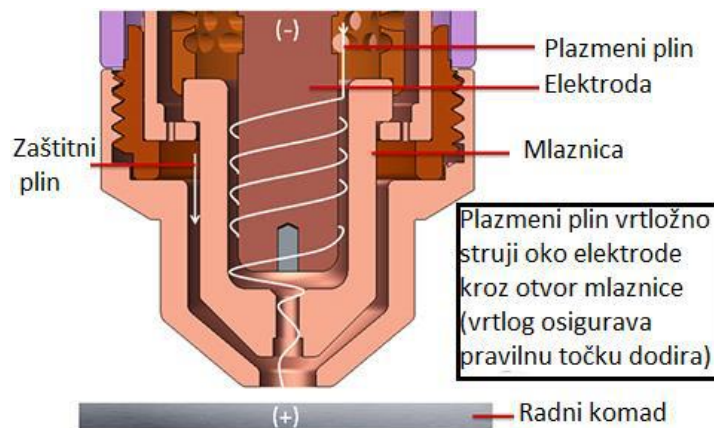
Struja se prenosi od vrha elektrode (negativni pol) kroz otvor pa sve do radnog komada (pozitivan pol) te nazad do izvora struje. Preneseni luk ima veliku gustoću energije te visoku brzinu plazmenog mlaza. Prednosti prenesenog luka su u većoj prenesenoj energiji na radni komad i ovaj tip se najčešće koristi za zavarivanje. Ovakvim lukom mogu se postići velike brzine zavarivanja. Za pokretanje prenesenog luka koristi se otpornik postavljen u strujni krug. Prvo se pali pilot luk koji ograničava struju na oko 50 A koja se uspostavlja između sapnice plazmenog luka i elektrode. Nakon što se dotakne radni komad, glavna struja protječe između elektrode i radnog komada, te se tada pokreće preneseni luk. Temperatura koja se može postići takvim plazmenim lukom iznosi između 8000°C i 25000°C. Princip rada s prenesenim lukom prikazano je na slici 2.3.



Slika 2.3. Preneseni luk [5]

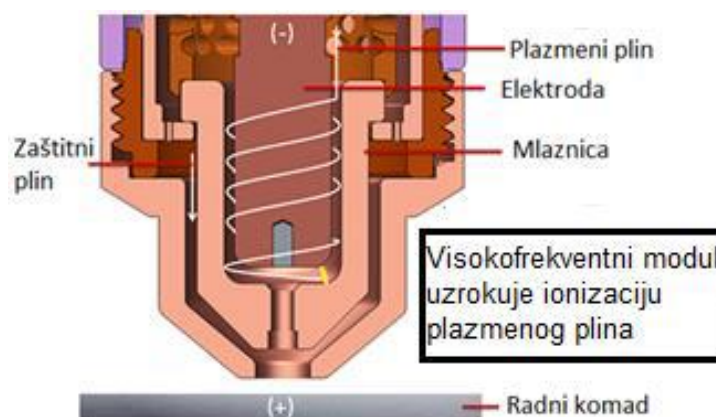
### 2.3. Proces plazma rezanja

Unutar plazmenog pištolja elektroda i unutarnja mlaznica se ne dodiruju, jedna od druge su izolirane vrtložnim prstenom koji ima male otvore za odušak koji transformiraju plazmeni plin u plazmeni vrtlog. Između unutarnje i vanjske mlaznice nalazi se prostor kojim struji zaštitni plin. U trenutku kada je puštena struja, dolazi do generiranja napona te se inicira protok plina kroz crijevo postavljeno na pištolju (Slika 2.4.). Mlaznica je privremeno spojena na pozitivan pol izvora struje, a elektroda na negativan pol.



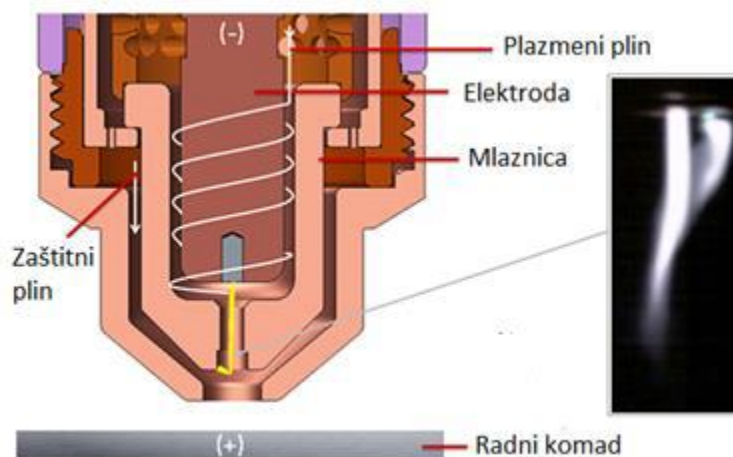
Slika 2.4. Početak plazma rezanja [6]

Visokofrekventnim modulom (uzrokuje ionizaciju plina) uključuje se pilot luk male snage, koji se stvara između elektrode (katoda) i osnovnog materijala (anode). Nadalje se stvara inicijalni plazmeni mlaz (Slika 2.5.).



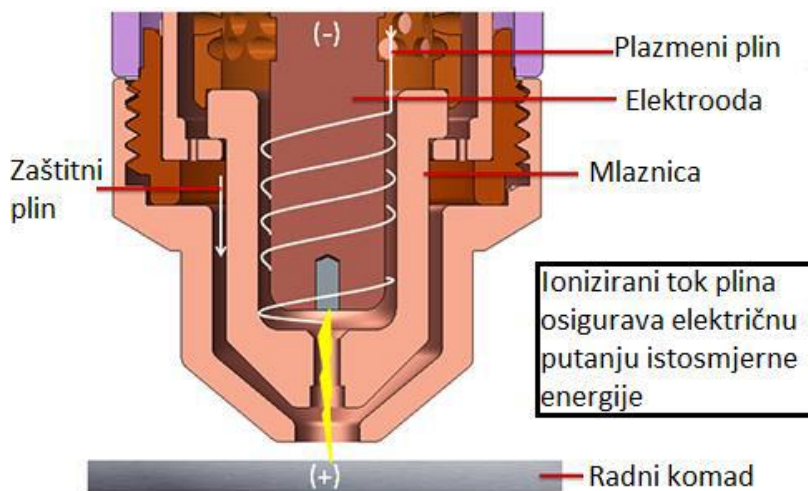
Slika 2.5. Ionizacija plazmenog plina [6]

Jednom kada pilot luk dođe u kontakt s radnim komadom (koji je uzemljen), struja se prelazi s elektrode na radni komad, visokofrekventivni modul se isključuje te je strujni krug zatvoren (Slika 2. 6.) .



Slika 2.6. Stvaranje glavnog luka [6]

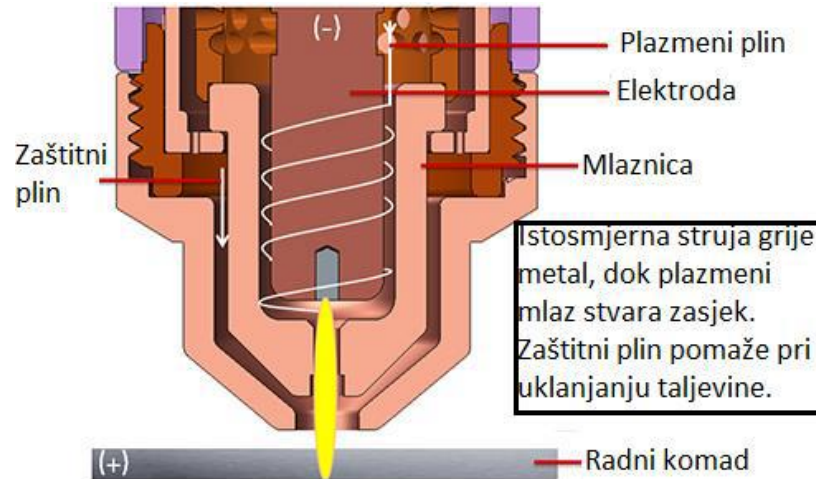
Tada izvor istosmjerne struje generira napon rezanja namješten od strane operatera te se postiže optimalna brzina rezanja za zadani materijal. Kada luk dodirne radni komad dolazi do rezanja i probijanja radnog komada (Slika 7.). Zaštitni plin struji kroz vanjsku mlaznicu, obavija mlaz te na taj način štiti rez.



Slika 2.7. Putanja plazmenog luka do radnog komada [6]



Oblik otvora mlaznice i njen promjer dodatno sužavaju luk plazme što rezultira čistim rezom s vrlo niskim konusom kuta i manjim zasjekom (Slika 2.8.).



Slika 2.8. Plazma rezanje [6]

Dakle, osnovni princip je da je luk formiran između elektrode i radnog komada ograničen veličinom bakrene mlaznice. Na taj način se povećava temperatura i brzina plazmenog mlaza. Temperatura plazme doseže visinu i preko 20 000°C, dok brzina može premašiti i brzinu zvuka. Kada se koristi za rezanje, plazmeni protok plina se povećava kako bi pri dubokom prodiranju u radni materijal višak rastaljenog materijala bio uklonjen.

### 3. Zaštitni plinovi i plinovi za rezanje plazmom

Inertni plinovi poput argona, helija i dušika (osim na povišenim temperaturama) se koriste s volfram elektrodom. Zrak se može koristiti kao plin za rezanje ukoliko su elektrode, hladene vodom, izrađene od bakra s metalnim umetcima, poput hafnija.

Gotovo sva plazma rezanja niskougljičnog čelika učinjena su s jednim od tri vrste plina:

1. Dušik u zaštiti ugljičnog dioksida ili ubrizgavanje vode (mehanizirano),
2. Dušik-kisik ili zrak,
3. Mješavine argon-vodik i dušik-vodik.

Prve dvije kombinacije postale su standard za visokobrzinske mehanizirane procese. Argon-vodik i dušik-vodik (20 do 35 % vodika) se povremeno upotrebljavaju za ručno rezanje, ali s mogućnošću formiranja troske na dnu reza. Prilikom formiranja troske uz prisutnost argona javlja se povećana površinska napetost rastaljenog metala. Površinska napetost rastaljenog čelika nastala uz prisutnost argona 30% je veća u odnosu na njenu pojavu uz prisutnost dušika.

Kod korištenja zraka kao plazmenog plina, mlaz plazme sklon je ukloniti više metala s gornjeg dijela radnog komada nego s donjeg. Rezultat su neparalelni isjecci površina.

Korištenjem argon-vodika mogu se pojaviti nejednoliki profili presjeka koji su kvadratni na jednoj strani i skošeni na drugoj.

### 3.1. Plinovi za rezanje

#### Zrak

1. Uglavnom se koristi za materijale na bazi željeza ili ugljika za dobivanje dobre kvalitete bržim brzinama rezanja.
2. Preporuča se korištenje samo čistog, suhog zraka. Svako ulje ili vlaga u dovod zraka znatno će smanjiti djelotvornost.
3. Zračna plazma se obično koristi sa zrakom kao sekundarnim plinom.
4. Relativno lako dostupan.
5. Vijek trajanja potrošnih materijala je prihvatljiv.
6. Kvaliteta reza je prihvatljiva za većinu materijala, iako kod ugljičnih čelika može doći do pojave nitracije, ili oksidacije koja se obično javlja na aluminiju i nehrđajućem čeliku.

#### Dušik

1. Može se koristiti umjesto plazme sa zrakom.
2. Djelotvornija je od zraka.
3. Daje izvrsnu kvalitetu reza na aluminiju i nehrđajućem čeliku.
4. Za visoku kvalitetu reza treba koristiti čisti dušik.
5. Kvaliteta reza na većini ugljičnih čelika je marginalna zbog pojave nitracije na površini i formiranja troske.
6. Vijek trajanja potrošnog materijala je izvrstan.
7. Dušik zahtijeva veći napon (i energiju) kod prelaska u stanje plazme, ali mu je zato
8. sadržaj energije veliki.

#### Argon / vodik

Koristi se za dualne plinske sustave radi poboljšanja kvalitete reza na nehrđajućim čelicima i aluminiju.

1. Preporučena mješavina je 65% argona i 35% vodika.
2. Preporučeno je korištenje na nehrđajućem čeliku debljine 19 mm i više. Preporučuje se za obojene materijale debljine 12 mm i više. Kombinaciju Ar / H<sub>2</sub> je nepotrebno koristiti za tanje obojene materijale jer jeftiniji plinovi mogu postići sličnu kvalitetu reza.
3. Pruža visoke brzine i visoku kvalitetu reza za deblje materijale.

4. Loša kvaliteta reza na željeznim materijalima.
5. Vijek potrošnog materijala je izvrstan.
6. Premalo H<sub>2</sub> daje grublju površinu reza i zaobljen gornji rub reza, a previše H<sub>2</sub> daje glatku gornju stranu reza, ali na donjem rubu ostaje dio rastaljenog metala.
7. Argon osigurava lagano uspostavljanje luka i njegovu stabilnost, dok mu je s druge strane sadržaj energije manji i cijena nešto veća.

### Kisik

Koristi za dobivanje najbolje kvalitete reza na ugljičnim čelicima.

1. Kisik se preporučuje za rezanje neželjeznih metala.
2. Daje visoke brzine rezanja.
3. Pruža vrlo glatke završne površine i minimizira nagomilavanje nitrida na površine reza (ako se ne uklone, nakupine nitrida mogu uzrokovati poteškoće u proizvodnji visoke kvalitete zavora).
4. Do nedavno vijek dodatnih materijala je bio u granici prihvatljivosti. Danas je trajanje potrošnih materijala poboljšano.

## **3.2. Sekundarni plinovi**

### Zrak

1. Sekundarni zrak obično se koristi kada se radi s plazmom sa zrakom kao reznim plinom te ponekad i s plazmom s dušikom kao reznim plinom.
2. Jeftin - smanjuje operativne troškove.
3. Poboljšava kvalitetu reza nekih željeznih materijala.

### CO<sub>2</sub>

1. CO<sub>2</sub> se koristi kod dušične ili Ar / H<sub>2</sub> plazme.
2. Povećava djelatnost procesa i hlađenje obratka je brže.
3. Koristan za nebojene i obojene materijale.
4. Smanjuje dim kada se koristi s Ar / H<sub>2</sub> plazmom.

### 3.3. Smjernice za izbor plina za rezanje plazmom

U tablici 3.1. prikazane su preporuke korištenja određenih plazmenih plinova za pojedine materijale.

Tablica 3.1. Prikaz kvalitete reza pojedinim plazma postupcima na određenim materijalima

Plin	Debljina materijala (mm)	Materijal		
		Ugljični čelik	Nehrđajući čelik	Aluminij
Plazmeni plin: zrak Zaštitni plin: zrak	< 12	Odlično	Dobro	Dobro
	≥ 12	Odlično	Zadovoljava	Zadovoljava
Plazmeni plin: dušik Zaštitni plin: zrak ili CO <sub>2</sub>	< 12	Odlično	Odlično	Odlično
		Odlično	Odlično	Odlično
Plazmeni plin: Ar/H <sub>2</sub> Zaštitni plin: dušik ili CO <sub>2</sub>	< 6	Nije preporučljivo	Nije preporučljivo	Nije preporučljivo
	Od 6 do 30	Nije preporučljivo	Dobro	Odlično
	≥ 30	Nije preporučljivo	Odlično	Odlično

#### Ugljični čelici:

- Zrak kao plazmeni plin: visoka produktivnost, manje onečišćenje nitridima i oksidima na površini reza
- Kisik kao plazmeni plin: visoka produktivnost, rezna površina bez onečišćenja nitridima

### Cr-Ni čelici:

- Zrak kao plazmeni plin: visoka produktivnost, prihvatljiva kvaliteta reza, potrebna naknadna obrada ako slijedi zavarivanje
- Mješavina Ar H<sub>2</sub>/Ar H<sub>2</sub> N<sub>2</sub> kao plazmeni plin: vrlo čista površina reza

### Aluminij:

- Zrak kao plazmeni plin: visoka produktivnost, prihvatljiva kvaliteta reza
- Mješavina Ar H<sub>2</sub> kao plazmeni plin: izuzetna kvaliteta površina reza

## 4. Postupci rezanja plazmom

Vrste postupaka rezanja plazmom:

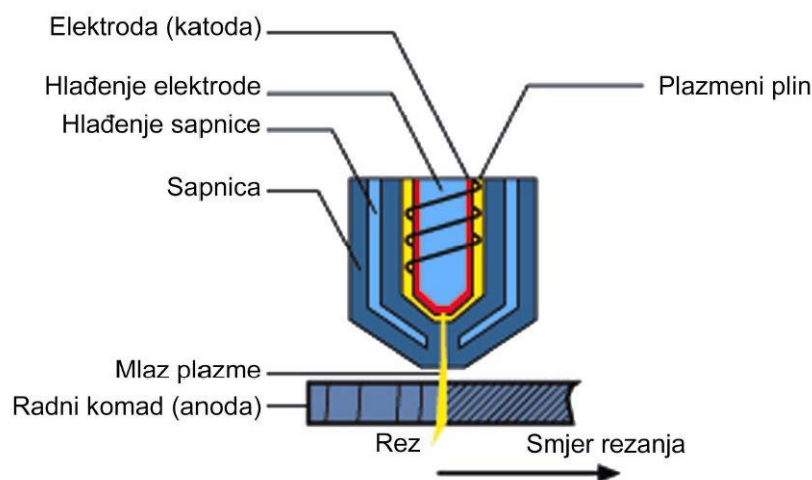
- rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima (standardna plazma),
- rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin) u atmosferskim uvjetima ili u vodi,
- rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka.

### 4.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija (standardna plazma)

Rezanje plazmom bez sekundarnog medija tj. standardna plazma, koristi se kod:

- ručnog rezanja plazmom i žlijebljenja,
- manjeg broja dijelova koji se režu, odnosno manje debljine limova,
- ne previsokih zahtjeva na kvalitetu reza.

Standardni postupak rezanja plazmom prikazan je na Slici 4.1. Za ovakav primjer plazma rezanja postoje mnogobrojni slučajevi primjene s CNC upravljanim sustavima za vođenje plazma pištolja tj. mlaznice kao na primjer kod proizvodnje panela u brodogradnji, gdje je rezanje plazmom neposredna priprema za zavarivanje, kod završne obrade i pakiranja limova u čeličanama te kod robotiziranog rezanja cijevi, I – profila i plosnatih profila s izbočinama. Kod plazma rezanja bez sekundarnog medija koristi se samo jedan plin (zrak, dušik ili kisik) koji ujedno hladi i razvija luk plazme. Uglavnom se ovaj postupak koristi kod ručnih postupaka rezanja, za materijale debljine od 16 mm i struje do 100 A.



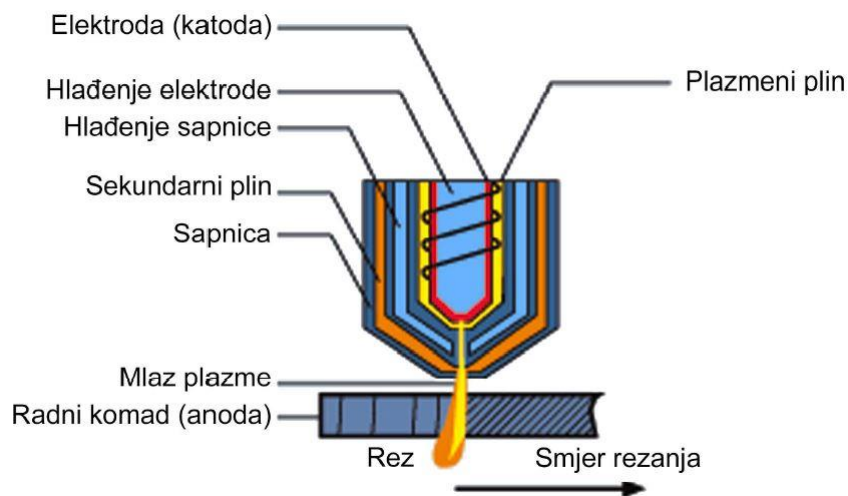
Slika 4.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija [7]

## 4.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin)

Upotreba plazme sa sekundarnim medijem, ima prednost kod:

- proizvodnje manjih dijelova,
- čestog bušenja, odnosno započinjanja rezanja,
- potrebne visoke kvalitete reza, posebno kod Cr-Ni čelika i kod aluminija,
- rezanja rešetaka, odnosno rezova s prekidima,
- podvodnog rezanja plazmom.

Koaksijalno sa sapnicom plazma pištolja nalazi se sapnica za dovod rotirajućeg plina, koji “omata“, odnosno štiti plazmeni plin od utjecaja okolne atmosfere. Sam prikaz plazmenog luka nalazi se na Slici 4.2. Rotirajući plin i sapnica rotirajućeg plina koja je bez potencijala, štite sapnicu od štrcanja rastaljenog metala, koje se događa prilikom bušenja materijala. Kod određenih debljina materijala bušenje se izvodi dok pištolj stoji, pa je tako moguće rezanje malih kontura bez početnog, odnosno ulaznog reza.

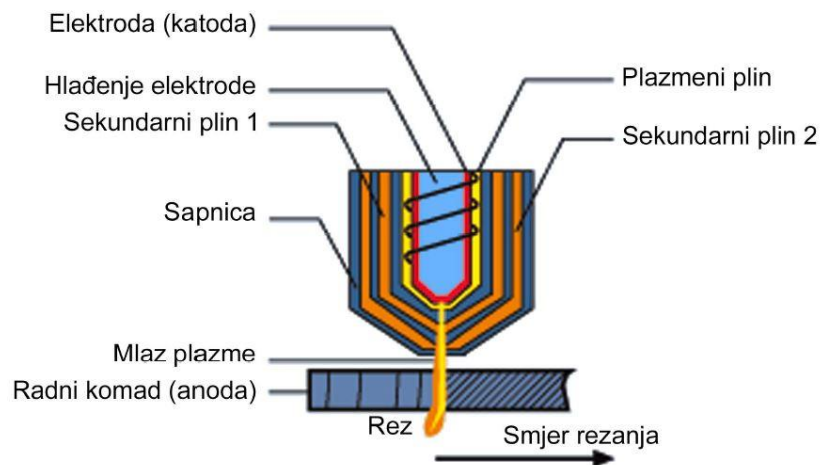


Slika 4.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem (rotirajući plin) [7]



### 4.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka

Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka se dobiva kvalitetan rez kod rezanja tanjih materijala odnosno do 12 mm pri manjim brzinama. Primjer postupka prikazan na Slici 4.3. Poboljšana kvaliteta reza je rezultat korištenja tehnologije povećanog sužavanja luka, odnosno povećanja gustoće energije električnog luka, dok su manje brzine rezanja potrebne kako bi se ostvarili precizniji pomaci kod rezanja.



Slika 4.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka [7]

Cilj rezanja plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka je dobivanje dvije paralelne, ravne površine reza koje su prikladne za daljnju uporabu bez potrebne naknadne obrade nakon rezanja. Ali, ipak površina reza ima određeno odstupanje od toga idealnog oblika.

Posebno u području tankih limova do približno 5 mm debljine, odstupanje može, ovisno o materijalu, razmaku pištolja, jačini struje i brzini rezanja, iznositi do 10°.

Korištenjem novo razvijenog postupka preciznog rezanja plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka (tzv. HiFocus rezanje) odstupanje od pravoga kuta značajno se reducira. HiFocus tehnologija omogućuje dobivanje približno okomitih površina reza za debljine limova od 0,8 do 8 mm i time postizanje značajno veće točnosti. Tehnologija se zasniva na principu rezanja plazmom sa suženim i stabiliziranim plazmenim mlazom.

To se postiže primjenom sapnica manjeg promjera, povećanom rotacijom plazmenog plina i dodatnom primjenom rotirajućeg plina koji do plazmenog luka dolazi kroz koaksijalnu sapnicu bez potencijala. Sapnica za rotirajući plin sprječava i nastajanje tzv. dvostrukih električnih lukova i uništenje sapnice kapljicom rastaljenog metala koje nastaje zbog štrcanja prilikom bušenja rupa.

Za mnoge primjene, visoka kvaliteta reza i preciznost, koja se postiže HiFocus tehnologijom, predstavlja što se troškova tiče povoljniju alternativu u odnosu na rezanje laserom. Pomoću HiFocus uređaja i postrojenja za rezanje plazmom, može se održavati tolerancija radnog komada  $\pm 0,2$  mm.

## **5. Eksperimentalni dio**

Parametri procesa i geometrijska specifikacija proizvoda (EN ISO 9013:2002) pri rezanju materijala S275JR2 debljine od 0,5 do 3 mm.

U eksperimentalnom dijelu cilj je na opći konstrukcijski čelik S275JR2 debljine od 0,5 do 3 mm različitim brzinama rezanja ustanoviti koja je brzina optimalna, tj. s kojom se brzinom dobiva najbolja kvaliteta reza uz ovisnost o jačini plazmenog luka i visini mlaznice.

### **5.1. Parametri procesa**

Kod plazma rezanja postoji puno parametara koje je potrebno podesiti kako bi se osigurao stabilan proces što svakako zahtijeva dobro uvježbane operatere.

Glavni parametri plazma rezanja su:

- Snaga plazme (Jakost struje)
- Brzina rezanja
- Vrsta i količina/protok plazmenog (i sekundarnog) plina/plinske mješavine
- Udaljenost mlaznice od radnog komada

#### **5.1.1. Izvor struje i napon**

Izvori struje za rezanje plazmom su posebno konstruirane jedinice s vrijednošću napona praznog hoda u opsegu od 120-400 V (u odnosu na 70-85 V za izvore struje namijenjene zavarivanju električnim lukom). Izbor izvora struje vrši se na osnovu konstrukcije gorionika plazme koji se koristi, vrste i debljine radnog komada koji se reže i opsega brzine rezanja. Koriste se uređaji istosmjerne struje koje karakterizira konstantna struja sa strmopadajućim naponom.

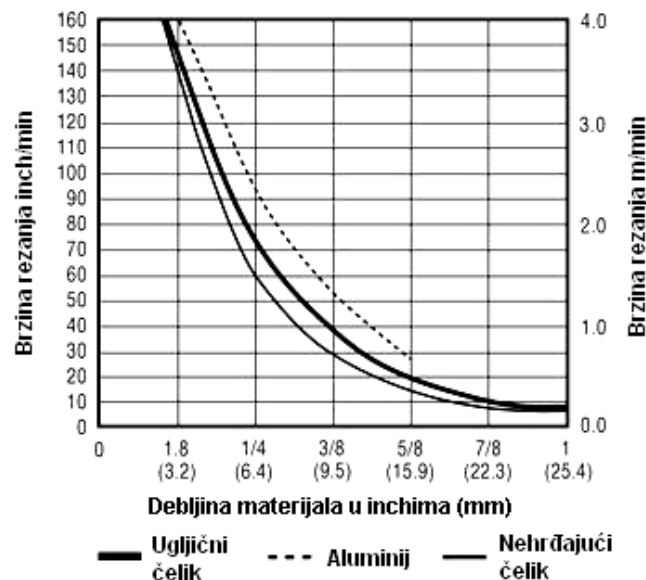
Postupak rezanja plazmom odvija se pri istosmjernoj struji kada je elektroda priključena na negativni pol, prenosivim lukom. Pri težim zahtjevima rezanja zahtijeva se visoka vrijednost napona praznog hoda od 400 V za prorezivanje materijala debljine 50 mm. Izlazna struja iz izvora struje za luk plazme može se kretati od 10-1000 A, u zavisnosti od materijala koji će se rezati, njegove debljine i brzine rezanja.

### 5.1.2. Brzina rezanja

Za visoku ekonomičnost procesa treba osigurati uski rez, visoku kvalitetu i čistoću odsječenog materijala s gornje i donje strane. Za zadani izvor struje i mješavinu plinova postoji optimalna brzina rezanja svake vrste materijala i debljine. Povećana brzina rezanja smanjuje širinu reza uz povećanje kosine izratka, ali jakost struje je ipak najvažniji čimbenik koji uvjetuje širinu reza. Za ručno rezanje kompliciranih rezova optimalna brzina iznosi 1 m/min. Općenito brzine od nekoliko m/min služe za podrezivanje rezova.

Prilikom definiranja brzine rezanja najbolji način je promatranje luka, kada on izlazi iz radnog komada. Ako se koristi zračna plazma, luk treba biti okomit na radni komad tijekom izlaska s donje strane reza ili nula stupnjeva promatrajući ulaz i izlaz luka iz radnog komada. Ako se koristi dušična plazma ili plazma rezanje s argonom / vodikom, luk na izlazu iz komada treba biti suprotan smjeru mlaza.

Brzinu rezanja treba prilagoditi kako bi se dobio kvalitetan rez. Brzina rezanja koja je prespora ili prebrza uzrokovat će probleme kvalitete reza. Kod većine metala postoji prostor između ove dvije krajnosti koji će dati ravne, čiste komade bez troske. Slika 5.1. prikazuje ovisnost brzine rezanja o debljini materijala.



Slika 5.1. Brzina rezanja u ovisnosti o debljini materijala [4]

## 5.2. Radni materijal

Radni materijal je opći konstrukcijski čelik S275JR2 norme EN ISO 9013:2002.

S275JR2 konstrukcijski ugljični i nisko legirani čelik. Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se primjenjuju kod nosivih zavarenih konstrukcija velike mase. Ova skupina čelika najčešće se upotrebljava za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr. Kemijski sastav i mehanička svojstva navedenog čelika prikazana su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika S275JR2

Razred	Kemijski sastav (%)				
	C max	Si max	Mn max	P max	S max
S275JR	0.21	--	1.6	0.045	0.045
Razred	Mehanička svojstva				
	Vlačna čvrstoća (MPa)	Čvrstoća popuštanja (MPa)	% Elongacija u 50 mm/min	Utjecaji na promjenu temperature (°C)	
S275JR	380-540	205-275	13	+20, 0, -20	

Konstrukcijski čelik je ugljični čelik (obični ili plemeniti) s masenim udjelom ugljika manjim od 0,6% ili legirni čelik (uglavnom s manganom, silicijem, kromom, niklom, volframom). Konstrukcijski čelični proizvodi imaju široku primjenu te su bazna sirovina mnogih industrija.

Ti čelici imaju relativno nisku vrijednost vlačne čvrstoće, ali su jeftini i kovljivi. Niskougljični čelici su najčešći oblik čelika jer relativno niska cijena (kao npr. konstrukcijski čelik) ih čini prihvatljivim za mnoge primjene. Niski udio ugljika (do 0,3%C) čelik čini da nije ekstremno krhak niti istežljiv (duktilan), a kada ga se zagrije postaje i kovljiv.[8]

### 5.3. Izvor struje

Današnji izvori su većinom konstruirani s inverterskom tehnologijom i imaju odlične mogućnosti integriranja s robotiziranim CNC sustavima. Upravljanje i kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza.

Mi koristimo konkretno sustav plazme rezanja STAHLWERK 70S (Schweisstechnik)– bez kontaktno paljenje. Izvor struje za plazma rezanje prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2. Sustav izvora za plazma rezanje

Profesionalni 70 amperski inverterski plazma rezač s visokofrekventnim HF bez kontaktnim paljenjem za rezanje čelika, nehrđajućeg čelika, bakra, titana, aluminija do debljine 25 mm, kod upotrebe komprimiranog zraka, karakterizira:

- Primjerno za rezanje svih vrsta metala
- Uzak i precizan rez
- HF bez kontaktno paljenje
- Rezanje debljine do 25 mm

**Tehnički podaci :**

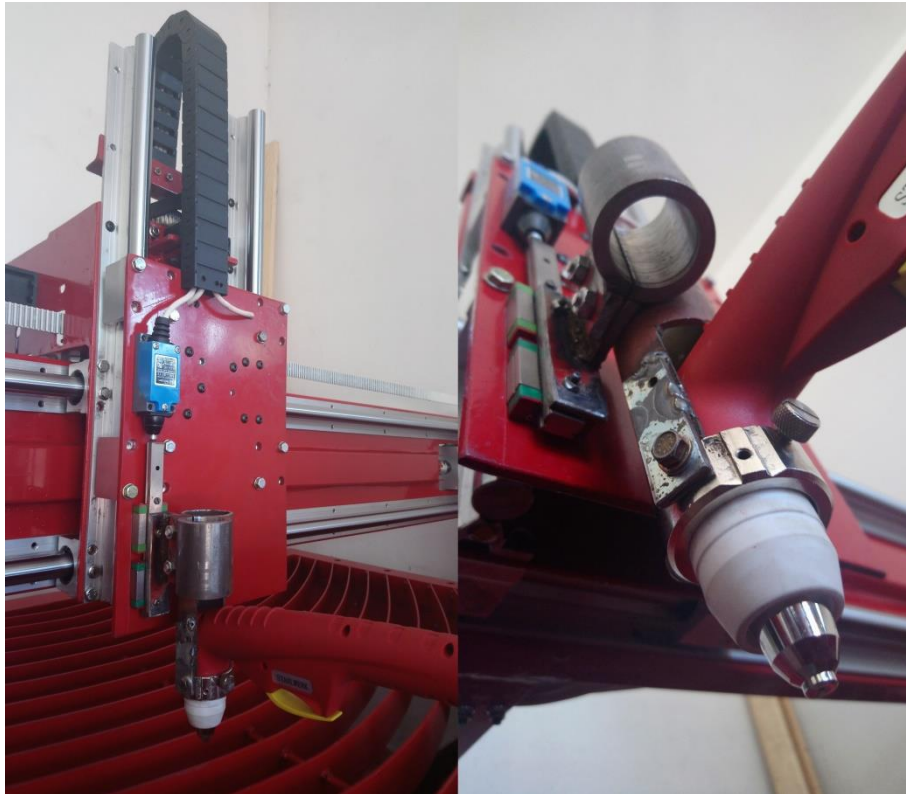
- Priključni napon: 380V / 50/60Hz
- Ulazna struja: 16A
- Strujno područje rezanja: 10 -70A
- Faktor učinka: 70A-60%
- Hlađenje: Prisilno ventilatorsko
- Dimenzije: 490×205×420mm
- Masa: cca. 17 kg

**Komplet uključuje:**

- Inverter STAHLWERK CUT 70 serija S
- CUT cijevi sa gorionikom (SG-55)
- Kliješta za masu
- Reduktor tlaka
- cijevi kompresiranog zraka sa spojkom
- CUT plazma pribor

#### 5.4. CNC plazma rezač

Vodenje rezne glave lasera i plazma pištolja izvodi troosni pozicioni CNC sustav plazma rezača domaće proizvodnje (slika 5.3). Veličina stroja tj. vanjske dimenzije iznose 2300 mm dužine, 1800 mm širine te 1400 mm visine. Masa CNC plazma stola iznosi 380kg.



Slika 5.3. CNC plazma rezač

Radni volumen stroja za plazma rezanje je 2000 mm dužine, 1300 mm širine te 140 mm visine. Stol je sačinjen s dvostranim sinkroniziranim pogonom s 3 pogonska koračna (step) motora NEMA34 od kojih su dva od 12,5 Nm snage dok je jedan 8 Nm snage koji pokreće z-os stroja. Korak po milimetru koračnog motora iznosi 125 mm za x i y osi, a 40 mm za z-os. Maksimalna brzina pozicioniranja i rezanja iznosi 12000 mm/min akceleracije 2000 mm/s<sup>2</sup> za X i Y os dok za Z os iznosi 5000 mm/min akceleracije 3000 mm/s<sup>2</sup>. Preciznost plazma stroja tj. točnost pozicioniranja iznosi 0,008 mm za x i y osi dok za z os iznosi 0,025 mm. Z os nije opremljena senzorom tako da je potrebno samostalno održavanje udaljenosti između sapnice i radnog materijala.



## 5.5. Mlaznica plazma rezača

Kod procesa plazma rezanja koriste se ručno vođeni ili mehanizirano upravljivi plazma pištolji. Postoji nekoliko različitih vrsta i veličina jednih i drugih, a biraju se ovisno o debljini radnog komada.

Plazma pištolj konstruiran je tako da različiti plinovi, bilo plazmeni ili zaštitni, i električna struja mogu istodobno prolaziti kroz sami pištolj bez ikakvog utjecaja jedne veličine na drugu. Pištolji većinom imaju vanjsku oplatu koja štiti unutarnje dijelove pištolja od topline uzrokovane električnim lukom. Isto tako pištolj sadrži izvedben sustav kanalicica za razne plinove (plazmene, zaštitne) koji su propisno odvojeni i zatvoreni jedan od drugoga te sadrži izolacijske materijale kako bi se spriječilo stvaranje električnog luka unutar samog plazma pištolja.



Slika 5.4. Mlaznica plazma rezača

Sastoji je od :

Elektrode – zatajenje elektrode pojavljuje se kada se emitirajući element tako istroši da se emitirani električni luk počinje odbijati od okružujuće bakrene ili srebrene navlake. Jednom kada električni luk dođe u kontakt s tom navlakom, može doći do uništenja cijele elektrode. Kao emitirajući element elektrode u neoksidirajućim okolinama koristi se volfram, dok se hafnij preferira pri rezanju s kisikom.

Sapnice – konstrukcija elemenata sapnice je najvažnija za postizanje optimalne kvalitete rezanja. Sapnica je tako konstruirana da je njen otvor malo veći od promjera fokusiranog ionizirajućeg plina. To omogućava da sapnica sadrži i fokusira plazmeni mlaz bez nepovoljnog djelovanja na samu sapnicu. Kvaliteta rezanja se smanjuje kada je vanjski ili unutarnji dio otvora sapnice oštećen. Otvor navlake je ključna značajka zaštite, ako je oštećen, može doći do negativnog utjecaja na protok plazmenog ili zaštitnog plina, samim time i do loše kvalitete reza.

Dovodnika plina – ovaj dio plazma pištolja je jako bitan jer kreira vrtlog plazmenih plinova i održava ga centričnim s vrhom elektrode i središtem otvora sapnice. Tlak plazmenog plina utječe na vijek trajanja elektrode. Visoki tlakovi uzrokuju brzo trošenje elektrode, dok niži tlakovi plinova produžuju vijek trajanja elektrode. Dovodnik plina (obično neki oblik prstena) je najčešće napravljen od visokotemperaturnog polimera s rupicama pod određenim kutom, kako bi mogao uzrokovati rotaciju plinova.

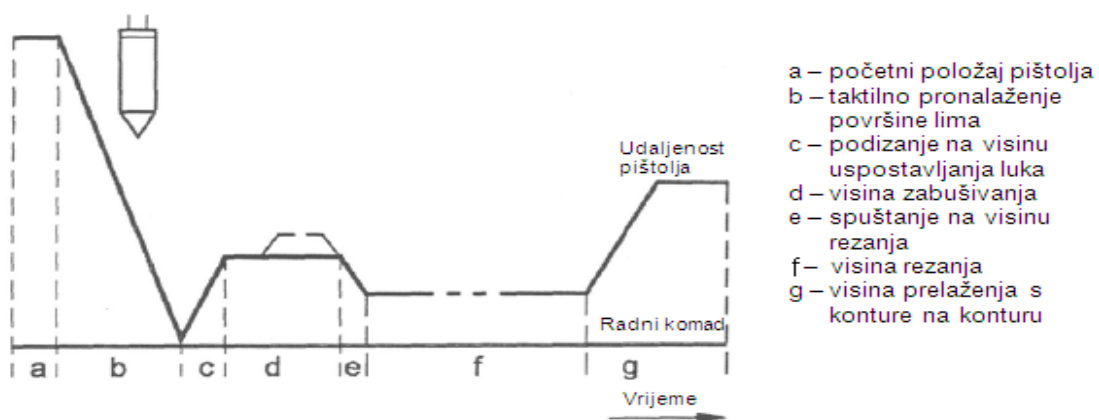
## 5.6. Regulacija visine mlaznice za plazma rezanje od radnog komada

Za kvalitetu reza kod rezanja plazmom, između ostalog od velikog je značaja optimalno podešen i duž cijelog reza konstantno održavan razmak između pištolja i radnog komada. Za postizanje ravnomjerne širine reza i ponovljive geometrije, odnosno dimenzija radnih komada, potrebno je imati točnu regulaciju udaljenosti između pištolja i radnog komada.

Regulacija udaljenosti omogućuje da se plazma pištolj uvijek nalazi na istoj udaljenosti od radnog komada, bilo da je uzorak valovit ili da neravno naliježe.

U pravilu se na početku rezanja, pomoću taktilnog senzora odredi položaj plazma pištolja tako da se pištolj primiče obratku, dok taktilni senzor ne dodirne površinu materijala. Kada senzor dotakne površinu materijala, zatvara se električni krug i računalo je obaviješteno da je mlaznica plazma rezača postavljena na potrebnu visinu kako bi se spriječilo štrcanje vrućeg metala direktno u sapnicu. Sustav THC senzora.

Optimalna visina rezanja te optimalna brzina rezanja ovise o vrsti plinske mješavine i materijalu koji se reže. Slika 5.5. prikazuje tijekom gibanja pištolja kod CNC upravljanog rezanja plazmom. Kad jednom započne rezanje plazmom, udaljenost između vrha pištolja i površine materijala održava se očitavanjem napona prenesenog električnog luka, u procesu koji se zove automatska regulacija visine. Za postizanje visoke kvalitete reza važno je održavati konstantnu udaljenost između pištolja i površine materijala pomoću odgovarajućeg sustava automatske regulacije. Napon u luku se stalno provjerava, a očitavanja se koriste za podešavanje z-osi prema gore ili dolje ovisno o očitanom naponu.



Slika 5.5. Prikaz tijeka gibanja mlaznice plazma uređaja [4]

## 5.7. Kontrolna jedinica za upravljanje plazma stroja

Upravljanje plazma uređajem vrši se preko računala koji se nalazi u kontrolnoj jedinici (ormaru). Sastoji se od računala na koji su povezana 2 paralelna porta, jedan za plazma rezač te drugi za dodatnu glodalicu koji se postavlja na isti CNC stroj.



Slika 5.6. Prikaz kontrolne jedinice

Na računalo su još povezani driveri za motore DM 860A koji upravljaju koračnim motorima (osima) samog CNC stroja.

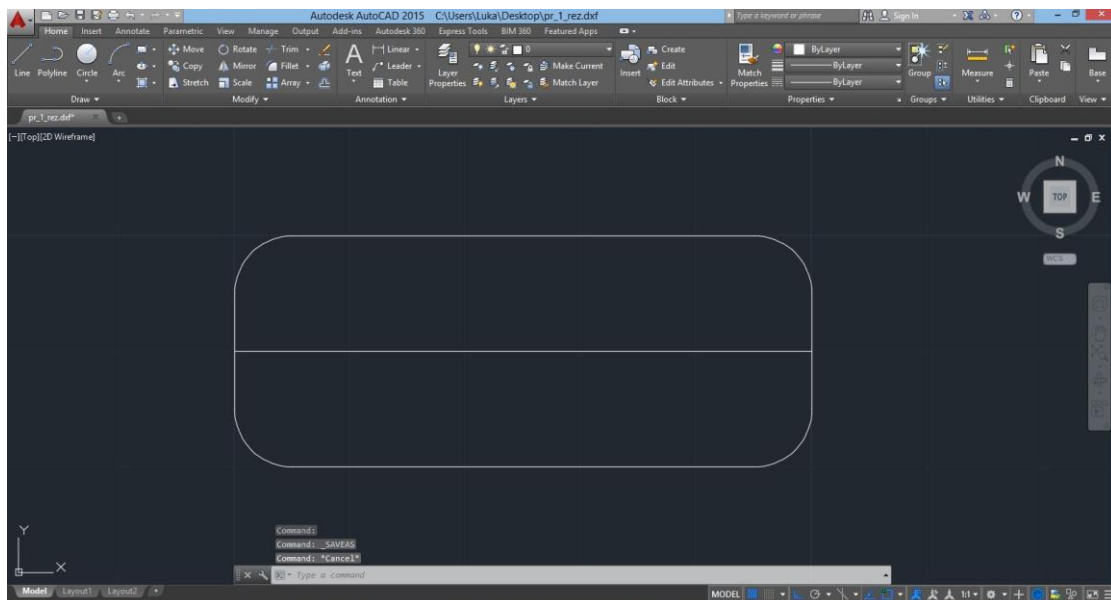


Slika 5.7. Driveri za pogon motora

## 5.8. Korištenje softvera za plazma rezanje

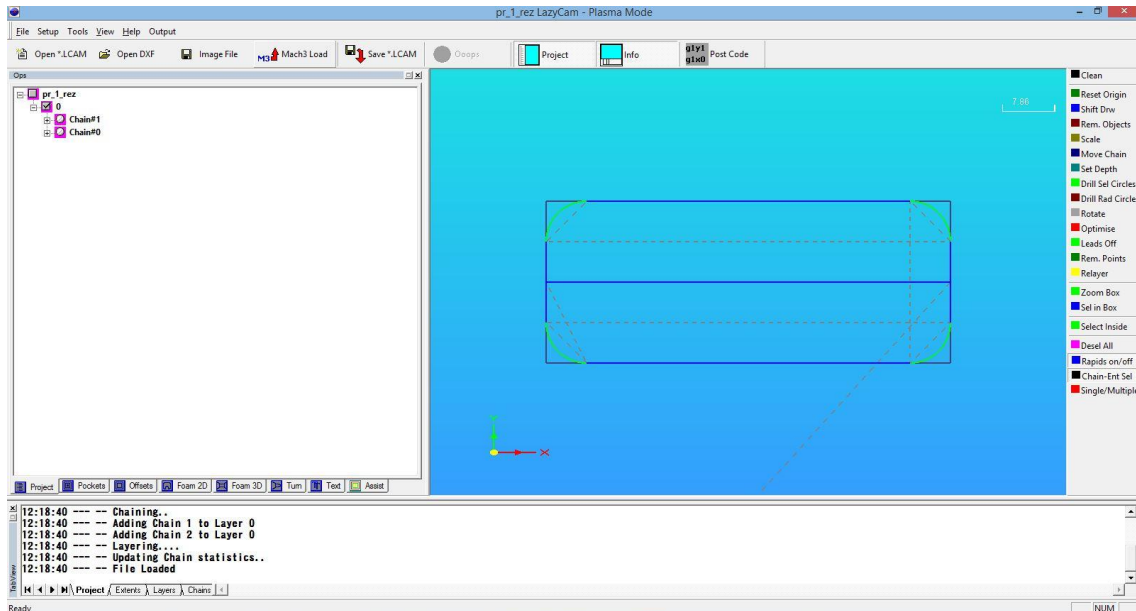
Postoje raznovrsni softveri za korištenje plazma stroja, od besplatnih do vrlo skupih te kvalitetnijih programa. Neki programi su Lantek, CadRez te Mach3 kojeg mi koristimo kao besplatni softver u svrhu rezanja plazma strojem. Najprije nam je potreban program koji služi za kreiranje crteža pomoću kojeg generiramo G-kod za upravljanje plazma strojem. Koriste se razni programi za izradu crteža od Corel, Photoshop, Turbo CAD, Bob-Cad do AutoCAD-a kojeg ćemo koristiti.

Izrada crteža u programu Autodesk AutoCAD 2015 te spremanje u .DXF format kako bi ga sljedeći program mogao raspoznati.



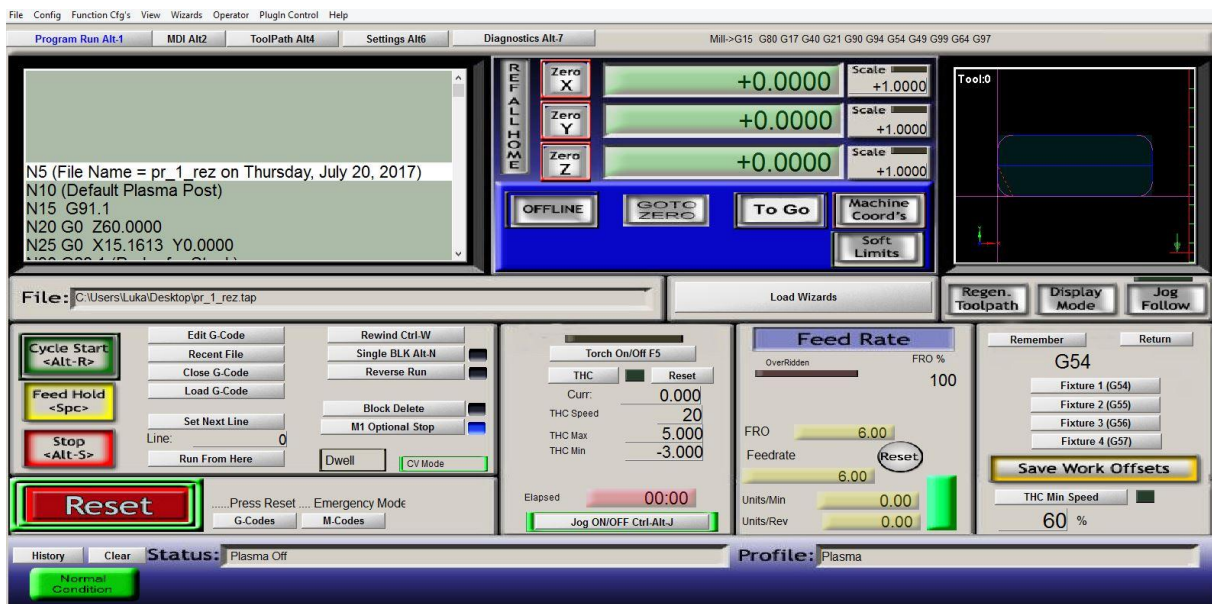
Slika 5.8. Izrada crteža u AutoCAD-u

Nakon neposredno izrađenog crteža koristimo program LazyCam kako bi taj isti crtež nacrtan u AutoCAD-u generirali za kod prepoznatljiv plazma rezaču tj. G-kod koji stroj prepoznaje kao smjernice kretanja osi stroja. Otvaramo spremljenu datoteku .DXF formata te generiramo kod. LazyCam potom sprema datoteku formata .TAP u kojoj se nalazi G-kod.



Slika 5.9. LazyCam softver

Potom koristimo program Mach3 koji direktno komunicira s plazma strojem tako da slanjem instrukcija učitano G-koda od programa LazyCam spremljenog formata .tap uz dodatna podešavanja upravljamo plazma strojem.



Slika 5.10. Mach3 softver

## 6. Pokus plazma rezanje konstrukcijskog čelika S275JR2

U cilju određivanja optimalnih parametara rezanja za odabrane radne materijale i debljine, te određivanja utjecaja plazmenog plina na kvalitetu i brzinu rezanja odlučeno je da će se u eksperimentu varirati utjecajni čimbenici rezanja.

### 6.1. Plazma rezanje uz promjenu brzine rezanja

Brzina rezanja će se mijenjati od 500 do 4000 mm/min. Svi ostali parametri će se držati konstantnima, tako ćemo isto napraviti uz promjenu struje rezanja.

Uzorci materijala S275JR2 će biti izrezani različitim brzinama rezanja kako bi se vidio utjecaj promjene brzine rezanja na značajke kvalitete rezanja (hrapavost površine, kvaliteta reza). Ostali parametri procesa rezanja konstrukcijskog čelika su držani konstantnima.

Navedene značajke kvalitete rezanja klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013:2002.

Tablica 6.1. Prikaz parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu brzine rezanja

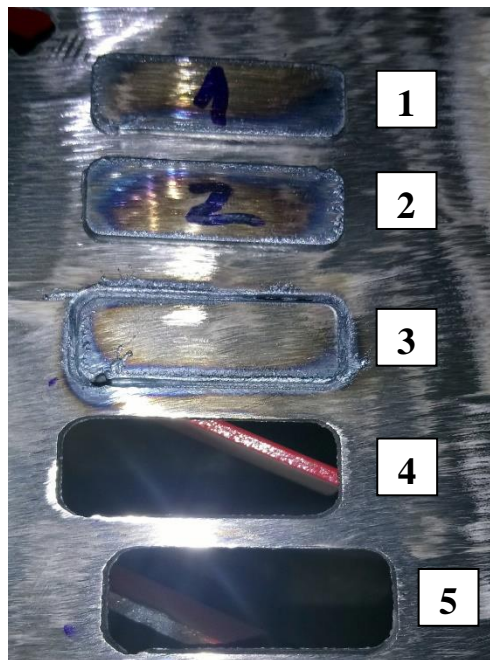
Uzorak	Plin	Promjer sapnice (mm)	Brzina rezanja (mm/min)	Udaljenost sapnice od materijala (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)
1.	Zrak	1,3	1500	2	50	6,5
2.			2000			
3.			4000			
4.			3000			
5.			500			



Tijekom izvršenja pokusa plazma rezanja konstrukcijskog čelika S275JR2 debljine 2 mm, pri promjenama brzina rezanja od 1500 do 4000 mm/min došlo je do potpunog rezanja materijala, dok pri brzini 500 mm/min je došlo do nepotpunog probijanja plazmenog mlaza u materijal po cijeloj dubini. Stoga, za odabir optimalnih parametara rezanja konstrukcijskog čelika dolaze u obzir samo brzine pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala.

Utjecaj brzine rezanja na kvalitetu reza:

- Uzorak 1. - brzina rezanja  $F=1500$  mm/min
- Uzorak 2. - brzina rezanja  $F=2000$  mm/min
- Uzorak 3. - brzina rezanja  $F=4000$  mm/min
- Uzorak 4. - brzina rezanja  $F=3000$  mm/min
- Uzorak 5. - brzina rezanja  $F=500$  mm/min



Slika 6.1. Primjer uzoraka uz 3 promjene brzine

Prvi uzorak rezan brzinom od 1500 mm/min je zadovoljio potpuni prolaz plazma reza materijala kao optimalna brzina plazma rezanja polaznog materijala, dok pri trećem uzorku brzine od 4000 mm/min vidimo nepotpuno rezanje plazma stroja kroz materijal. Peti uzorak uz najmanju brzinu rezanja od 500 mm/min ima kao posljedicu prevelikog taljenja ruba reza materijala.



Slika 6.2. Uzorci nakon plazme rezanja

Sama poledina uzoraka pokazuje nam kako materijal pri promjeni brzine dobije nekvalitetne rezove. Smanjenjem brzine kao na petom uzorku dolazi do prevelike deformacije rubova gdje se odvija rezanje zbog neoptimalne brzine.



Slika 6.3. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem

## 6.2. Plazma rezanje uz promjenu jakosti struje rezanja materijala debljine 3 mm

Jačina struje će se mijenjati od 20 do 60 A. Svi ostali parametri će se držati konstantnima kao i debljina koju koristimo u ovom primjer od 3 mm.

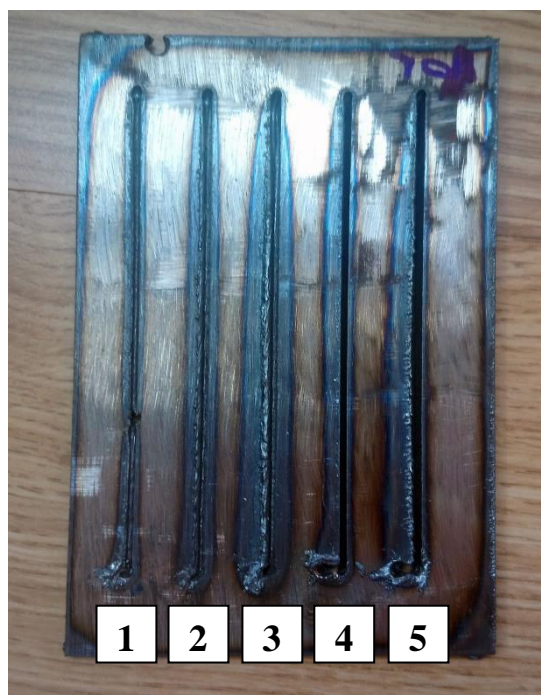
Uzorci materijala S275JR2 će biti izrezani različitim jakostima struje rezanja kako bi se vidio utjecaj promjene struje rezanja na značajke kvalitete rezanja (hrapavost površine, kvaliteta reza). Ostali parametri procesa rezanja konstrukcijskog čelika su držani konstantnima.

Navedene značajke kvalitete rezanja klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013:2002.

Tablica 6.2. Prikaz parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu jakosti struje

Uzorak	Plin	Promjer sapnice (mm)	Brzina rezanja (mm/min)	Udaljenost sapnice od materijala (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)	Debljina materijala (mm)
1.	Zrak	1,3	1500	2	20	6,5	3
2.					30		
3.					40		
4.					50		
5.					60		

Tijekom izvršenja pokusa plazma rezanja konstrukcijskog čelika S275JR debljine 3 mm, pri promjenama jačine struje rezanja od 20 do 40 A došlo je do nepotpunog rezanja materijala, dok pri jačini struje od 50 do 60 A je došlo do potpunog probijanja plazmenog mlaza u materijal po cijeloj dubini. Stoga, za odabir optimalnih parametara rezanja konstrukcijskog čelika dolaze u obzir jačina struje pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala.



Slika 6.4. Uzorak plazma rezanja uz promjenu struje debljine 3 mm

Poledina uzoraka pokazuje nam kako materijal pri promjeni jačine struje dođe do nepotpunog ili prevelikog topljenja materijala rezanjem te se dobiju nekvalitetni rezovi.



Slika 6.5. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem debljine 3 mm

### 6.3. Plazma rezanje uz promjenu struje rezanja materijala debljine 2 mm

Jačina struje će se mijenjati od 20 do 60 A. Svi ostali parametri će se držati konstantnima kao i debljina koju koristimo u ovom primjer od 2 mm.

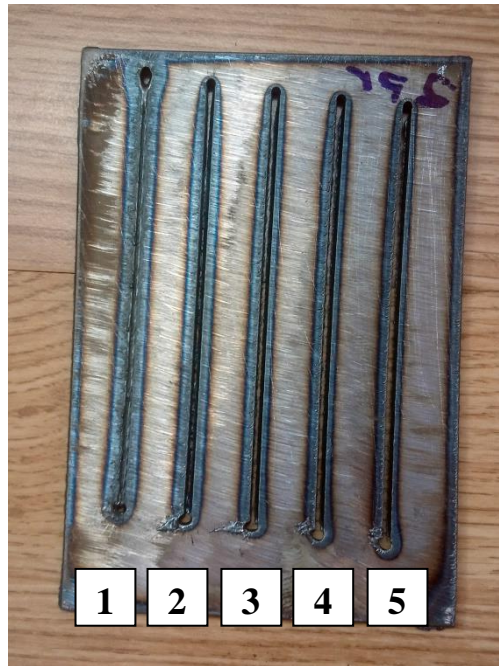
Uzorci materijala S275JR2 će biti izrezani različitim strujama rezanja kako bi se vidio utjecaj promjene jakosti struje rezanja na značajke kvalitete rezanja (hrapavost površine, kvaliteta reza). Ostali parametri procesa rezanja konstrukcijskog čelika su držani konstantnima.

Navedene značajke kvalitete rezanja klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013:2002.

Tablica 6.3. Prikaz parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu jakosti struje

Uzorak	Plin	Promjer sapnice (mm)	Brzina rezanja (mm/min)	Udaljenost sapnice od materijala (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)	Debljina materijala (mm)
1.	Zrak	1,3	1500	2	20	6,5	2
2.					30		
3.					40		
4.					50		
5.					60		

Tijekom izvršenja pokusa plazma rezanja konstrukcijskog čelika S275JR debljine 2 mm, pri promjenama jačine struje rezanja od 20 A došlo je do nepotpunog rezanja materijala (prvi uzorak slike 6.6.), dok pri jačini struje od 30 A dolazi do polovičnog rezanja materijala (ne prerezanog potpunosti) (drugi uzorak slike 6.6.). Pri jačini struje od 40 do 60 A je došlo do potpunog probijanja plazmenog mlaza u materijal po cijeloj dubini. Stoga, za odabir optimalnih parametara rezanja konstrukcijskog čelika dolaze u obzir jačina struje pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala.



Slika 6.6. Uzorak plazma rezanja uz promjenu struje debljine 2 mm



Slika 6.7. Poledina uzoraka odrezanih plazma rezanjem debljine 2 mm

#### 6.4. Plazma rezanje uz promjenu struje rezanja materijala debljine 1 mm

Jačina struje će se mijenjati od 20 do 60 A. Svi ostali parametri će se držati konstantnima kao i debljina koju koristimo u ovom primjer od 1 mm.

Uzorci materijala S275JR2 će biti izrezani različitim strujama rezanja kako bi se vidio utjecaj promjene struje rezanja na značajke kvalitete rezanja (hrapavost površine, kvaliteta reza). Ostali parametri procesa rezanja konstrukcijskog čelika su držani konstantnima.

Navedene značajke kvalitete rezanja klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013:2002.

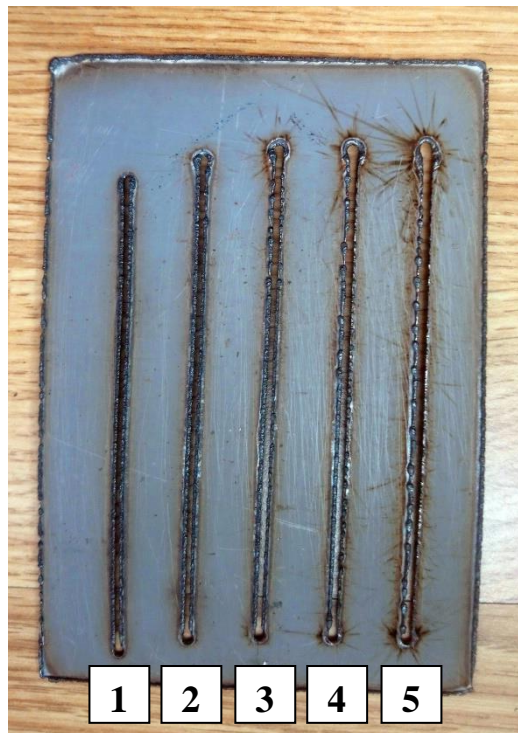
Tablica 6.4. Prikaz parametara pokusa plazma rezanja uz promjenu jakosti struje

Uzorak	Plin	Promjer sapnice (mm)	Brzina rezanja (mm/min)	Udaljenost sapnice od materijala (mm)	Struja rezanja (A)	Tlak plina (bar)	Debljina materijala (mm)
1.	Zrak	1,3	1500	2	20	6,5	1
2.					30		
3.					40		
4.					50		
5.					60		

Tijekom izvršenja pokusa plazma rezanja konstrukcijskog čelika S275JR debljine 1 mm, pri promjenama jačine struje rezanja od 20 do 60 A došlo je do potpunog probijanja plazmenog mlaza u materijal po cijeloj dubini. Stoga, za odabir optimalnih parametara rezanja konstrukcijskog čelika dolaze u obzir jačina struje pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala.



Slika 6.8. Uzorak plazma rezanja uz promjenu struje debljine 1 mm



Slika 6.9. Poleđina uzoraka odrezanih plazma rezanjem debljine 1 mm



## 7. Zaključak

Plazma rezanje jedno je od najčešće korištenih toplinskih postupaka rezanja. Pri rezanju plazmom visoka temperatura plazmenog mlaza tali radni predmet, a taljevina se otpuhuje iz reza kinetičkom energijom plina, koji izlazi iz mlaznice. Za rezanje se najčešće koristi proces s prenosivim lukom, kojim se mogu rezati svi elektroprovodljivi materijali. Plazma rezanje se odlikuje velikim brzinama rezanja i uglavnom se koristi u mehaniziranim sustavima.

Analizom površine materijala kojeg smo obrađivali uočeno je da premala ili prevelika brzina rezanja ima za rezultat jako lošu kvalitetu reza te je nužno naći optimalne parametre rezanja. Ostatci materijala koji nastaje kao produkt prevelike brzine rezanja teško je ukloniti, te zahtijeva naknadno brušenje. Ako je brzina rezanja prevelika može doći i do toga da plazmeni mlaz ne napravi potpuni rez kroz materijal. Ako je brzina rezanja premala, širina reza će biti veća, a s time rastaljeni materijal neće biti ispuhan plinom nego će se nakupljati na dnu reza kao ostatak koji je lako ukloniti za razliku od ostatka koji nastaje kod prevelike brzine rezanja.

Poboljšana kvaliteta reza navedenog opće konstrukcijskog čelika dobila bi se daljnjom optimizacijom parametara rezanja.

## 8. Literatura

- [1] S. Kralj, Š. Andrić - Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [2] M. Dunder – Strojarska tehnologija 1 i 2, podloga s predavanja , Filozofski fakultet u Rijeci, Politehnika (2017.)
- [3] I. Samardžić – Rezanje plazmom, literatura s predavanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu. (2015./2016.)
- [4] [http://repositorij.fsb.hr/703/1/16\\_07\\_2009\\_Mioc\\_-zavrzni\\_rad-Usporedba\\_kvalitete\\_rezanja\\_aluminija\\_plazmom\\_i\\_laserom.pdf](http://repositorij.fsb.hr/703/1/16_07_2009_Mioc_-zavrzni_rad-Usporedba_kvalitete_rezanja_aluminija_plazmom_i_laserom.pdf) (pregledao,15.07.2017-25.08.2017. )
- [5] <http://www.mechanicalengineeringblog.com/3702-plasma-arc-welding-paw-process-transferred-plasma-arc-welding/> (pregledao,21.07.2017. )
- [6] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx> (pregledao,17.07.2017-02.08.2017. )
- [7] [http://www.boc-gas.co.nz/internet.lg.lg.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology435\\_68107.pdf?v=1.0](http://www.boc-gas.co.nz/internet.lg.lg.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology435_68107.pdf?v=1.0) (pregledao,17.07.2017-09.08.2017. )
- [8] O materijalu: <http://ba.steel-plate-grade.com/carbon-and-low-alloy-high-strength-steel-plate/en-10025-2/en-10025-2-s275jr-carbon-and-low-alloy-high-st.html> (pregledao,19.07.2017. )