

# Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10

---

**Pintarić, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:553961>

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

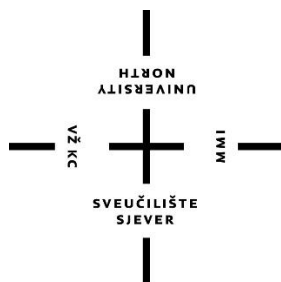
*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





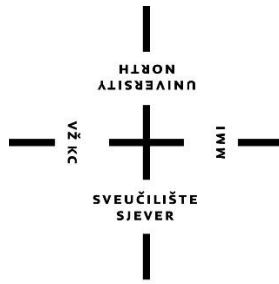
**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 081/STR/2023**

**Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne  
površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10**

**Matija Pintarić, 0336021029**





# Sveučilište Sjever

## Diplomski sveučilišni studij Strojtarstvo

Diplomski rad br. 081/STR/2023

# Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10

### Student

Matija Pintarić, 0336021029

### Mentor


doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		<input checked="" type="checkbox"/>
PRISTUPNIK	Matija Pintarić	JMBAG	0336021029
DATUM	20.02.2023.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Influence of plasma cutting parameters on the surface quality of X5CrNi18-10 austenitic stainless steel		
MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc dr. sc. Jasna Leder Horina, predsjednica povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc. dr. sc. Zlatko Botak, član povjerenstva		
	4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član		
	5.		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ	081/STR/2023
OPIS	<p>U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupak plazma rezanja metala. Usporediti plazma rezanje u ručnoj i automatiziranoj izvedbi. Navesti sve utjecajne parametre u postupku te opisati njihov odabir i utjecaj na kvalitetu reza. Posebno detaljno pomoću normi prikazati ocjenjivanje kvalitete rezanja plazma uređajima. U radu je potrebno obraditi i specifičnosti koje se pojavljuju pri toplinskom rezanju nehrđajućih čelika.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim plazma rezanjem rezati austenitni nehrđajući čelik X5CrNi18-10 uz promjenu utjecajnih parametara prema izrađenom planu eksperimenta. Na izrezanim uzorcima izmjeriti hrapavost na površini reza, okomitost ruba te vizualnim pregledom ocijeniti kvalitetu reza. Analizirati rezultate prema dopuštenim odstupanjima kvalitete prema normi HRN EN ISO 9013:2017. Prema rezultatima ispitivanja preporučiti prikladne parametre rezanja i donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.</p>
ZADATAK URUČEN	21. 02. 2023.
	 PODPIS MENTORA M. Bušić

## **Predgovor**

*Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i uz literaturu navedenu u radu. Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na iskazanoj pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci, potpori i razumijevanju tijekom studiranja.*

*Na kraju, najviše se zahvaljujem svojoj djevojci Melani na strpljenju i bezuvjetnoj podršci tijekom cjelokupnog studija.*

*Matija Pintarić*

## Sažetak

Teorijski dio rada opisuje tehnologiju plazma rezanja. Definira plazmu kao četvrto agregatno stanje tvari. Opisuje karakteristike plazme i faze koje se događaju u procesu uspostavljanja plazma rezanja. Definira glavne sustave i komponente sustava koju čini plazma rezanje. Opisuje različite mogućnosti izvedbi tehnologija plazma rezanja, izdvaja i opisuje najvažnije parametre kako bi se ostvarila zadovoljavajuća kvaliteta plazma rezanja nehrđajućeg čelika. Na kraju teorijskog dijela, opisana je hrapavost površine i navedene su norme po kojima se klasificira i definira kvaliteta hrapavosti reza i tehničkih površina dobivenih toplinskim rezanjem.

Eksperimentalni dio zaokružuje teorijski dio plazma rezanja nehrđajućeg čelika. Pokazuje koji parametar i kakav utjecaj on ima na kvalitetu rezne površine nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 (AISI 304), debljine 5 mm, prilikom konvencionalnog plazma rezanja sa zrakom. Provedba eksperimenta izvršena je na način da su prethodno izrezani uzorci različitom jakosti struje i brzinama rezanja, zatim je izmjerena hrapavost reza svake površine uzoraka pomoću digitalnog uređaja za ispitivanje hrapavosti površine. Prema normi HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302, uzorcima je dodijeljen stupanj i razred hrapavosti izmjerene površine reza. Uzorci su kasnije slikani i na njima je provedena računalna analiza slike kako bi se mogao utvrditi utjecaj promjenjivih parametara prilikom plazma rezanja nehrđajućeg čelika zrakom. Računalnom analizom izmjeren je kut brazdi i razmak između najizraženijih brazdi na površini reza.

Na samom kraju rada, napisan je komentar i zaključak na dobivene rezultate eksperimenta. U zaključku su opisani prednosti i nedostaci plazma rezanja sa zrakom koji su postignuti rezanjem nehrđajućeg čelika. Također, navedeni su konkretni parametri plazma rezanja i njihov utjecaj na postignutu kvalitetu odrezanih komada dostupnom laboratorijskom opremom.

**Ključne riječi:** Plazma, plazma rezanje, električni luk, visoka frekvencija, plazmeni plin, zaštitni plin, jakost struje, brzina rezanja, nehrđajući čelik, hrapavost, računalna analiza, brazde

## Summary

The graduation thesis describes the technology of plasma cutting. The theoretical section analyses and defines what plasma is as the fourth aggregate state of matter and how plasma cutting works. It describes the characteristics of the plasma and identifies how Plasma Arc cutting works. The Graduation Thesis identifies main and system component parts of a plasma cutting. It describes the various possibilities of plasma cutting technology. In the end, it extracts and describes the most important parameters in order to achieve a satisfactory quality of plasma cutting of stainless steel.

The experimental part completes the theoretical part of plasma cutting of stainless steel. It shows which parameter and what influence on the quality of the cutting surface of stainless steel X5CrNi18-10 (AISI 304). In the experiment was used the conventional air plasma cutting. The experiment was performed cutting with different current strength and cutting speeds. After the workpieces have been cut, the roughness of each surface of the workpieces was measured with a digital surface roughness tester. The workpieces were photographed and analysed in the computer software ImageJ. The Computer analysis was used to measure the furrows angle and the distance between the most prominent furrows on the cut surface.

In the conclusion of graduation thesis was described the advantages and disadvantages of conventional air plasma cutting of stainless steel. Also, were listed the parameters of plasma cutting and their influence on the achieved quality of cut pieces with available equipment.

**Keywords:** Plasma, plasma cutting, electric arc, high frequency, plasma gases, shielding gases, current strength, cutting speed, stainless steel, roughness, computer analysis, furrows



# Sadržaj

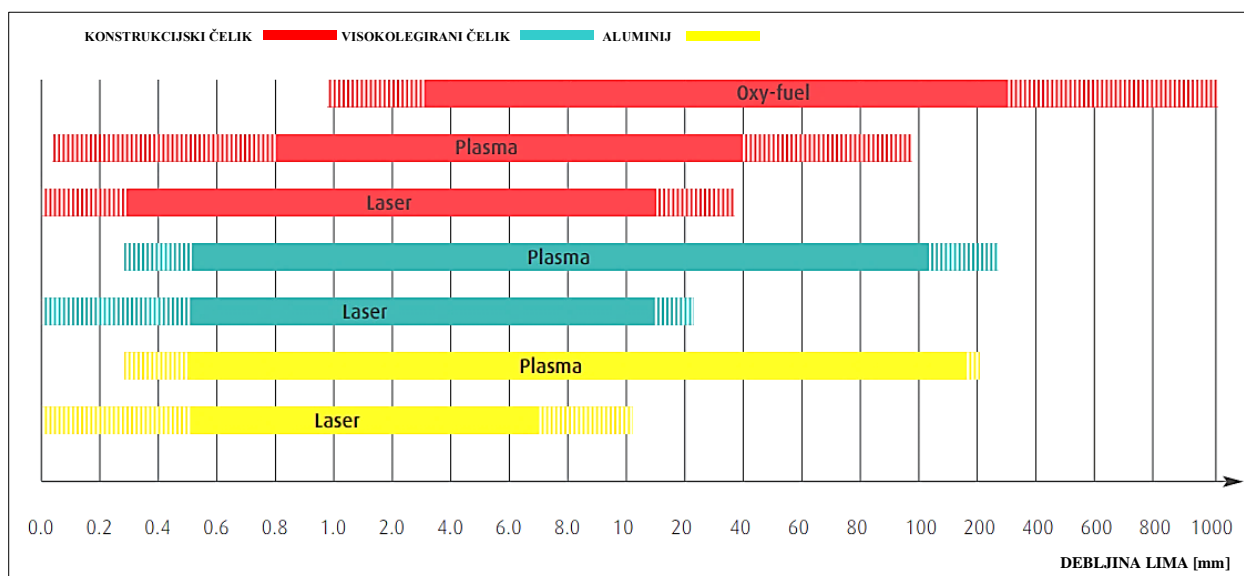
1.	UVOD .....	1
2.	PLAZMA REZANJE .....	2
2.1.	Općenito o plazmi .....	2
2.2.	Uvod u plazma rezanje.....	3
2.3.	Faze u procesu uspostavljanja plazma rezanja .....	4
2.3.1.	Stabilizacija brzine vrtloga plina.....	4
2.3.2.	Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom .....	5
2.3.3.	Uspostavljanje pilot luka na radnom komadu .....	5
2.3.4.	Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu .....	6
2.4.	Sustavi plazma rezanja.....	6
2.5.	Komponente sustava plazma rezanja.....	8
2.5.1.	Izvor za plazma rezanje .....	8
2.5.2.	Pištolj ili gorionik za plazma rezanje .....	10
2.5.3.	Plazmeni plinovi i zaštitni plinovi.....	12
2.6.	Tehnologije plazma rezanja .....	13
2.6.1.	Konvencionalno rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima.....	13
2.6.2.	Plazma rezanje sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima, plinu ili vodi .....	14
2.6.3.	Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka.....	17
2.7.	Utjecajni parametri kvalitete plazma rezanja .....	18
2.7.1.	Snaga plazmenog mlaza .....	18
2.7.2.	Brzina rezanja.....	18
2.7.3.	Odabir plazmenog plina .....	19
2.7.4.	Regulacija visine pištolja i radnog komada .....	23
2.7.5.	(Is)trošenje sapnice.....	24
3.	SPECIFIČNOSTI KOD PLAZMA REZANJA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA .....	25
3.1.	Čimbenici koji utječu na stabilnost plazmenog luka.....	25
3.2.	Čimbenici koji utječu na sustav vođenja i upravljanja.....	25
3.3.	Tehnički plinovi u procesu rezanja.....	25
4.	ISPITIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE .....	28
4.1.	Definicija hrapavosti.....	28
4.2.	Glavni parametri hrapavosti površine.....	29
4.3.	Metode mjerenja hrapavosti površina.....	30
4.4.	Norma HRN EN ISO 9013:2017 .....	31
4.4.1.	Veličine i definicije u procesu rezanja na radnom komadu.....	31
4.4.2.	Veličine i definicije na izrezanom komadu.....	31
4.4.3.	Određivanje hrapavosti površine prema HRN EN ISO 9013:2017 .....	32

4.4.4.	Standard hrapavosti tehničkih površina HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302 .....	33
5.	EKSPERIMENT – Plazma rezanje X5CrNi18-10 čelika.....	34
5.1.	Materijal za ispitivanje.....	34
5.2.	Priprema ispitnih uzoraka .....	34
5.3.	Oprema za provođenje eksperimenta.....	35
5.3.1.	Oprema za konvencionalno plazma rezanja.....	35
5.3.2.	Oprema za mjerenje hrapavosti rezne površine .....	38
5.4.	Analiza rezne površine.....	40
5.5.	Rezultati eksperimenta.....	40
6.	ZAKLJUČAK .....	50
7.	LITERATURA.....	51
	POPIS SLIKA.....	53
	POPIS TABLICA .....	56

# 1. UVOD

Obradu rezanja metala karakteriziraju sve veći zahtjevi za kvalitetom, smanjenjem troškova i operacija u proizvodnji. Današnje tehnologije rezanja omogućuju da izrezane pozicije nakon rezanja budu spremne za sljedeću tehnološku operaciju, bez potrebe za dodatnim obradama, što u protivnom iziskuje dodatne troškove i povišuje cijenu proizvodnje.

Rezanje plazmom razvijeno je krajem 1950-ih godina u svrhu rezanja visokolegiranih čelika i aluminija. Rezanje plazmom osmišljeno je za rezanje onih metala koji se nisu mogli rezati s plinskim plamenom zbog svojeg kemijskog sastava i fizikalnih svojstava. Zahvaljujući iznimno visokim brzinama rezanja (osobito kod tankih limova) i uskog ZUT-a, plazma se može koristiti i za rezanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Rezanje plazmom u izravnoj je konkurenciji s ostalim tehnologijama rezanja, kao što su plinsko rezanje, lasersko rezanje i rezanje vodenim mlazom. Također, ono može biti alternativa tehnološkim obradama poput bušenja i štancanja. Rezanje plazmom može se koristiti za rezanje svih električki vodljivih materijala, kao što su nelegirani, niskolegirani i visokolegirani čelici, obojeni metali i metali poput aluminija i bakra. Ovisno o tehnologiji plazma rezanja, jakosti izvora, sustavu upravljanja i vrsti materijala, mogu se rezati debljine limova u rasponu od 0,5 mm pa do 180 mm.

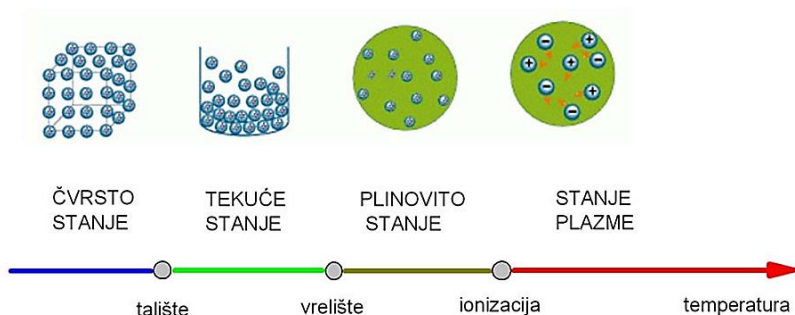


Slika. 1.1. Područje primjene toplinskih procesa rezanja [1]

## 2. PLAZMA REZANJE

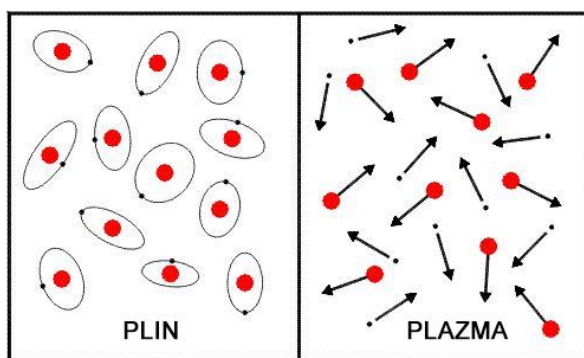
### 2.1. Općenito o plazmi

Plazma je agregatno stanje poput čvrstog, tekućeg i plinovitog stanja. Dodavanje topline nekom materijalu uzrokuje vibraciju ili brže gibanje molekula. Kada se čvrsta tvar zagrijava, molekule počinju jače vibrirati te se one snažno sudaraju do one točke sudara kada se krutina počinje pretvarati u tekućinu. Što se više energije ili topline dodaje sustavu, kretanje postaje brže i energičnije. Molekule se u jednom trenutku tako energično (nasilno) sudaraju da se naposljetku odvajaju i stvaraju plin. Ako se plinu doda još više energije, molekule putuju brže i sudaraju se jače te se plin pretvara u plazmu, četvrto agregatno stanje. Na slici 2.1.1. prikazan je shematski prikaz agregatnih stanja i njihove transformacije s porastom temperature.



Slika 2.1.1. Agregatna stanja tvari [2]

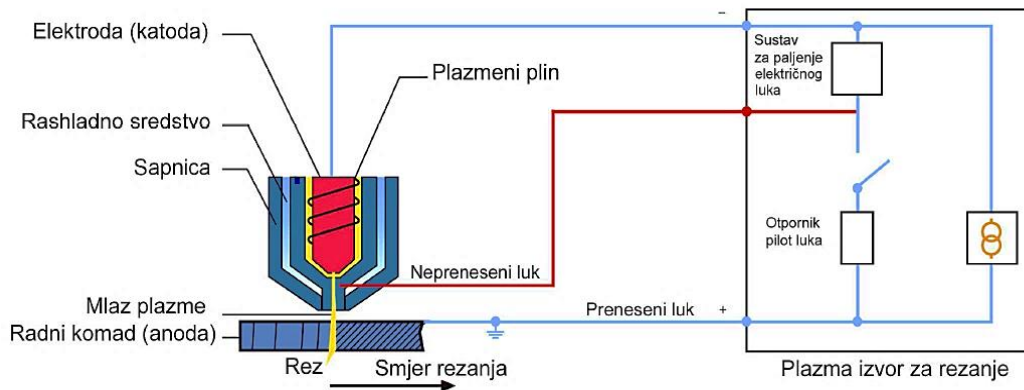
Plazma je stanje tvari u kojoj su plinovi ionizirani tj. stanje u kojoj je plin električki vodljiv. Proces u kojem atom ili molekula dobivanjem ili gubitkom elektrona stječe pozitivan ili negativan naboj nazivamo ionizacija. Ionizacija plinova uzrokuje stvaranje slobodnih elektrona i pozitivnih iona među atomima plina. Dakle, dok se "normalni" plin sastoji od neioniziranih čestica, plazmu sačinjavaju disocirane pozitivne čestice i negativni elektroni. Tijekom ionizacije, unos energije izbacuje elektron iz postojećeg atoma. To rezultira jednim slobodnim elektronom i jednim pozitivno nabijenim ionom. Kada su naboji razdvojeni i plin je ioniziran, takvo stanje tvari nazivamo plazom. [2]



Slika 2.1.2. Prikaz čestica plina i plazme (ionizacija) [2]

## 2.2. Uvod u plazma rezanje

Plazma rezanje je toplinski proces u kojem energija toplinske plazme tali radni komad, a nastalu talinu izbacuje mlaz plinova koji se koristi za stvaranje plazme. Plazmeni mlaz dobiva se tlačanjem određenog plina kroz električni luk. Električni luk plazme uspostavlja se između volframove elektrode spojene na – pol istosmjerne struje i radnog komada (preneseni luk) ili sapnice (nepreneseni luk). Kako bi se pokrenuo postupak rezanja, prvo se upali pilot luk između sapnice i elektrode primjenom visokog napona. Niskoenergetski pilot luk priprema prostor između plazma pištolja i radnog komada izazivanjem djelomične ionizacije. Kad je pilot luk u kontaktu s radnim komadom tj. kada se uspostavi preneseni luk, metalni materijal se tali i djelomično isparava zbog toplinske energije luka i plazmenog plina. Nastala talina se istiskuje iz reza pomoću kinetičke energije plazmenog plina. Plazmeni plin koji se koristi ovisi o materijalu koji se reže i kvaliteti reza kojeg želimo postići. [3]

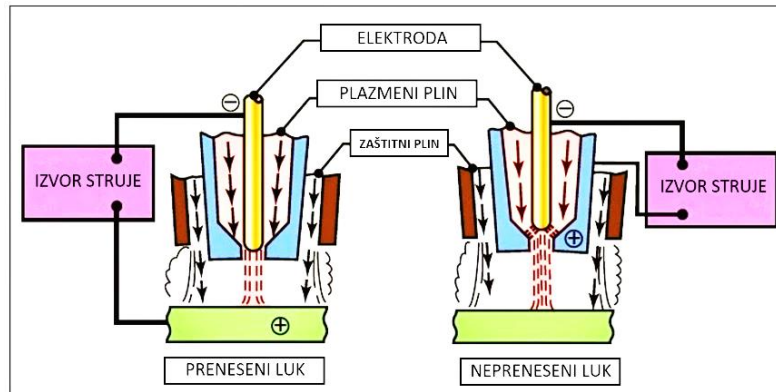


Slika 2.2.1. Shematski prikaz strujnog kruga i opreme plazma rezanja [3]

Plazma plinovi su djelomično disocirani i ionizirani u luku te su električki vodljivi. Zahvaljujući visokoj gustoći energije i visokoj temperaturi, plazma se širi i kreće prema radnom komadu brzinom do tri puta većom od brzine zvuka. Kroz rekombinaciju atoma i molekula, energija se na površini radnog komada apsorbira trenutno te oslobađa i pojačava toplinski učinak plazma luka na radni komad. U njemu se proizvode temperature do 30 000 K. Zajedno s visokom kinetičkom energijom plazma plina, takve temperature dopuštaju izuzetno brzo rezanje svih vrsta električki vodljivih materijala, ovisno o debljini materijala. Postupak plazma rezanja može biti izveden ručno, strojno mehanizirano ili robotom. [1] [3]

Preneseni luk se javlja kada struja teče iz netaljive elektrode (katode) na radni komad (anodu). Koristi se za veći unos toplinske energije u radni komad tj. za rezanje električki vodljivih materijala. Ovo je najčešće korišten oblik plazme rezanja.

U neprenesenom načinu rada, luk se javlja između elektrode i sapnice te se koristi za uspostavljanje električnog luka (tzv. pilot luk) i za rezanje materijala koji nisu električki vodljivi, kao što su polimeri.

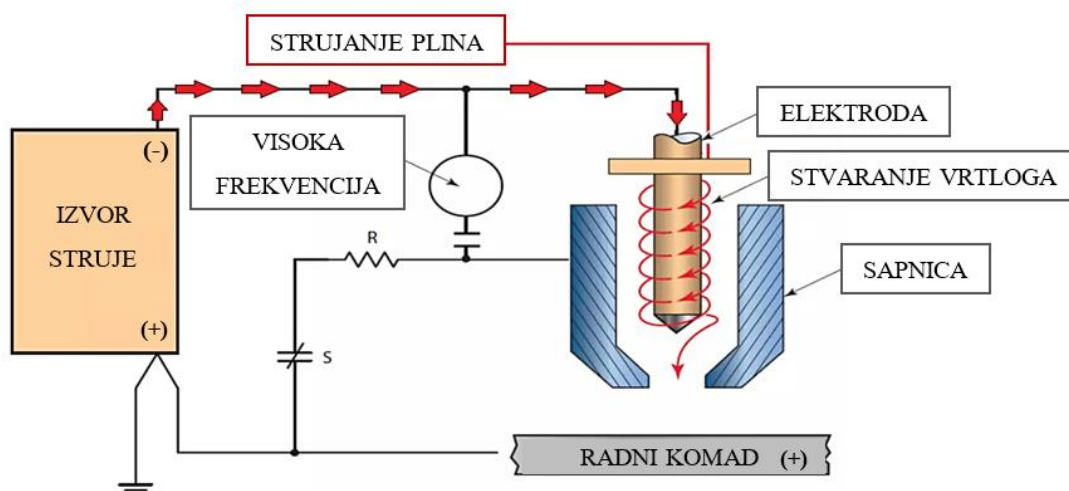


Slika 2.2.2. Shematski prikaz prenesenog luka i neprenesenog luka [5]

## 2.3. Faze u procesu uspostavljanja plazma rezanja

### 2.3.1. Stabilizacija brzine vrtloga plina

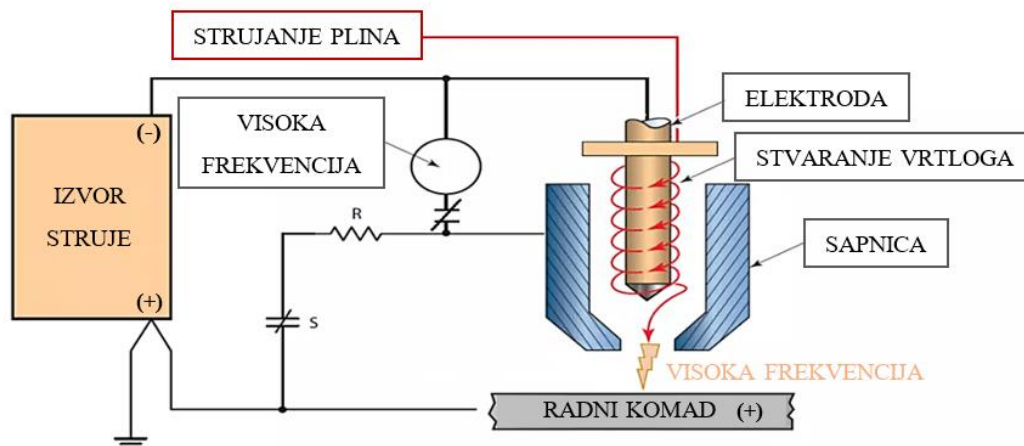
Izvor napajanja i strujni krug pokretača luka spojeni su na plazma pištolj preko spojnih vodova i kablova. Vodovi opskrbljuju plazma pištolj pravilnim protokom plina, a kablovi protokom električne struje i visokom frekvencijom za pokretanje i održavanje procesa. Slika 2.3.1 prikazuje da je otvoren dovod plina, plazmeni plin vrtložno struji oko elektrode i prolazi kroz otvor sapnice. Prva faza služi za stabilizaciju brzine vrtloga plina koji će osigurati pravilnu točku dodira za uspostavu električnog luka. [4]



Slika 2.3.1. Stabilizacija brzine vrtloga luka [4]

### 2.3.2. Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom

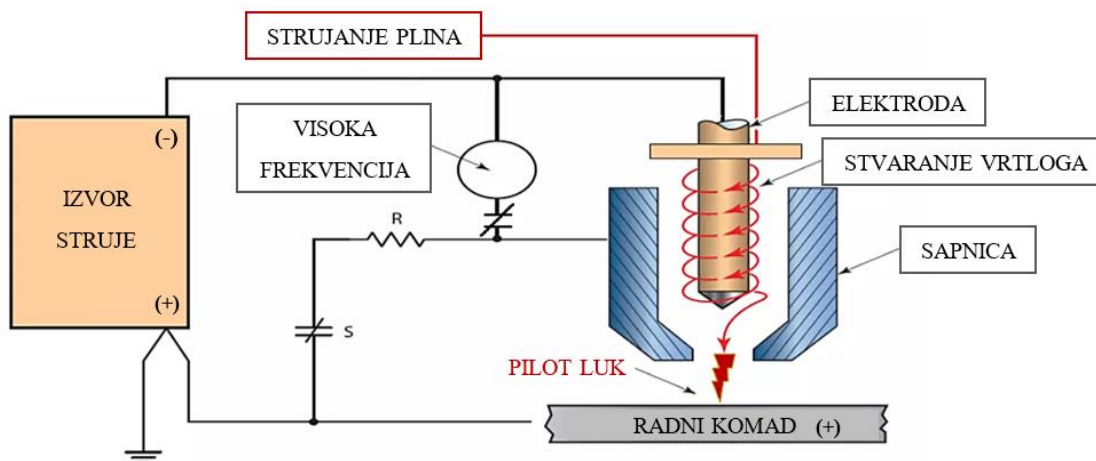
Napon otvorenog kruga može se mjeriti od elektrode (-) do sapnice (+). Na slici 2.3.2 može se primijetiti da je sapnica spojena na (+) pol u napajanju preko otpornika i releja, a elektroda na (-) pol preko izvora struje što bi značilo da se nakon stabilizacije vrtloga plazmenog plina, visoka frekvencija aktivira i uzrokuje ionizaciju plazmenog plina. [4]



Slika 2.3.2. Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom [4]

### 2.3.3. Uspostavljanje pilot luka na radnom komadu

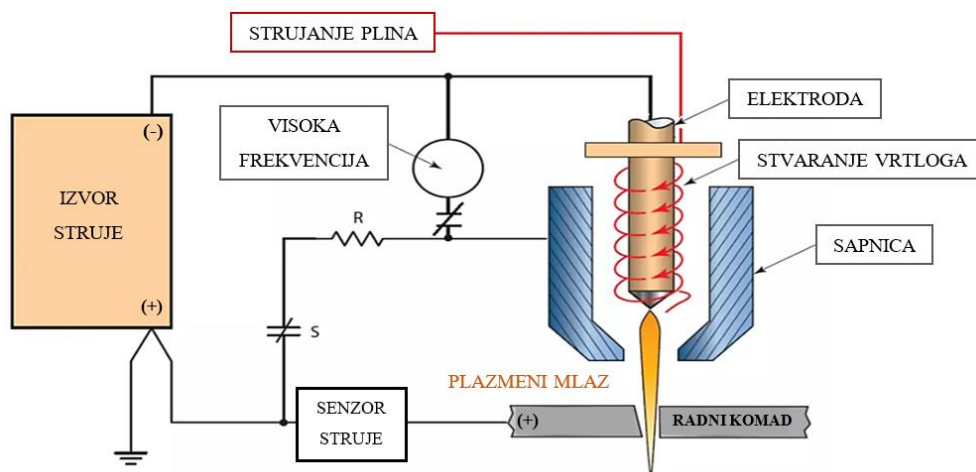
Energija koja se prenosi s visokofrekventnog luka na plin uzrokuje da plin postaje ioniziran tj. električki vodljiv. Električki vodljivi plin omogućava protok struje između elektrode i sapnice stvarajući pilot luk. Pod pretpostavkom da je sapnica u neposrednoj blizini površine reza, pilot luk će se pričvrstiti na radni komad. Jednom kada pilot luk dođe u kontakt s radnim komadom (koji je uzemljen), struja prelazi s elektrode na radni komad, visokofrekventni modul se isključuje te je strujni krug zatvoren. [4]



Slika 2.3.3. Uspostavljanje pilot luka na radnom komadu [4]

### 2.3.4. Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu

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 probijanja i rezanja radnog komada. Temperatura plazma luka tali metal, probija radni komad, a strujanje plina velike brzine uklanja rastaljeni materijal s dna zareza. Zaštitni plin struji kroz vanjsku sapnicu, obavija mlaz te na taj način štiti rez. [4]



Slika 2.3.4. Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu [4]

## 2.4. Sustavi plazma rezanja

Sustavi plazma rezanja razlikuju se od ručnog rezanja plazmom i mehaniziranog ili automatiziranog rezanja plazmom pomoću CNC stroja ili robota.

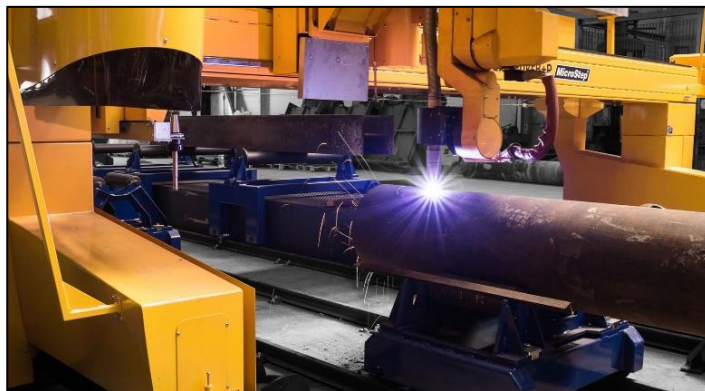
Ručna plazma izvrstan je alat za brzo rezanje limova, metalnih ploča, traka, vijaka, cijevi itd., gdje su preciznost, točnost i ponovljivost manje važni. Ručni plazma rezači mogu poslužiti kao izvrstan alat za žlijebljenje zavarenih spojeva ili uklanjanje neispravnih zavora. Ručna plazma se ne koristi samo u metaloprerađivačkoj industriji, već se često koristi za spašavanje od strane vatrogasnih službi ili nekih drugih službi za spašavanje.



Slika 2.4.1. Ručna plazma [7]



CNC strojevi za rezanje plazmom obično koriste drugačiju vrstu plazma sustava od aplikacija za ručno rezanje. Mehanizirani plazma sustavi koriste veće izvore struje i veći plazmeni gorionik, imaju vrstu sučelja kojim se može automatski upravljati pomoću CNC-a. Takvi sustavi za rezanje se najčešće koriste u metaloprerađivačkoj industriji jer povećavaju brzinu, produktivnost, preciznost i točnost reza. U rasponu 2D rezanja vođenog CNC-om za tanke i srednje debljine limova oni ostvaruju vrlo kvalitetan rez s vrlo velikim brzinama rezanja uz relativno niske troškove po metru rezanja. Zahvaljujući sofisticiranijim rotirajućim jedinicama za koso rezanje, moderni CNC strojevi, također pokazuju snagu u 3D obradi. Danas ništa ne stoji na putu iznimno preciznoj pripremi rubova zavara s kutevima (kosine i do  $52^\circ$ ). Uz dodatke, moderni sustavi rezanja mogu se koristiti ne samo za obradu limova, već i za obradu cijevi, profila i kupola. Višenamjenski strojevi za rezanje plazmom također nude daljnje mogućnosti za obradu materijala. Sustavi se mogu opremiti modulima za omogućavanje markiranja, bušenja, upuštanja i narezivanja navoja. [6]



*Slika 2.4.2. CNC plazma s rotirajućim plazma gorionikom [6]*

Roboti se još uvijek naširoko smatraju nezamjenjivima kada se radi o rezanju i pripremi pozicija za zavarivanje na raznim neravnim površinama jer stvaraju izvrsne kutne ili zakrivljene oblike, kao i glatku površinu. U usporedbi sa standardnim CNC plazma stolom ili namjenskim strojevima, robot ne samo da je vješt u rezanju trodimenzionalnih dijelova i složenih oblika, već se može koristiti i za rezanje dvodimenzionalnih dijelova.



*Slika 2.4.3. Plazma rezanje robotom [8]*

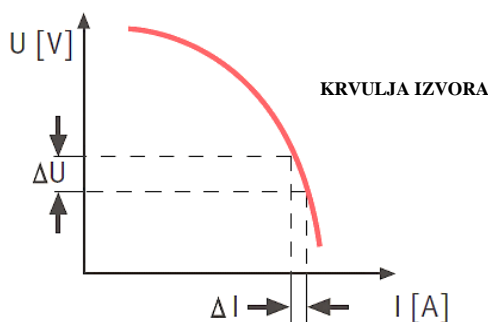
## 2.5. Komponente sustava plazma rezanja

Najbitnije komponente sustava plazma rezanja su: izvor za plazma rezanje, pištolj ili gorionik plazma rezanja i plazmeni te zaštitni plinovi.

### 2.5.1. Izvor za plazma rezanje

Izvor za plazma rezanje je najbitniji dio plazma sustava za rezanje. Današnji izvori su većinom konstruirani s inverterskom tehnologijom i imaju odlične mogućnosti integriranja s CNC i robotskim sustavima. Izvori inverterskog tipa mogu se koristiti za rad s niskom strujom. [3]

Plazma izvori za rezanje obično su integrirani istosmjerni sustavi s ugrađenim sustavima pokretanja luka, protoka plina i vodenog hlađenja. Visoka struja, aktivni plazma plinovi i povećano suženje dovode do viših radnih napona koji mogu biti u rasponu od 50 do 60 V. Koriste se opadajuće karakteristike napona i struje, a napon otvorenog kruga može biti do 400 V. Izvor napajanja padajućeg tipa, daje istosmjernu struju s naponima otvorenog kruga u rasponu od 120 – 400 V i izlaznu struju u rasponu od 70 – 1000 A. Također, može sadržavati pilot luk i strujni krug za generiranje visoke frekvencije. Zbog inherentne opasnosti od strujnog udara za operatera, ručna oprema za rezanje koristi niži napon od 120 – 200 V i struju u rasponu od 15 – 100 A, te postiže relativno niske brzine rezanja.



Slika 2.5.1. Padajuća karakteristika napona i struje plazma izvora [1]

Izvor za plazma rezanje određuje vrstu plazmenog ili zaštitnog medija koji se može koristiti pri rezanju. Kako je kvaliteta reza radnog komada presudna pri proizvodnji nekog proizvoda, potrebno je provjeriti koji se plinovi i njihove mješavine mogu koristiti s određenim izvorom za plazma rezanje. [3]

Izvori za plazma rezanje koji su trenutno dostupni na tržištu mogu se podijeliti u tri skupine: plazma rezači na komprimirani zrak, plazma rezači s kisikom i višeplinski sustavi ili sustavi sa sekundarnim medijem (plin, voda).

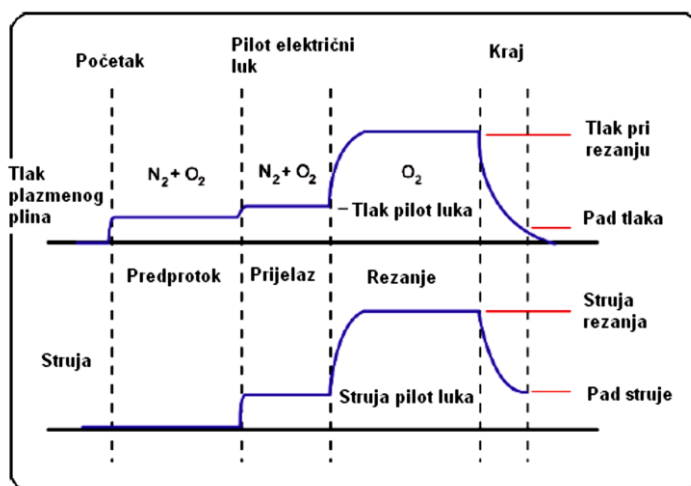


Slika 2.5.2. Primjer izvora struje plazma rezanja za CNC rezanje (višeplinski sustav) [9]

Upravljanje i kontrola izvora struje odnosno glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski pomoću mikroprocesorskog kontrolera, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza. [3]

Uočavajući na slici 2.5.3. mikroprocesorski kontroler omogućuje:

- Predprotok plinske mješavine prije uspostavljanja električnog luka što čini paljenje luka bržim i lakšim te sprječava preveliko trošenje elektrode.
- Kontrolu povećavanja struje rezanja i intenziteta protoka plina što smanjuje toplinsko opterećenje katode te samim time produžuje njen vijek trajanja.
- Kontrolu smanjenja struje rezanja i intenziteta protoka plina na kraju procesa rezanja što rezultira skrućivanjem oksida elektrode prije njihovog „uklanjanja“ s površine.



Slika 2.5.3. Dijagram početka i završetka plazma rezanja [3]

Općenito gledajući, izvori za plazma rezanje koji pomoću mikroprocesorskog kontrolera imaju mogućnost povećavanja struje i tlaka plina na početku rezanja, kao i mogućnost smanjenja tih parametara na kraju rezanja, produžuju vijek trajanja potrošnih dijelova sustava za rezanje. Neoštećeni potrošni dijelovi sustava doprinose dobivanju kvalitetnijeg reza za dulje vrijeme trajanja proizvodnje. [3]

### 2.5.2. Pištolj ili gorionik za plazma rezanje

U procesu plazma rezanja plazma pištolji ili gorionici mogu biti vođeni ručno ili mehanizirano. Postoje nekoliko različitih vrsta plazma pištolja ili gorionika. Oni se razlikuju prema veličini, obliku, jakosti struje i debljini materijala koji se reže te načinu upravljanja. Ukoliko se želi postići što bolja kvaliteta rezanja udaljenost pištolja od radnog komada se mora održavati u jako niskim tolerancijama. Neki mehanizirani plazma pištolji su opremljeni s automatskim kontrolnim uređajima kako bi se održala konstantna udaljenost, odnosno razmak između vrha pištolja i radnog komada. [3]

Plazma pištolj konstruiran je tako da različiti mediji, 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 unutarne dijelove pištolja od topline uzrokovane električnim lukom. Isto tako pištolj sadrži izveden sustav kanalicama 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. Glavni potrošni dijelovi pištolja su elektroda, sapnica, vrtložni prsten, kapica za pričvršćenje i štitna kapa. Što su kvalitetniji i dugotrajniji potrošni materijali plazma pištolja, bolja je i kvaliteta rezanja. [3] [9]



Slika 2.5.4. Osnovni i potrošni dijelovi plazma pištolja ili gorionika [9]

Elektroda može biti od volframa, cirkonija ili uskog komada bakra koji sadrži hafnij koji je odličan vodič električne energije. Zadatak elektrode je primiti električnu struju iz katodnog bloka unutar gorionika na koji je spojen, te usmjeriti naboj kroz svoj vrh što dovodi do stvaranja luka na

radnom komadu. Istrošenje elektrode uzrokuju visoki tlakovi plazmenih plinova, dok niži tlakovi produžuju vijek trajanja.



*Slika 2.5.5. Elektroda [9]*

Sapnica je konstruirana na način da je njen otvor malo veći od promjera fokusiranog ionizirajućeg plazma luka. Sapnica fokusira plazma luk i plin koji ga okružuje kako bi se napravio čist i precizan rez. Kvaliteta rezanja se smanjuje kada je vanjski ili unutarnji dio otvora sapnice oštećen. Oštećenje unutarnjeg dijela sapnice može biti uzrokovano pregaranjem elektrode, problemima oko paljenja luka ili protoka plina, ili krivom postavkom struje koja je prevelika ili preniska. Oštećenje vanjskog dijela sapnice može biti uzrokovano prevelikim štrcanjem metala koje se pojavljuje zbog male udaljenosti pištolja i radnog komada ili pri probijanju debljih materijala. Isto tako do oštećenja vanjskog dijela sapnice može doći zbog problema uspostavljanja električnog luka, između elektrode i radnog komada. [3] [9]



*Slika 2.5.6. Sapnica [9]*

Vrtložni prsten je komponenta unutar plazma pištolja koja vrtloži plin koji okružuje plazma luk. Vanjski sloj plina oko elektrode pomaže u fokusiranju i usmjeravanju luka za veću preciznost rezanja, a vrtloženje pomaže u hlađenju. Budući da zaštitni sloj plina koji okružuje luk dolazi u kontakt sa sapnicom, niže temperature sprječavaju izgaranje sapnice i usporavaju trošenje. Visoka gustoća vrtloga sužava električni luk, povećava tlak plina te doprinosi visokoj kvaliteti reza. Niska gustoća vrtloga omogućava dulji vijek trajanja elektroda, ali daje slabiju kvalitetu reza. [3] [9]



*Slika 2.5.7. Vrtložni prsten [9]*

Kapica za pričvršćenje drži sve potrošne dijelove gorionika zajedno. Budući da su temperature na samom kraju plazma pištolja iznimno visoke, ne troše se samo dijelovi koji stvaraju i fokusiraju luk, već i komponente koje ih drže zajedno. [9]



*Slika 2.5.8. Kapica za pričvršćenje [9]*

Zaštitna kapa plazma pištolja zaštićuje njegove komponente od iskri i rastaljenog metala koji nastaju u procesu rezanja plazmom. Koristi se kako bi se trošenje ostalih komponenata svelo na minimum.



*Slika 2.5.9. Zaštitna kapa [9]*

### **2.5.3. Plazmeni plinovi i zaštitni plinovi**

Plinovi za rezanje i zaštitni plinovi imaju odlučujuću ulogu u kvaliteti i ekonomskoj učinkovitosti procesa rezanja plazmom. Različiti materijali i debljine materijala za uspostavu i prilikom procesa rezanja zahtijevaju odgovarajuće plinove i njihove mješavine kako bi se postigla visoka kvaliteta reza i izbjegla daljnja obrada tj. troškovi nakon rezanja plazmom. Prilikom odabira plina treba uzeti u obzir fizikalna, kemijska i mehanička svojstva plinova. Kako bi se postigla visoka brzina rezanja i dobra kvaliteta rezanja, plazma mlaz mora imati visok sadržaj energije i dobra vodljiva svojstva za prijenos topline na metal, kao i visoku kinetičku energiju. Kemijska svojstva redukcije i oksidacije imaju velik utjecaj na oblik reznih rubova, a time i na naknadne troškove završne obrade. Inertni i aktivni plinovi i njihove mješavine općenito su prikladni kao plazma plinovi. Plazma i zaštitni plinovi koji se mogu koristiti su argon, vodik, dušik, kisik, njihove mješavine i zrak. [1]

Karakteristike plinova za rezanje i zaštitnih plinova, njihova primjena i utjecaj će biti opisani kasnije u poglavlju utjecaja parametara na kvalitetu plazma rezanja.

## 2.6. Tehnologije plazma rezanja

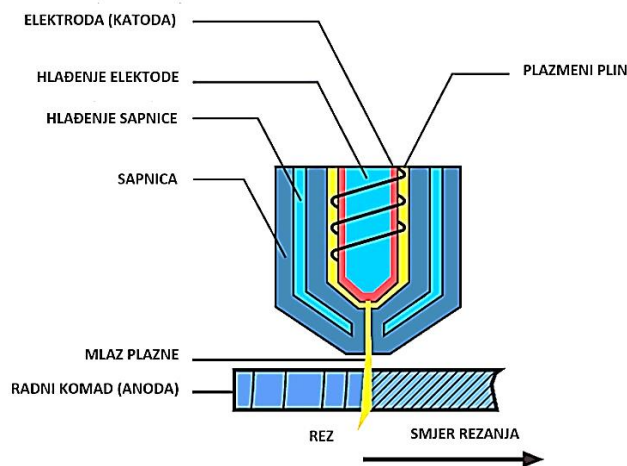
Tehnologije rezanja plazmom stalno se poboljšavaju. Glavni cilj je povećanje i poboljšanje kapaciteta i kvalitete rezanja, smanjenje troškova odnosno broja operacija u proizvodnji i smanjenje okolišnog zagađenja. Ovisno o vrsti materijala koji se reže, njegovoj debljini i jakosti izvora, na tržištu su danas dostupne različite mogućnosti rezanja plazmom. Varijacije ili mogućnosti se uglavnom razlikuju po dizajnu plazma pištolja ili gorionika, vrsti i jakosti izvora i korištenju plazma medija (zrak, voda, plinovi i njihove kombinacije). [1] [3]

Ovisno o dizajnu plazma pištolja ili gorionika, razlikujemo sljedeće varijante rezanja plazmom:

- Konvencionalno rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima.
- Plazma rezanje sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima, plinu ili vodi.
- Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka.

### 2.6.1. Konvencionalno rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima

Kod standardnih uređaja za rezanje plazmom, pištolj plazme je relativno jednostavan i dizajniran je za samo jedan plin, plin za rezanje koji ima dvije zadaće, razvija luk plazme i hladi dijelove unutar plazma pištolja. Plinovi koji se koriste za rezanje su dušik, kisik ili mješavine argona i vodika, a može se isto tako koristiti i komprimirani zrak koji koristi posebnu elektrodu od hafnija ili cirkonija montiranu u bakreni držač. Plazma luk je sužen unutarnjim promjerom sapnice, stvarajući zakošene rezne površine koje su tipične za ovu metodu. Uglavnom se ovaj postupak koristi kod ručnih postupaka rezanja, gdje nisu potrebni visoki zahtjevi za kvalitetu reza. Koristi se za materijale tanje od 16 mm i struje do 100 A. [1] [3]



Slika 2.6.1. Konvencionalno rezanje plazmom bez sekundarnog [1]

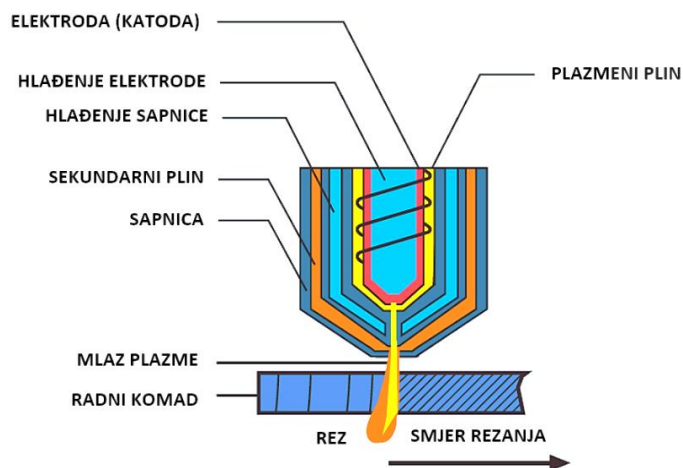
## 2.6.2. Plazma rezanje sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima, plinu ili vodi

Sekundarni medij dovodi se oko plazma luka kako bi oko sebe stvorio specifičnu atmosferu. Sekundarni medij može biti voda ili određeni plin. Upotreba plazma pištolja sa sekundarnim medijem, ima prednosti kod:

- proizvodnje manjih dijelova,
- čestog probijanja (početaka rezanja),
- potrebne visoke kvalitete reza, posebno kod visokolegiranog čelika i aluminija,
- rezanja rešetaka ili rezova s prekidima,
- podvodnog rezanja plazmom.

### ➤ Plazma rezanje sa sekundarnim medijem - plin

Koaksijalno sa sapnicom plazma pištolja nalazi se sapnica za dovod rotirajućeg plina, koji „omata“, odnosno štiti plazmeni plin od utjecaja okolne atmosfere. Rotirajući plin i sapnica rotirajućeg plina koja je bez potencijala, štite sapnicu od štrcanja rastaljenog metala, koje se događa prilikom probijanja lima. Kod određenih debljina lima probijanje se izvodi dok pištolj stoji, pa je tako moguće rezanje malih kontura bez početnog, odnosno ulaznog reza. [3]



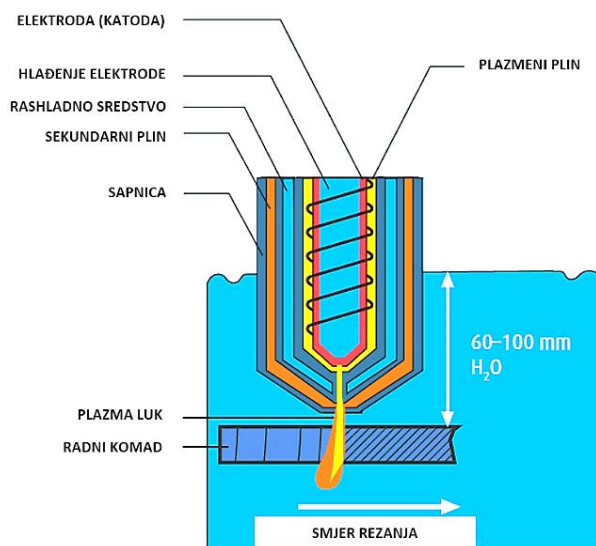
Slika 2.6.2. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom [1]

Rotirajući plin sprječava sudjelovanje okolnog zraka u reakciji plazmenog mlaza i rastaljenog metala u zoni reza. To je posebno važno kod rezanja visokolegiranih čelika, gdje inače dolazi do reakcije kisika sadržanog u zraku s površinom reza, koji izaziva njenu oksidaciju i u većini slučajeva naknadnu obradu skidanja nastalih oksida. Upotreba dušika kao rotirajućeg plina je nužna za rezanje bez srha kod limova od visokolegiranih čelika debljine do 20 mm. [1] [3]



Najveća prednost ovog procesa je da sekundarni plin povećava suženje luka i ima učinkovitije otpuhivanje taloga. U ovoj vrsti procesa rezanja primarni plin je obično dušik, a sekundarni zaštitni plin odabire se ovisno o materijalu kojeg treba rezati. Za sekundarnu zaštitu obično se koriste: zrak ili kisik za meki čelik, ugljični dioksid za nehrđajući čelik i mješavina argona i vodika za aluminij. Brzina rezanja plazmom s dva plina je veća nego kod konvencionalnog rezanja plazmom. [3]

Zbog zaštitnog djelovanja rotirajućeg plina, takvi plazma pištolji mogu se rabiti i za podvodno rezanje plazmom (Slika 2.6.3.). Nasuprot suhom rezanju plazmom, kod podvodnog rezanja je značajno reducirana buka te pojava prašine i aerosola, a ultraljubičasto zračenje luka se dodatno filtrira u vodi. Deformacija radnih komada, također je vrlo mala, ali je potrošnja energije veća u odnosu na suho rezanje plazmom. Maksimalna debljina lima koja se može rezati suhim rezanjem plazmom iznosi 180 mm pri jačini struje od 600 A, a kod podvodnog rezanja iznosi 100 mm pri 750 A. [1] [3]

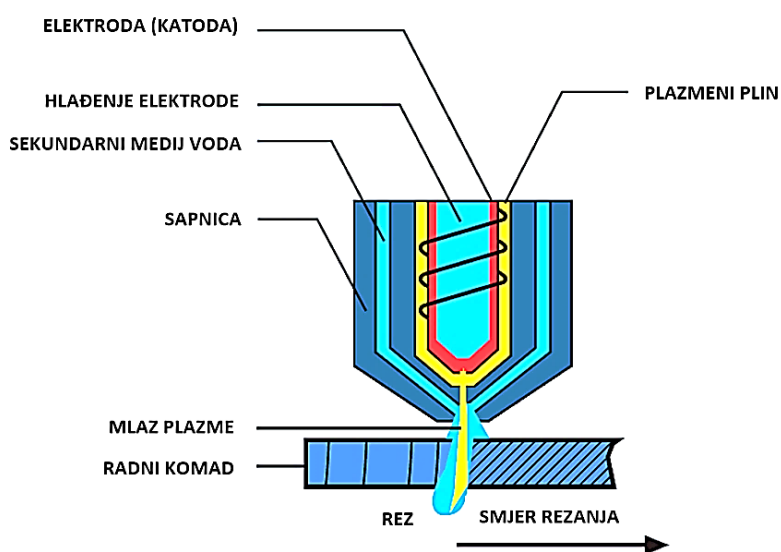


Slika 2.6.3. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim medijem [1]

Kod plazma rezanja pod vodom radni komad je uronjen 60 – 100 mm u vodu. Isto tako sapnica je za vrijeme rezanja pod vodom. Na taj način su uvelike smanjeni štetni utjecaji postupka rezanja plazmom na okoliš, a i smanjen je utjecaj razvijene topline na kvalitetu reza. S druge strane, nedostatak rezanja plazmom pod vodom je da radni komad nije vidljiv za vrijeme rezanja i ne može se vidjeti da li se ostvaruje kvalitetan i traženi rez. Brzine rezanja su smanjene za 10 – 20%, a i smanjena je mogućnost rezanja većih debljina radnog komada. Rezanje se izvodi u kadama, odnosno stolovima koji imaju mogućnost naplavlivanja vodom koje je potrebno periodički čistiti što rezultira zaustavljanjem proizvodnje na nekoliko sati, također i dodatnim troškovima održavanja, a to je još jedan nedostatak primjene plazma rezanja pod vodom. Kako bi se izbjegli dodatni troškovi čišćenja stolova i zaustavljanja proizvodnje, danas su razvijeni vodeni stolovi koji imaju mogućnost samočišćenja što predstavlja praktično i ekonomično rješenje za korisnike. [3]

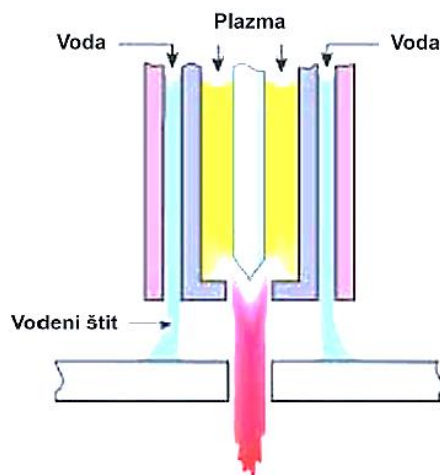
- **Plazma rezanje sa sekundarnim medijem – voda:**
  - **Plazma rezanje injektiranom vodom**
  - **Plazma rezanje pod zaštitom vode**

**Plazma rezanje injektiranom vodom** koristi samo jedan plin za plazmu, a vodu ubrizgava radijalno ili vrtložno direktno u luk čime se postiže sužavanje luka i povećanje gustoće plazmenog luka. Hlađenje radnog komada kroz ubrizganu vodu i velika brzina rezanja omogućuje rezanje bez srha i dulji vijek trajanja potrošnih dijelova. Pojava stvaranja dvostrukog električnog luka, najvećeg uzročnika uništenja sapnice, ovom je tehnikom eliminirana. Postupak se koristi kod struja od 260 do 750 A za visokokvalitetno rezanje raznih materijala i debljina. Primjenjuje se samo za strojni mehanizirani postupak rezanja. Pored dušika, za plazmeni plin može se koristiti i zrak što čini postupak bitno jeftinijim. Fizikalno, dušik je najpovoljniji za korištenje zbog svoje sposobnosti prijenosa topline električnog luka na radni komad. Unatoč visokim temperaturama na mjestu gdje se voda ubrizgava u električni luk, manje od 10 % vode isparava. Ostatak vode, osim navedenih poboljšanja, služi i za hlađenje gornje površine radnog komada. Isto tako, ovo dodatno hlađenje sprječava nastajanje oksida na površini reza i pridonosi učinkovitom hlađenju sapnice na mjestu najvećeg toplinskog opterećenja. [3]



Slika 2.6.4. Plazma rezanje s injektiranom vodom [1]

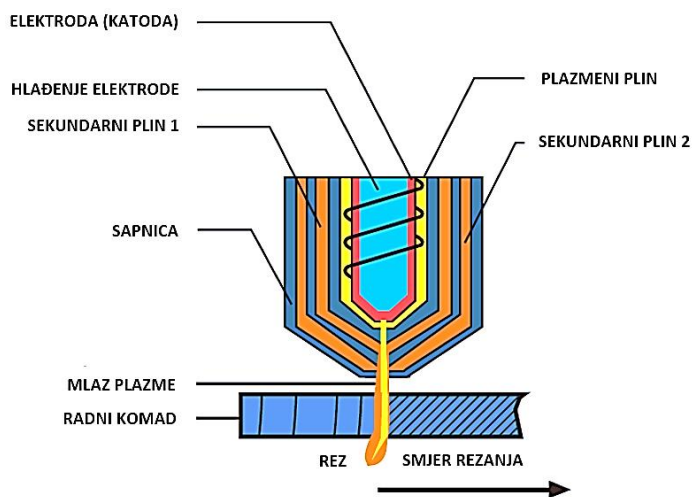
**Plazma rezanje pod zaštitom vode** koristi vodu koja pruža bolje hlađenje sapnice i radnog komada te bolju kvalitetu reza kod rezanja visokolegiranih čelika i aluminija do 50 mm debljine. Vodeni štit služi za razbijanje plazmenog luka i pritom dolazi do redukcijskog djelovanja pri čemu nastaje vodik koji pogoduje kvaliteti rezanja. Rezultat nastajanja vodika je sjajna metalna površina reza. [3]



Slika 2.6.5. Plazma rezanje pod zaštitom vode [3]

### 2.6.3. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka

Postupak uključuje povećanje gustoće luka odnosno povećanja gustoće energije električnog luka, dok su manje brzine rezanja potrebne kako bi se ostvarili precizniji pomaci kod rezanja. Povećanje gustoće luka ostvaruje se korištenjem sapnica s većim suženjem. Različiti proizvođači koriste različite metode za sužavanje luka neke od njih omogućuju izradu vertikalnih rezova visoke preciznosti prilikom rezanja metalnih limova debljina 0,5 do 25 mm. [3]



Slika 2.6.6. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka [1]

Neke od karakteristika ove tehnike su uska širina reza, manja deformacija zbog manjeg utjecaja topline. Kvaliteta rezanja nalazi se između konvencionalnog rezanja plazma lukom i rezanja laserskom zrakom. Glavni nedostatak je mogućnost rezanja debljina materijala samo do 20 mm, brzina rezanja manja je od konvencionalne plazme i još manja od brzine laserskog rezanja (60 – 80% manja). [1] [3]

## 2.7. Utjecajni parametri kvalitete plazma rezanja

Neodgovarajuća kvaliteta rezanja i reza zahtijeva naknadnu obradu i povisuje troškove proizvodnje. Kako bi se ostvarila zadovoljavajuća kvaliteta rezanja plazmom, potrebno je voditi računa o brojnim parametrima, a kao najvažnije parametre valja izdvojiti:

- snagu plazmenog mlaza,
- brzinu rezanja,
- odabir plazmenog plina,
- odabir sekundarnog plina (ako se koristi),
- udaljenost pištolja plazme od radnog komada,
- (is)trošenje sapnice i potrošnih dijelova pištolja ili gorionika.

### 2.7.1. Snaga plazmenog mlaza

Snaga plazmenog mlaza proizlazi iz izvora za plazma rezanje, odnosno iz uređaja koji služi za pretvaranje izmjenične struje u istosmjernu struju konstantnog napona koji najčešće varira između 200 i 400 V (ovisno o postavkama unesenim od strane operatera), iako ti iznosi mogu biti i manji od 200 V, odnosno veći od 400 V. Operater na izvoru, također određuje jačinu električne struje koja mu je potrebna za vršenje rezanja, tako da za tanje materijale može tražiti manju električnu struju od izvora, odnosno veću za rezanje debljih materijala. Izvori struje uvelike variraju u snazi, odnosno jačini struje koju mogu koristiti za stvaranje plazmenog luka. Tako postoje, primjerice, manja napajanja snage 5 kW koja su predviđena za rezanje niskougličnog čelika i aluminija manjih debljina (do 16 mm) sa strujom od 10 do 45 A, ali i veća napajanja koja raspolažu snagom većom od 66,5 kW i mogu rezati i nehrđajuće čelike debljine 75 mm sa strujom od čak 300 A. [5]

### 2.7.2. Brzina rezanja

Cilj svake obrade je postizanje što bolje kvalitete konačnog proizvoda, uz maksimalnu proizvodnost. Prevelika ili premala brzina rezanja uzrok je lošijoj kvaliteti reza zato valja voditi računa o višestrukim faktorima kao što su:

1. postizanje maksimalnog mogućeg životnog vijeka potrošnih dijelova (elektrodi i sapnica),
2. minimalna količina šljake na radnom komadu,
3. minimalna naknadna obrada izrezanog komada,

4. minimalna ostvariva širina zasjeka,

5. postizanje dimenzijske i geometrijske točnosti izrezanog komada. [5]

Brzina rezanja izravno utječe na sve navedene faktore, odnosno, kako se mijenja iznos brzine rezanja, tako se mijenja i širina zasjeka, količina šljake, životni vijek potrošnih dijelova i dr.. Prevelika brzina uzrokuje da luk zaostaje i oscilira što stvara stepeničaste brazde u obliku slova S i veliki nagib reza ili se može dogoditi da materijal biva nepotpuno rastaljen i odnesen iz zone rezanja. Smanjena brzina rezanja uzrokuje povećanu količinu šljake s donje strane radnog komada što dovodi do povećane potrebe za naknadnom obradom odrezanog komada, a može uzrokovati i povlačenje plazmenog luka koje dovodi do bržeg erodiranja elektrode i sapnice. [5]

Proizvođač izvora struje za rezanje najčešće prilaže podatke za svaki pojedini model s preporučenim iznosima struje, napona i brzine rezanja u ovisnosti o materijalu koji se reže i njegovoj debljini, iako operater te vrijednosti može dodatno korigirati prema vlastitom iskustvu, odnosno preporučene vrijednosti mogu se povećati ili smanjiti obzirom na potrošenost elektrode i sapnice, razinu vlage i temperaturu prostorije unutar koje se vrši rezanje, stanje površine materijala koji se reže. Najbolji način procijene brzine rezanja je promatrati luk koji bi trebao biti vertikalna u odnosu na radni komad, odnosno nagib luka na izlaznom bridu trebao bi biti jednak nuli. [1] [5]

### **2.7.3. Odabir plazmenog plina**

Odabir plazmenog plina odnosi se na sve plinove ili mješavine plinova koji se mogu koristiti za stvaranje plazme i za sam proces rezanja. Korištenje odgovarajućeg plina igra odlučujuću ulogu u kvaliteti i ekonomskoj učinkovitosti procesa rezanja plazmom. Različiti materijali i različite debljine materijala zahtijevaju plazma rezanje s odgovarajućim medijima. Ti mediji mogu biti plinovi, plinske mješavine ili voda. Mediji poput plinova koji se koriste mogu biti jedan element ili mješavine. Najčešće se koriste zrak, kisik, dušik, argon ili mješavina argona i vodika. Kako bi se izbjegla daljnja obrada nakon rezanja plazmom, potrebno je koristiti odgovarajući plazma plin. Prilikom odabira plina treba uzeti u obzir fizikalna i mehanička svojstva plinova. Kako bi se postigla velika brzina rezanja i dobra kvaliteta rezanja, plazma mlaz mora imati visok sadržaj energije i dobra vodljiva svojstva za prijenos topline na metal, kao i visoku kinetičku energiju. Kemijska svojstva kao što su redukcija i oksidacija imaju veliki utjecaj na oblik izrezanih rubova, a time i na sve naknadne troškove dodatne obrade. [1]

Plazmeni plin kao parametar utječe na sljedeće čimbenike kvalitete:

- pravokutnost reza,
- hrapavost reza,
- oblik gornjeg ruba reza i
- formiranje neravnina.

Uz odabir optimalnog plazmenog plina za materijal koji se njime reže, potrebno je koristiti i preporučeni, odnosno odgovarajući protok plina. Protok plina je, kao i jačina struje i napona za rezanje, ovisan o debljini materijala koji se reže te o napajanju, odnosno gorioniku koji se koristi, a preporuča ga proizvođač napajanja i/ili gorionika. Prenizak ili previsok protok za primijenjenu sapnicu i elektrodu mogu uzrokovati formiranje dvostrukog plazmenog luka – prvi je pri tome neprenesen, odnosno teče od elektrode do sapnice, a drugi je preneseni i teče od sapnice do radnog komada. Dvostruki luk obično uzrokuje katastrofalno razaranje elektrode ili rastapanje sapnice. [5]

Čistoća korištenog plina također je od velike važnosti; primjerice minimalna potrebna čistoća dušika za plazma rezanje je 99,995%, odnosno kisika 99,5%. Ako potrebna čistoća plina nije zadovoljena, može doći do smanjenja kvalitete reza, značajnog smanjenja životnog vijeka elektrode i/ili nemogućnosti probijanja tanjih materijala. Uz karakteristike koje utječu na rezna svojstva plina, valja također voditi računa i o pojedinostima kao što su dobavljalivost, cijena i čistoća plina. [1] [5]

**Zrak** se u osnovi sastoji od dušika (78,18 % po volumenu) i kisika (20,8% volumena) te ostalih elemenata. Zrak koji se koristi kod plazma rezanja je komprimirani zrak i očišćen je od vlage i nečistoća. Jako je bitno voditi računa u pripremi zraka, to jest filtraciji i uklanjanju vlage prije nego što zrak dođe do napajanja. Zrak smanjuje troškove rezanja jer nije potrebna njegova nabavka za razliku od ostalih plinova koji se moraju koristiti u bocama pod tlakom, što je skuplje, ali i opasnije za skladištenje. Najčešće se koristi kod ručnog rezanja. Upotrebom zraka može doći do pojave nitracije i oksidacije reza što kasnije može uzrokovati poroznosti u zavarenim spojevima. Zrak se koristi kao plazma plin za rezanje nelegiranog, niskolegiranog i visokolegiranog čelika te aluminijsa. [1] [5]

**Kisik** djeluje oksidirajuće na talinu te proizvodi dodatnu toplinu koja može povećati rezanje. Koristi se kod rezanja nelegiranih i niskolegiranih čelika gdje postiže najbolju kvalitetu i najveću brzinu rezanja u odnosu na korištenje dušika ili zraka. Korištenjem kisika smanjuju se troškovi i povećava se produktivnost jer nisu potrebne dodatne operacije nakon rezanja, rez je ravan i nije potrebno uklanjanje srha. [1] [3]

**Dušik** s materijalom reagira samo pri visokim temperaturama, dok pri niskim temperaturama ostaje inertan. Po svojim fizikalnim svojstvima odnosno toplinske vodljivosti i atomske težine dušik ima svojstva slična argonu i vodik. Svojstva rezanja čistim dušikom bitno se razlikuju od rezanja zrakom, brzine rezanja su manje, ali su zato manje i temperature rezanja, što značajno produljuje životni vijek elektroda i sapnica. Kvaliteta reza na aluminiju i visokolegiranom čeliku je izvrsna, dok je kod ugljičnih čelika nešto lošija jer dolazi do nitracije rezne površine i stvaranja šljake. [1]

**Argon** s volumenom od 0,9325%, jedini je inertni plin koji se može komercijalno proizvoditi tehnologijom odvajanja iz zraka. Kao inertni plin kemijski je neutralan. Zbog svoje visoke atomske težine, argon potiče ispuhivanje rastaljenog materijala iz reza. Njegova niska energija ionizacije omogućava laganu uspostavu električnog luka plazme. Zbog svoje relativno slabe toplinske vodljivosti i entalpije, argon nije potpuno idealan kao plin za rezanje plazmom, budući da dopušta samo relativno malu brzinu rezanja i dovodi do tupe, ljuskaste površine reza. Koristi se kao mješavina zbog male toplinske vodljivosti i visoke cijene. [1]

#### **Vodik + Argon**

Vodik u usporedbi s argonom ima vrlo nisku atomsku težinu i pokazuje relativno visoku toplinsku vodljivost (Slika 2.7.1.), disocira pri visokim temperaturama što rezultira suženjem električnog luka i većom gustoćom toplinske energije. Vodik kao čisti plin nije pogodan kao plazma medij. Međutim, ako se pozitivna toplinska svojstva vodika, visoki sadržaj energije i entalpija kombiniraju s velikom atomskom težinom argona, rezultirajuća plinska smjesa nudi brz prijenos visoke kinetičke energije (atomske težine), kao i dovoljnu toplinsku energiju na materijal koji se reže. Mješavina ovih dvaju plinova daje rezove visoke kvalitete za aluminij i nehrđajući čelik, a posebice se koristi kod rezanja većih debljina navedenih materijala (do 75 mm). [1] [3]

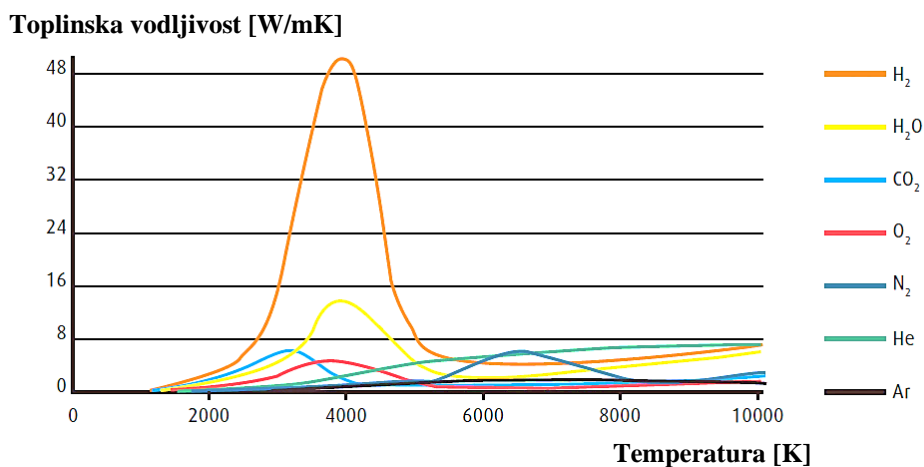
#### **Vodik + Dušik**

Smjese dušika i vodika često se koriste za rezanje visokolegiranih čelika i aluminija. Mješavina vodika s dušikom omogućuje rezove s ravnim rubovima pri znatno većim brzinama rezanja u odnosu na mješavinu vodika i argona. Oksidacija na reznim površinama je manja nego kada se koristi čisti dušik. [1]

#### **Argon + Vodik + Dušik**

Smjese argona, vodika i dušika se koriste za rezanje visokolegiranih čelika i aluminija. Nude vrhunsku kvalitetu i predstavljaju manje problema u stvaranju srha u odnosu na smjesu argona i vodika. Najčešće korištene mješavine sastavljene su od 50 do 60% argona i 40 do 50% dušika i

vodika. Postotak dušika je obično čak 30%. Količina vodika ovisi o debljini materijala, odnosno što je materijal deblji, treba koristiti više vodika. Dodatkom dušika u smjesi argon + vodik pri rezanju visokim brzinama visokolegiranih čelika i konstrukcijskih čelika rezne površine su bez srha. [1]



Slika 2.7.1. Utjecaj temperature na toplinsku vodljivost plinova [1]

Inertni i aktivni plinovi i njihove smjese općenito su prikladni kao plazmeni plinovi. Zaštitni plinovi za plazma rezanje su u skladu s normom HR EN ISO 14175:2008 (plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i za srodne postupke) u pogledu njihovih oznaka, preciznost miješanja i čistoća. Iako korištenje sekundarnog / zaštitnog plina nije obavezno kod plazma rezanja, ono ima značajne prednosti u ostvarivanju kvalitete reza.

Tablica 1. Inertni i aktivni plinovi i njihove smjese kao plazmeni i zaštitni plinovi

MATERIJAL	PLAZMENI PLIN	SEKUNDARNI / ZAŠTITNI PLIN
KONSTRUKCIJSKI ČELIK	ZRAK	ZRAK
	KISIK	ZRAK
		ZRAK + DUŠIK
		KISIK
		KISIK + DUŠIK
VISOKOLEGIRANI ČELIK	ZRAK	ZRAK
	ARGON + VODIK	DUŠIK
	ARGON + VODIK + DUŠIK	DUŠIK
ALUMINIJEVE LEGURE	ZRAK	ZRAK
	ARGON + VODIK	ZRAK
		DUŠIK
	ZRAK	DUŠIK + VODIK

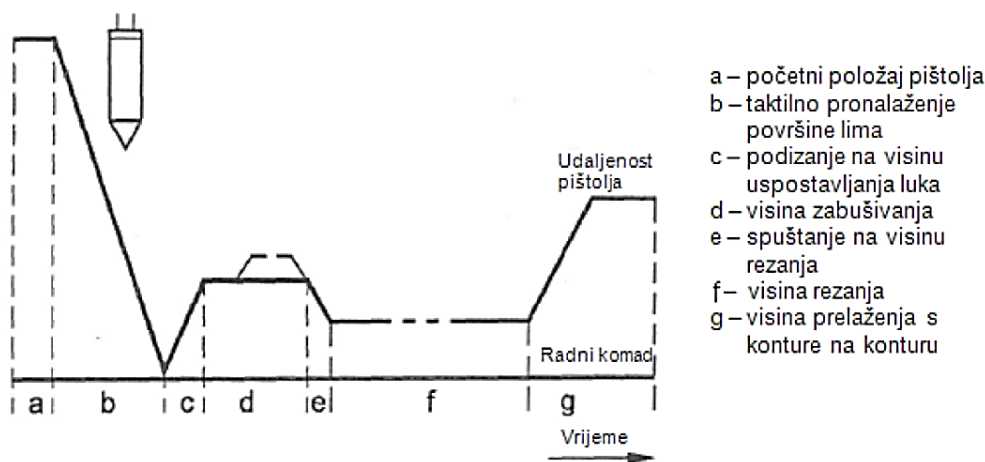
CNC strojevi za plazma rezanje rade s jednim ili više različitih plinova. Količina plazma i sekundarnih plinova za rezanje ovisi o različitim čimbenicima kao što su promjer sapnice, tlak plina i struja rezanja. Potreban opskrbeni tlak i protok ovise o vrsti opreme koja se koristi. Ako protok plina u sustavu plazma rezanja padne ispod vrijednosti koju je odredio proizvođač, plazma gorionik može biti ozbiljno oštećen. Također, postoje minimalni zahtjevi čistoće za plinove koji se koriste u plazma rezanju nelegiranih, niskolegiranih i visokolegiranih čelika te aluminija.



Nepridržavanje čistoće plinova može ugroziti kvalitetu i ekonomsku učinkovitost plazma rezanja. Kod plazma rezanja sa zrakom, kada se zrak dovodi pomoću kompresora apsolutno je neophodno održavati zahtjeve u pogledu maksimalne veličine čestica, sadržaja zaostalog ulja i točke rosišta. Povećani sadržaj ulja i vlage može smanjiti vijek trajanja potrošnih dijelova i povećati šanse za uništenje plazma pištolja ili gorionika.

#### 2.7.4. Regulacija visine pištolja i radnog komada

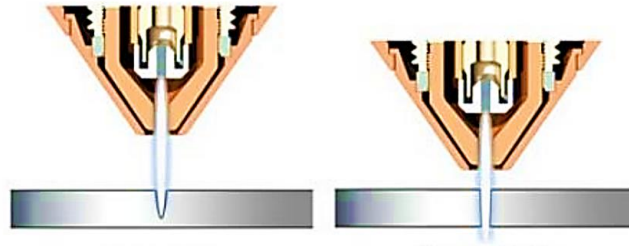
U procesu rezanja plazmom za postizanje ravnomjerne širine reza i ponovljive geometrije reza od bitnog je značaja optimalno podešen i duž cijelog reza konstantno održavan razmak između pištolja i radnog komada. Pravilna regulacija udaljenosti plazma pištolja omogućuje da se plazma pištolj uvijek nalazi na istoj udaljenosti od radnog komada, bilo da je uzorak valovit ili da neravno naliježe. Optimalna visina pištolja od radnog komada ovisi o vrsti plazma plina (ili mješavine) i materijala koji se reže. Slika 2.7.2. pokazuje shematski prikaz procesa regulacije visine pištolja u odnosu na radni komad u mehaniziranom sustavu. [3]



Slika 2.7.2. Regulacije visine pištolja u odnosu na radni komad [3]

U pravilu na početku rezanja, pomoću taktilnog senzora odredi se početni položaj plazma pištolja tako da se pištolj primiče radnom komadu dok taktilni senzor ne dodirne površinu. Kada senzor dotakne površinu lima zatvara se električni krug. Zatim se pištolj podiže na visinu uspostavljanja električnog luka. Kada se uspostavi električni luk, pištolj se podiže na visinu probijanja (zbušivanja). U procesu probijanja plazma pištolj se nalazi na visini koja je veća od visine rezanja kako bi se spriječilo štrcanje vrućeg metala direktno u sapnicu. Također, kod probijanja je ključno da je sapnica dovoljno blizu radnog komada da prenese plazmeni luk na njega, ali da je istovremeno i dovoljno daleko, tako da rastaljeni materijal koji se nakuplja na površini radnog komada pri početku probijanja ne dotakne sapnicu i uzrokuje pojavu dvostrukog plazmenog luka. Po završetku operacije probijanja, računalo je obaviješteno i ono daje signale da

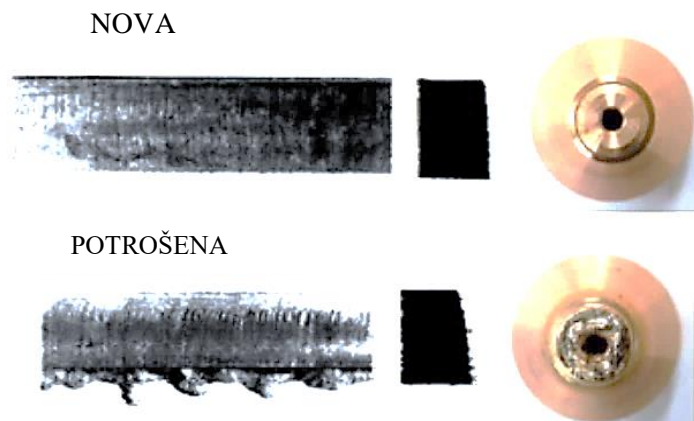
se plazma pištolj spusti na visinu rezanja te tada započinje proces rezanja. Prelaskom s konture na konturu visina između plazme pištolja i radnog komada je veća u odnosu na operacije probijanja i rezanja. [3]



Slika 2.7.3. Visina gorionika prilikom probijanja (lijevo) i rezanja (desno) [5]

### 2.7.5. (Is)trošenje sapnice

(Is)trošenje sapnice ima najveći utjecaj na okomitost reza i toleranciju nagiba te na pojavu srha po reznom rubu. Veličina sapnice ovisi o jakosti struje rezanja. Promjer sapnice od 1,5 mm će podnositi struju od 100 A, dok će sapnica promjera od 6 mm moći podnositi struju od 1000 A. Jakost struje treba biti takva da se ostvaruje 95% izlazne snage na sapnici. Manja izlazna snaga, odnosno manja jakost struje od one za koju je sapnica predviđena imati će kao posljedicu manju energiju plazmenog mlaza, nefokusirani mlaz te prljav rez. S druge strane prevelika izlazna snaga, odnosno jakost struje imati će za posljedicu slabiji luk i grublju površinu reza. [3]



Slika 2.7.4 Kvaliteta reza ovisi o stanju istrošenosti sapnice [11]

### 3. SPECIFIČNOSTI KOD PLAZMA REZANJA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Plazma rezanje je jedno od najučinkovitijih metoda rezanja nehrđajućeg čelika u širokom rasponu debljina. Nehrđajući čelik je mnogo čvršći materijal od niskougličnog čelika i apsorbira više energije tijekom procesa rezanja i stoga za njegovo rezanje je potrebno puno više topline. Rezanje nehrđajućeg čelika zahtijeva drugačije parametre odnosno veće parametre rezanja u odnosu na niskouglični čelik. Kod rezanja nehrđajućih čelika plazma postupkom, na kvalitetu reza važnu ulogu imaju slijedeći utjecajni čimbenici:

#### 3.1. Čimbenici koji utječu na stabilnost plazmenog luka

- Stanje potrošenosti sapnice pištolja.
- Struja i brzina rezanja.
- Odabir i doziranje plazmenih i sekundarnih plinova.
- Položaj materijala i geometrija gorionika. [12]

#### 3.2. Čimbenici koji utječu na sustav vođenja i upravljanja

- Precizna kontrola pokreta CNC stroja.
- Glatki linearni pogonski sustavi.
- Programske kontrole koje automatski kompenziraju i osiguravaju odgovarajuću brzinu, ubrzanje i usporavanje tj. visoku dinamiku gibanja stroja. [12]

#### 3.3. Tehnički plinovi u procesu rezanja

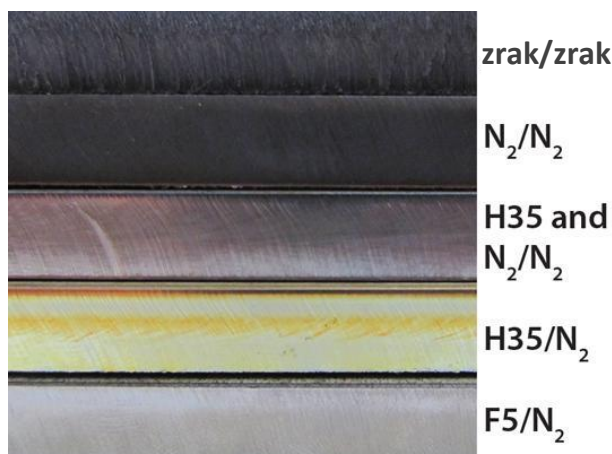
Odgovarajući odabir plina prvi je korak prema uspjehu pri korištenju plazme za rezanje nehrđajućeg čelika. Vrste plinova i medija koji se najčešće koriste su zrak, dušik, mješavine plinova i voda. [12]

Proizvođači kojima je potrebna profinjenija površina rezanja nehrđajućeg čelika s dobrom bojom i oštrim gornjim rubom moraju koristiti mješavine plinova ili medija za najbolje rezultate. Moderni postupci rezanja s vodom povećavaju kvalitetu plazma rezanja na tankim i srednje debelim limovima, ali prije odabira ovih opcija treba uzeti u obzir veće troškove opreme.

**Zrak** koji se koristi i kao plin za rezanje i kao zaštitni plin uobičajeni je izbor za velike brzine rezanja i niske troškove, ali ostavlja trag jako oksidirane površine reza koja često zahtijeva radno intenzivne sekundarne operacije za uklanjanje. [15]

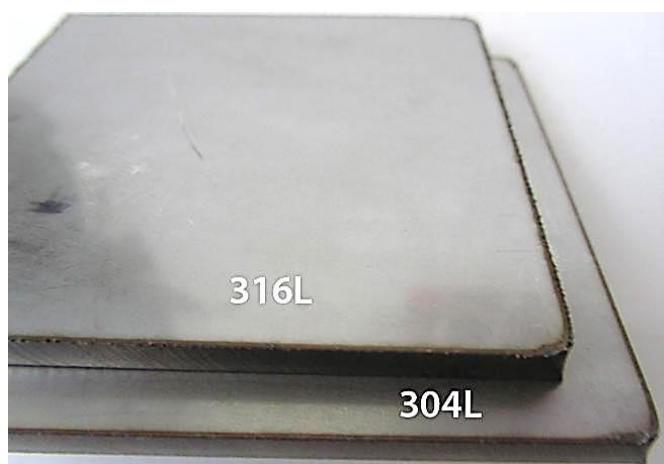
**Dušik** kao plazma plin i zaštita ( $N_2 / N_2$ ) osigurava veću brzinu rezanja s glađom površinom rezanja i manje oksida, ali proizvodi crnu površinu reza, što je slično kombinaciji zrak / zrak. Također, može doći do zaobljenja gornjeg ruba i značajnog kuta nagiba reza. [15]

**Mješavine plazma plinova** koji sadrže nešto vodika proizvode bolje izrezane rubove s bojom sličnom osnovnom materijalu. Dva najčešća specijalna plina koja sadrže vodik su H35 (35% vodika i 65% argona) i F5 (5% vodika i 95% dušika). [15]



*Slika 3.3.1. Različite kombinacije plazma i zaštitnog plina na nehrđajućem čeliku [15]*

Sljedeći faktor za uspješno rezanje nehrđajućeg čelika plazmom je vrsta nehrđajućeg čelika. Npr. nehrđajući čelik X2CrNi18-9, austenitni nehrđajući čelik, najčešće je korištena klasa u cijelom svijetu. Kada se rezni parametri materijala X2CrNi18-9 primijene na drugu sličnu austenitnu leguru pri plazma rezanju, npr. X2CrNiMo17-12-2 iste debljine, može doći do pojave šljake i grubog reznog ruba. Ne postoje univerzalni parametri za sve klase nehrđajućih čelika iste debljine koji daju jednaku ili približnu kvalitetu reza. Slika 3.3.2. prikazuje da korištenjem istih parametara i postavki procesa plazma rezanja, nehrđajućih čelika X2CrNi18-9 (AISI 304L) i X2CrNiMo17-12-2 (AISI 316L), za dijelove debljine 5 mm dobivamo različite rezultate površine reza. [15]



*Slika 3.3.2. Plazma rezanja nehrđajućeg čelika [15]*

Kad se niskouglični konstrukcijski čelik reže s kisikom kao plazma plinom i zrakom kao zaštitnim plinom, viskoznost rastaljenog materijala mnogo je niža nego kod rezanja visokolegiranog čelika. Problem visoke viskoznosti predstavlja nastala šljaka koja se stvrdne na dnu ploče. Za razliku od meke čelične šljake, koju je lako ukloniti, plazma šljaku od visokolegiranog čelika teško je ukloniti. Prilikom probijanja visokolegiranog čelika debljine više od 50 mm, operater stroja često mora prilagoditi kretanje plazma pištolja kako bi se prilagodio velikim količinama šljake ili mora probušiti, zaustaviti i ostrugati šljaku prije nego što se stvrdne i zalijepi. Stoga je potrebno izbjeći nakupljanje šljake što je više moguće. [15]

Odgovarajući dizajn opreme, vrsta plina, postavka plina, brzina rezanja i visina rezanja mogu pomoći u smanjenju ili čak uklanjanju stvaranja nehrđajuće šljake. Jedna od metoda je vrtloženje zaštitnog plina u suprotnom smjeru od plazma plina što uzrokuje da se šljaka zalijepi na kostur ploče umjesto na odrezani komad.



*Slika 3.3.3. Nakupljena šljaka na površini ploče [15]*

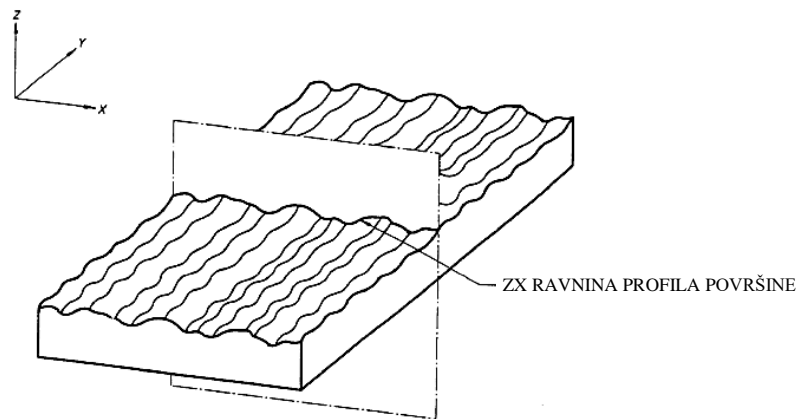
Tanki limovi od nehrđajućeg čelika najčešće su obloženi polietilenskom prevlakom koja se koristi za zaštitu polirane površine nehrđajućeg čelika od oštećenje prilikom različitih manipulacija u proizvodnji. Rezanje ovog materijala bez spaljivanja i taljenja polietilenskog filma zahtijeva upotrebu pomoćnog plina dušika pri plazma rezanju. Pomoćni plin dušik ispire šljaku s proreza. Također, štiti zonu rezanja od kisika, sprječavajući spaljivanje polietilenskog filma. Polietilenska prevlaka mora dovoljno dobro prianjati da izdrži jaku silu puhanja zaštitnog plina. Lim je potrebno postaviti na stol stroja za rezanje s obloženom stranom prema gore. Plazma neće rezati nehrđajući čelik obložen polietilenskom prevlakom kada je materijal obložen s obje strane. Polietilenska prevlaka na donjoj strani čelične ploče spriječit će zatvaranje strujnog kruga i neće doći do uspostave plazma rezanja. [15]

## 4. ISPITIVANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE

### 4.1. Definicija hrapavosti

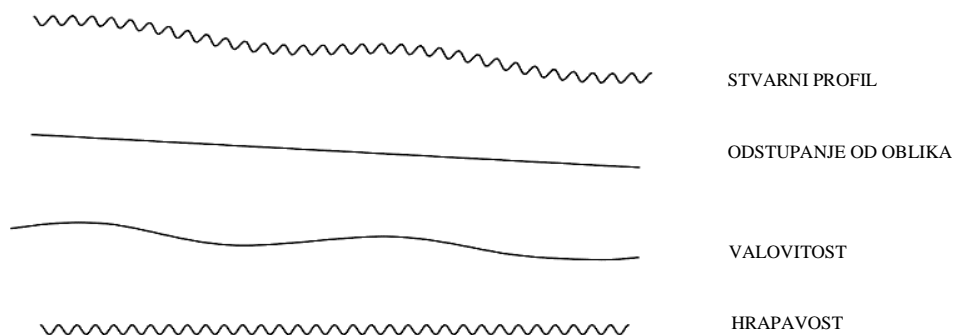
Hrapavost je komponenta teksture površine odnosno mikrogeometrijske nepravilnosti. Rezultat je djelovanja nekog postupka obrade na površini materijala. Izražava se preko amplitudnih parametara koji opisuju varijacije po visini profila i koji se najčešće koriste u industrijskoj praksi.

2D mjerenje profila površine je mjerenje linije površine koja se može opisati matematički kao funkcija  $z = f(x)$ , odnosno mjerenje okomito na smjer tragova. Profil površine rezultat je presjeka realne površine i ravnine. [13]



Slika 4.1.1. 2D mjerenje površine hrapavosti [13]

2D sustav ispitivanja hrapavosti površine temelji se na mjerenju dvodimenzionalnog profila na kojem se računaju 2D parametri hrapavosti. Mjernim uređajem (elektroničko – mehanički uređaj s ticalom) snima se primarni profil koji uključuje tri komponente profila: odstupanje od oblika, valovitost i hrapavost. [13]

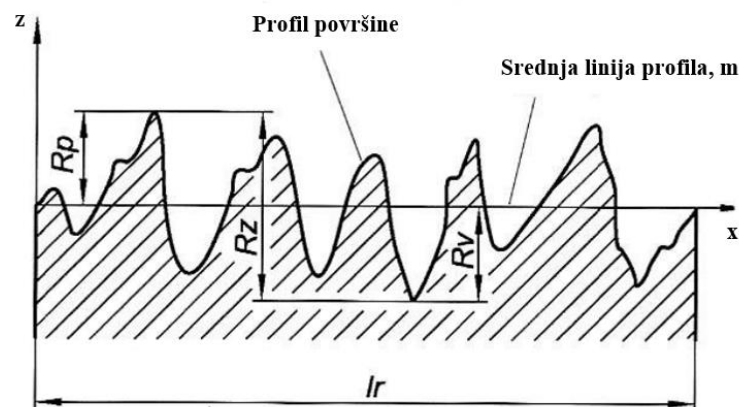


Slika 4.1.2. Komponente profila površine hrapavosti [13]

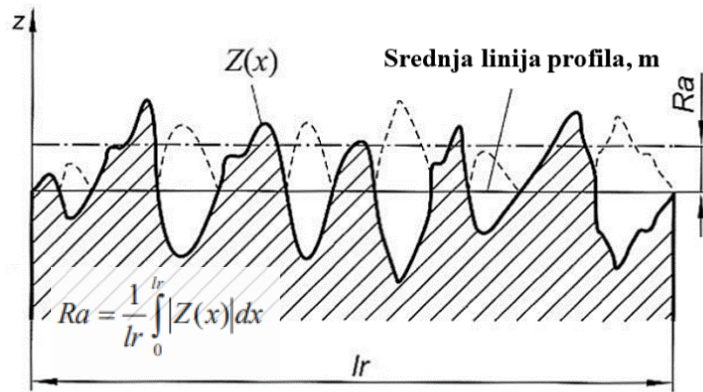
Osnovni pojmovi i definicije mjeriteljstva hrapavosti tehničkih površina definirani su normom HRN EN ISO 4287:2008/A1:2010: Geometrijske specifikacije proizvoda (GSP) -- Tekstura površine: Metoda snimanja profila -- Nazivlje, definicije i parametri teksture površine --

## 4.2. Glavni parametri hrapavosti površine

- Srednja linija profila,  $m$ .
  - Linija koja sječe profil površine tako da je u granicama referentne duljine  $l_r$  zbroj kvadrata udaljenosti svih točaka profila od srednje linije jednak minimumu.
- Najveća visina izbočine (vrha) profila,  $R_p$  [ $\mu\text{m}$ ].
- Najveća dubina izbočine (dola) profila,  $R_v$  [ $\mu\text{m}$ ].
- Prosječna visina neravnina,  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ].
  - Suma visine najvećeg vrha profila i najveće dubine dola na profilu hrapavosti unutar referentne dužine u granicama referentne duljine  $l_r$ ,
  - $R_z = R_p + R_v$  [ $\mu\text{m}$ ]
- Srednje aritmetičko odstupanje profila,  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ].
  - Srednja aritmetička vrijednost apsolutnih vrijednosti profila u granicama referentne duljine  $l_r$ .



Slika 4.2.1. Parametri hrapavosti površine  $m$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$  [13]

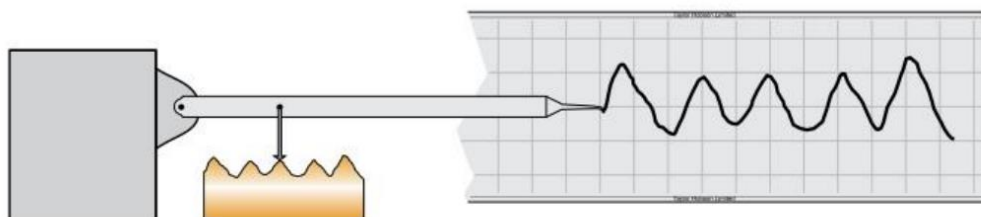


Slika 4.2.2. Srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$  [13]

### 4.3. Metode mjerenja hrapavosti površina

Postoje razne metode mjerenja visine neravnina na određenoj plohi. Najjednostavnije metode su vizualna metoda i metoda ocjenjivanja putem opipa. Uz najjednostavnije, postoje i složenije metode mjerenja koje se dijele na: posredne (indirektne) i neposredne (direktne) metode mjerenja hrapavosti površine. [16]

U posredne metode ubrajaju se: metoda s pastom po Flemmingu, pneumatska metoda, optička metoda, metoda klizanja vodene kapljice i metoda preslikavanja. Kod tih metoda hrapavost se izražava jedinicama kao što su  $\text{cm}^2$ ,  $\text{cm}^3$ ,  $\text{cm}^3/\text{s}$ , s postotkom odbijene svjetlosti ili mjerama za kut. Neposredne metode se dijele na kontaktne i beskontaktne. Rezultat mjerenja neposrednim metodama je određeni profil. Ove se metode zasnivaju na principima optike te se još nazivaju i optičke metode. U njih se ubrajaju: metoda svjetlosnog presjeka, metoda sjene od noža i metoda interferencije svjetlosti. Najčešća metoda koja se koristi pri detektiranju visine neravnina je neposredna kontaktna metoda. Kod kontaktne metode profil površine dobije se mehaničkim kontaktom između igle i površine gdje igla određenog radijusa zaobljenja i pri određenom pritisku dolazi u stalni ili privremeni kontakt sa ispitivanom površinom, a vertikalno pomicanje igle predstavlja dubinu, odnosno visinu neravnina na površini. [16]



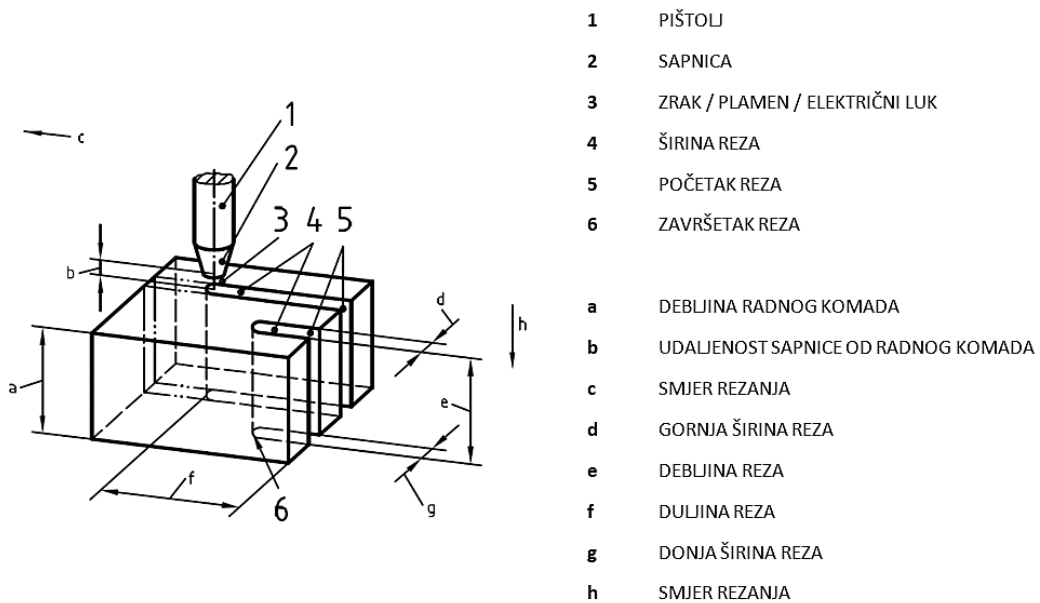
Slika 4.3.1. Neposredna kontaktna metoda mjerenja hrapavosti [16]



## 4.4. Norma HRN EN ISO 9013:2017

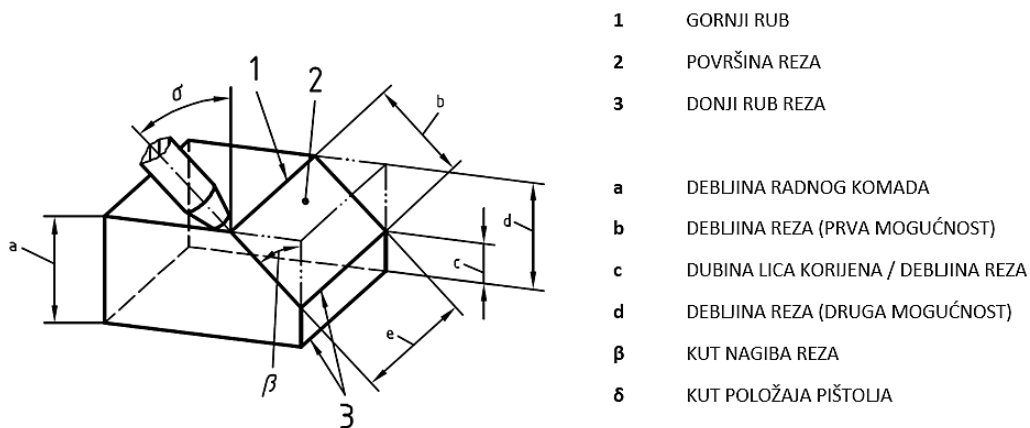
Norma "HRN EN ISO 9013:2017 – Toplinsko rezanje" definira klasifikaciju toplinskih rezanja. Sadrži geometrijske specifikacije proizvoda i tolerancije dimenzija tj. načine definiranja kvalitete. Norma se odnosi na materijale pogodne za plinsko rezanje kisikom od 3 do 300 mm, plazma rezove od 1 do 150 mm i laserske rezove od 0,5 do 40 mm. Važno je odrediti ispravnu kvalitetu za svaki materijal koji se reže. [17]

### 4.4.1. Veličine i definicije u procesu rezanja na radnom komadu



Slika 4.4.1. Veličine i definicije u procesu rezanja na radnom komadu [17]

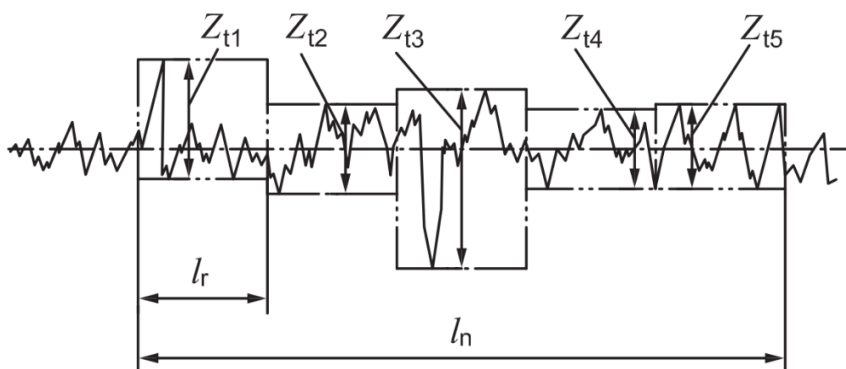
### 4.4.2. Veličine i definicije na izrezanom komadu



Slika 4.4.2. Veličine i definicije na izrezanom komadu [17]

#### 4.4.3. Određivanje hrapavosti površine prema HRN EN ISO 9013:2017

Prosječna visina neravnina ( $R_{z5}$ ) definira se kao aritmetička sredina od pet pojedinačnih izmjerenih udaljenosti profila. Indeks 5 u  $R_{z5}$  dodan je kako bi se istaknula aritmetička sredina i maksimalna visina profila od pet pojedinačnih elemenata. [13]



Slika 4.4.3. Prosječna visina neravnina ( $R_{z5}$ ) [13]

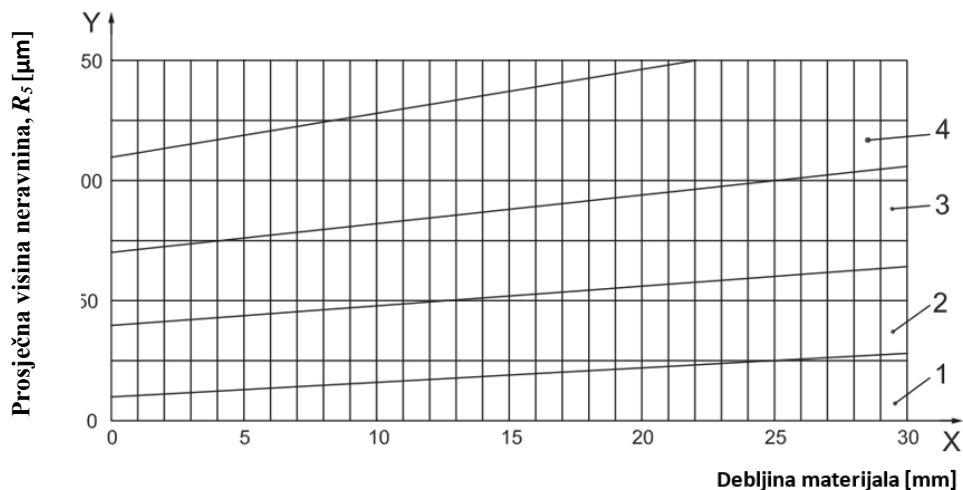
$Z_{t1} - Z_{t5}$  – Pojedinačne visine profila;  $l_n$  – Duljina mjerenja;  $l_r$  – Pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti (1 / 5).

Karakteristična vrijednost prosječne visine neravnina  $R_{z5}$  može biti određena samo u graničnom području površine reza. Mjerenje se izvršava u točki maksimalne hrapavosti površine debljine reza, u skladu s ISO 4288 (Metoda snimanja profila – Pravila i postupci pri procjenjivanju teksture površine). [17]

Za plinsko rezanje kao i za plazma rezanje, mjerenja se uobičajeno izvršavaju na udaljenostima od oko 2 / 3 debljine reza od gornjeg ruba reza. Za debljine reza ispod 2 mm, mjerenje se izvršava na udaljenosti od oko 1 / 2 debljine reza od gornjeg ruba reza. Prosječna visina neravnina  $R_{z5}$  treba biti mjerena svakih 15 mm duljine reza u smjeru napredovanja rezanja. Mjerenje treba izvesti u skladu s ISO 4288 koristeći ispitivač koji je opisan u ISO 3274 (Metoda snimanja profila – Nazivne karakteristike kontaktnih uređaja (s ticalom)). [17]

Tablica 2. Raspon tolerancije hrapavosti

RASPON	Prosječna visina neravnina, $R_{z5}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	10 + (0,6a [mm])
2	40 + (0,8a [mm])
3	70 + (1,2a [mm])
4	110 + (1,8a [mm])



Slika 4.4.4. Prosječna visina neravnina,  $R_{z5}$  – debljine radnog komada do 30 mm

Za određivanje kvalitete površine reza u normi su propisane procedure mjerenja kao i mjerne instrumenti pomoću kojih je moguće odrediti i vrednovati karakteristične vrijednosti reznih površina. Pri izboru mjernih instrumenata mora se voditi računa da moguće greške ne prelaze 20% vrijednosti od karakterističnih vrijednosti koje trebaju biti izmjerene. Za mjerenje hrapavosti  $R_{z5}$  greška izmjerene vrijednosti ne smije biti veća od 0,002 mm. Može se navesti primjer točnosti mjernog instrumenta, npr. električna kontaktna igla instrumenta za kontinuirano skeniranje u smjeru rezanja. Broj i položaj točaka mjerenja ovisi o obliku i veličini radnog komada i ponekad o namijenjenoj upotrebi. Točke mjerenja trebaju biti smještene na mjesta gdje se mogu očekivati maksimalne izmjerene vrijednosti. Pri odabiru točaka mjerenja treba uzeti u obzir činjenicu da se maksimalne vrijednosti stvarne visine profila i tolerancije okomitosti ili kutnosti mogu naći na različitim mjestima reza. Ako se izmjerene vrijednosti nalaze u donjem dijelu polja tolerancije, trebaju biti izvršena dodatna mjerenja prema vizualnom odabiru mjesta gdje se mogu očekivati maksimalne vrijednosti. Ako se izmjerene vrijednosti nalaze u gornjem dijelu polja tolerancije ili ako postoje određene sumnje u pogledu dobivenih rezultata, trebaju biti izvršena pomoćna mjerenja na istom broju s dodatnim točkama mjerenja. [17]

#### 4.4.4. Standard hrapavosti tehničkih površina HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302

Prema standardu HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302, hrapavosti tehničkih površina su podijeljene u 12 stupnjeva, ovisno o najvećoj vrijednosti srednjeg aritmetičkog odstupanja  $R_a$ . U tablici 3. su navedeni stupnjevi i razredi hrapavosti.

Tablica 3. Standard HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302

STUPANJ HRAPAVOSTI		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	
RAZRED HRAPAVOSTI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400

## 5. EKSPERIMENT – Plazma rezanje X5CrNi18-10 čelika

Eksperimentalno ispitivanje konvencionalnog plazma rezanja bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima, realizirano je u laboratoriju za tehnike spajanja na Sveučilištu Sjever. Korišteni materijal u ovom eksperimentu bio je nehrđajući čelik prema ISO normi X5CrNi18-10 ili prema američkoj normi AISI 304, debljine 5 mm. Eksperimentalno ispitivanje vršeno je prvo s preporučenim parametrima od strane proizvođača opreme za plazma rezanje Hypertherm, parametrima brzine rezanja  $v$ , [cm/min] i jakosti struje  $I$ , [A], a zatim su se ti parametri povećavali ili smanjivali. Nakon što je izvršeno plazma rezanje devet uzoraka s promjenjivim parametrima, izmjerena je hrapavost reza svake površine uzorka pomoću uređaja za ispitivanje hrapavosti površine. Nakon mjerenja hrapavosti, uzorcima je dodijeljen stupanj i razred hrapavosti izmjerene površine reza prema normi HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302. Uzorci su kasnije slikani i na njima je provedena računalna analiza slike kako bi se mogao utvrditi utjecaj promjenjivih parametara prilikom plazma rezanja nehrđajućeg čelika zrakom. Utvrđen je utjecaj promjenjivih parametara u pogledu izmjere kuta brazdi i razmaka između najizraženijih brazdi na površini reza. Cilj ovog eksperimenta bio je odrediti utjecaj brzine rezanja i jakosti struje na kvalitetu rezne površine nehrđajućeg čelika AISI 304, debljine 5 mm, prilikom konvencionalnog plazma rezanja sa zrakom.

### 5.1. Materijal za ispitivanje

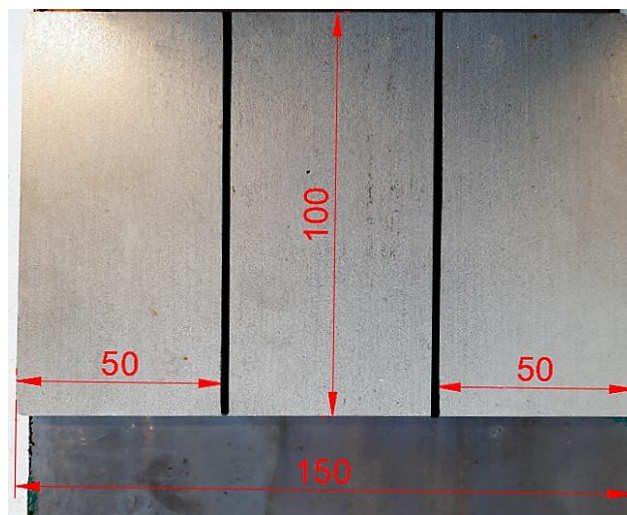
Materijal korišten za ispitivanje kvalitete plazma rezanja u ovom eksperimentu bio je austenitni nehrđajući čelik X5CrNi18-10 (EN 1.4301) ili AISI 304, debljine 5 mm. Nehrđajući čelik AISI 304 je legura na osnovi željeza koja sadrži 18% kroma, min. 8,5% nikla i manje količine ugljika, mangana, silicija, fosfora i sumpora. Kemijski sastav materijala naveden je u tablici 4. Čelik se primjenjuje u arhitekturi, automobilskoj industriji, proizvodnji kućanskih aparata i ukrasa, kemijskoj, prehrambenoj industriji i dr.

Tablica 4. Kemijski sastav materijala

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,045	≤ 0,03	17,0 – 19,0	8,5 – 11,0

### 5.2. Priprema ispitnih uzoraka

Priprema ispitnih uzoraka dimenzija 150 mm × 100 mm, izvršena je rezanjem na laseru. Uzorci su zatim označeni brojevima i na njima su nacrtane linije na jednakom razmaku od 50 mm. Označene linije na uzorcima, kasnije su služile za pozicioniranje sapnice plazma pištolja, odnosno za pravac rezanja plazma pištolja koji je bio vođen uređajem za linearno kretanje.



Slika 5.2.1. Ispitni uzorak

### 5.3. Oprema za provođenje eksperimenta

Označeni ispitni uzorci najprije su izrezani dostupnom opremom za poluautomatsko plazma rezanje sa zrakom s promjenjivim parametrima, brzina rezanja  $v$ , [cm/min] i jačina struje  $I$ , [A] koji se nalaze u tablici 5., a kasnije je na svakom uzorku, uređajem za mjerenje hrapavosti izmjerena hrapavost površine reza i provedena računalna analiza površine reza u programu ImageJ.

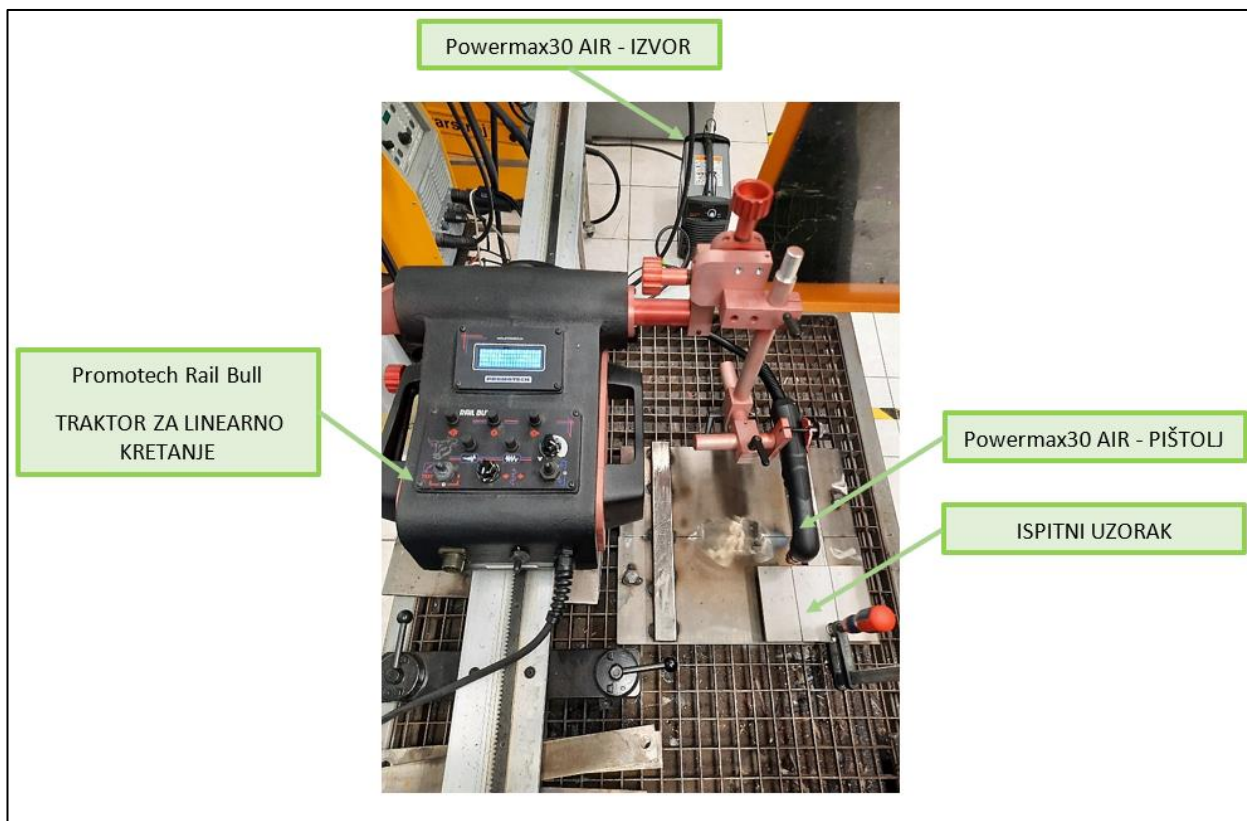
Tablica 5. Parametri kod provođenja eksperimenta

AISI 304 - LIM 5mm	PLAZMENI PLIN	SAPNICA	BRZINA REZANJA $v$ , [cm/min]	UDALIENOST SAPNICE OD RADNOG KOMADA [mm]	STRUJA REZANJA $I$ , [A]
UZORAK 1	KOMPRIMIRANI ZRAK Radni tlak 5.5 bar	30A	40	1 mm	30
UZORAK 2			60		30
UZORAK 3			70		30
UZORAK 4			80		30
UZORAK 5			50		30
UZORAK 6			50		25
UZORAK 7			60		25
UZORAK 8			70		25
UZORAK 9			40		25

#### 5.3.1. Oprema za konvencionalno plazma rezanja

Rezanje uzoraka ostvareno je Hypertherm Powermax30 AIR ručnim plazma rezačem na zrak koji u sebi ima ugrađeni zračni kompresor. Pištolj za rezanje ručnog plazma rezača bio je pričvršćen na linearni uređaj tzv. traktor *Promotech Rail Bull* koji je služio za ravno kretanje (rezanje) plazma pištolja po površini ispitnog uzorka. Ravno kretanje plazma pištolja montiranog

na traktor bilo je ostvareno sa zupčastom letvom i tračnicama koje su bile pričvršćene na zavarivački stol pomoću magnetskih jedinica. Tijekom rezanja uzoraka, pištolj je bio podešen na način da je duž cijelog reza konstantno održavan razmak (od 1 mm) između pištolja i ispitnog uzorka.



*Slika 5.3.1. Poluautomatsko plazma rezanje uzoraka*

#### *Karakteristike plazma uređaja - Hypertherm Powermax 30*

Hypertherm Powermax 30 AIR je malen, vrlo učinkovit, funkcionalan i prenosiv plazma uređaj koji nudi sposobnost rezanja limova debljine do 16 mm za niskougljični čelik, debljine do 13 mm za nehrđajući čelik i aluminij. Maksimalna jakost struje uređaja iznosi 30 A. Vrlo je prilagodljiv jer može raditi na 120 V i na 240 V. Ponuđeni napon omogućuje da bude prikladan za bilo koju vrstu rada u različitim okruženjima i situacijama. Također, dolazi opremljen tehnologijom automatskog napona koja omogućuje stroju da automatski prilagodi napon ulaznoj snazi kada je za to potrebno. Plazma uređaj u sebi ima integriran kompresor zraka koji pročišćava i uklanja vlagu iz zraka te prilagođava tlak zraka plazmenog mlaza prilikom uspostave, za vrijeme i na kraju procesa plazma rezanja. Potrošni dijelovi ovog uređaja nalaze se u plazma pištolju, a to su: deflektor, zaštitna kapa, sapnica, vrtložni prsten i elektroda.

Tablica 6. Karakteristike HYPERTHERM Powermax30 AIR

HYPERTHERM Powermax30 AIR	
ULAZNI NAPON	120 – 240 V, 50/60 Hz
ULAZNA STRUJA 2,5 kW	120 – 240 V, 29 – 15 A
IZLAZNA STRUJA	15 – 30 A
NAZIVNI IZLAZNI NAPON	83 VDC
RADNI CIKLUS 40°C	35%, 240 V
	20%, 120 V
NAPON OTVORENOG KRUGA	256 VDC
VRSTA NAPAJANJA INVERTER	IGBT
ZAHTEJEV ZA POGON MOTORA	5,5 kW za puni izlaz od 30 A
DIMENZIJE	(D) 420 mm × (Š) 195 mm × (V) 333mm
TEŽINA	13,5 kg
RADNI TLAK	Zrak 5,5 bar
SAPNICA	30 A



Slika 5.3.2. Hypertherm Powermax 30 AIR – ručna plazma

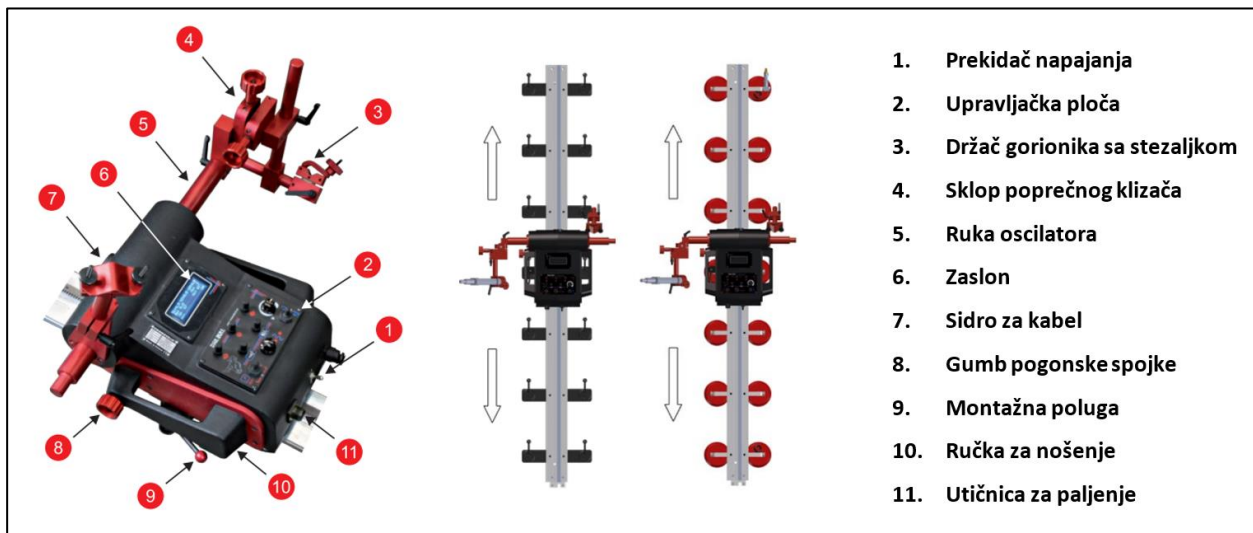
### Karakteristike uređaja za linearno kretanje - Promotech Rail Bull

Za linearno kretanje plazma pištolja korišten je uređaj Promotech Rail Bull traktor koji može biti namijenjen za rezanje ili zavarivanje. Može raditi u horizontalnom ili vertikalnom položaju odnosno u položajima zavarivanja PA, PB, PC, PD, PE, PF i PG. Rail Bull se kreće ravno duž krute ili polufleksibilne tračnice zahvaljujući pogonu sa zupčastom letvom i tračnicama pričvršćenim na ravne ili zakrivljene površine pomoću različitih magnetskih ili vakuumskih

jedinica. Minimalni radijus zakrivljenosti potreban za polusavitljivu stazu kako bi uređaj mogao raditi u normalnom režimu iznosi 5 m.

Tablica 7. Karakteristike PROMOTECH Rail Bull uređaja

PROMOTECH Rail Bull	
NAPON	115 – 230 V, 50/60 Hz
SNAGA	100 W
POLOŽAJ (ZAVARIVANJE)	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
PROMJER PIŠTOLJA	16 – 22 mm
HORIZONTALNA VUČNA SILA	350 N
VERTIKALNA VUČNA SILA	150 N
RASPON PODEŠAVANJA POPREČNOG PREKIDAČA	0 – 35 mm (gore/dolje, lijevo/desno)
HORIZONTALNA BRZINA (max)	120 cm/min
VERTIKALNA BRZINA (max)	110 cm/min
HOD ZUPČASTE LETVE	0 – 190 mm
TEŽINA	20 kg



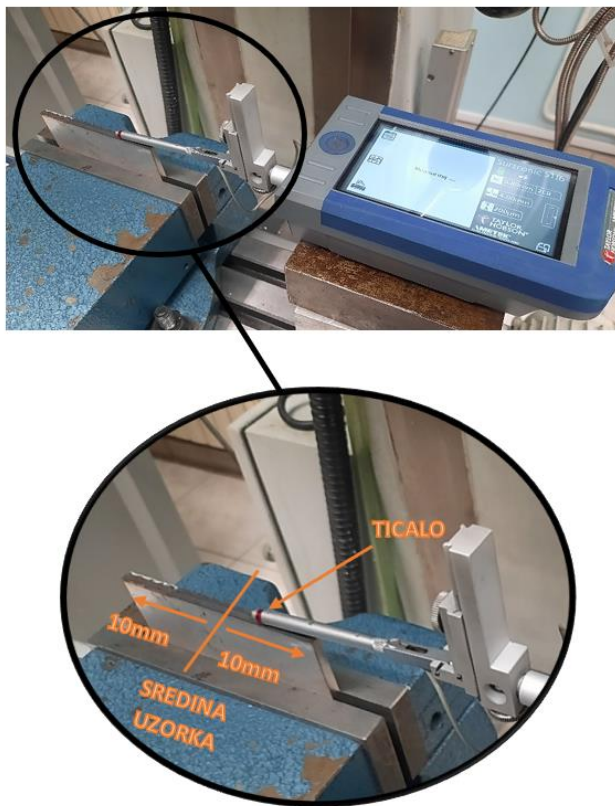
Slika 5.3.3. PROMOTECH Rail Bull uređaj

### 5.3.2. Oprema za mjerenje hrapavosti rezne površine

Za mjerenje hrapavosti površine bio je korišten prijenosni ručni uređaj AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116. Prije same provedbe mjerenja hrapavosti reza bilo je bitno obratiti pozornost da mjesto mjerenja bude slobodno od vibracija i da mjerni uređaj bude stabilan tijekom mjerenja. Tijekom mjerenja ticalo uređaja bilo je pozicionirano u sredini rezne površine. Mjerenje hrapavosti izvršeno je na svim ispitnim uzorcima u tri pozicije, najprije u sredini samog uzorka, a kasnije 10 mm lijevo i desno od sredine kao što je prikazano na slici 5.3.4. Nakon mjerenja, čim



je ticalo završilo svoj povratak na početnu poziciju, pogonska jedinica je uklonjena s mjerne površine te su zatim očitane vrijednosti na zaslonu uređaja. Mjerno područje korišteno u ovom eksperimentu iznosilo je 8 mm, a skala 200  $\mu\text{m}$ . Navedene postavke zadane su iskustveno prema dobivenoj hrapavosti reza.



Slika 5.3.4. Postupak mjerenja hrapavosti reznih površina dobivenih uzoraka

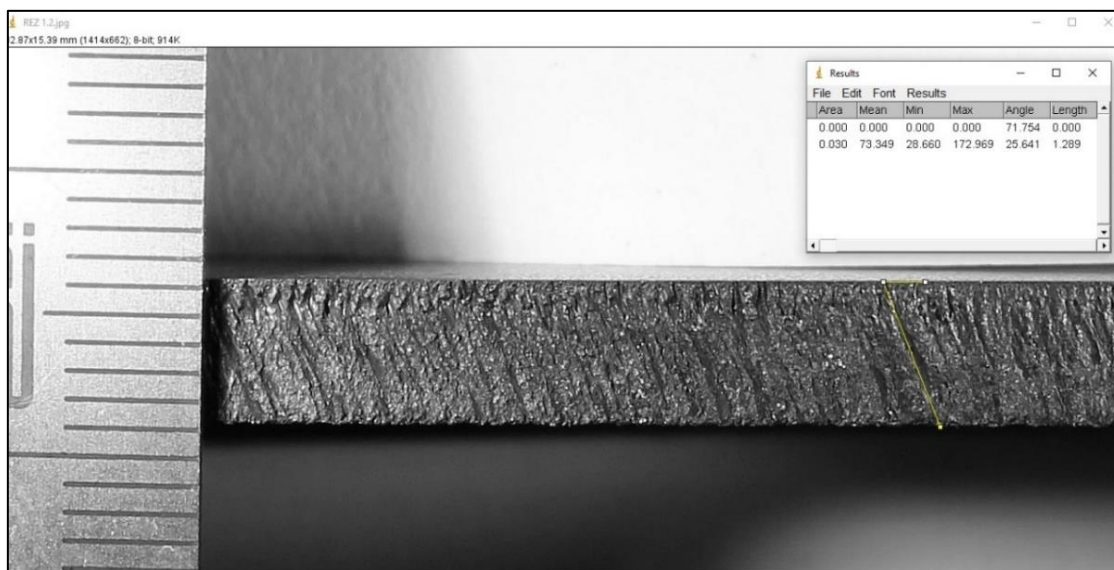


- 1 – TICALO
- 2 – GUMB ZA POČETAK MJERENJA
- 3 – REZULTATI MJERENJA
- 4 – PROTUKLIZNE NOGE
- 5 / 6 – KUČIŠTE UREĐAJA
- 7 – POSTAVKE (MJERNO PODRUČJE I SKALA)
- 8 – POSTAVKE ORIJENTACIJE
- 9 – UTOR ZA PUNJAČ
- 10 – UTOR ZA USB

Slika 5.3.5. AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116

## 5.4. Analiza rezne površine

Računalnom metodom provedena je analiza reznih površina. Uzorci su najprije poslikani fotoaparatom visoke rezolucije s milimetarskom skalom koja se nalazila na površini reza svakog uzorka, zatim su slike prebačene na osobno računalo i otvorene su u programu ImageJ. U programu su slike prebačene u 8 – bitnu crnu – bijelu formu te uz neke dodatne postavke na slikama (omjer veličine piksel/mm), provedena je analiza izmjere kuta i razmaka između najizraženijih brazdi nastalih prilikom plazma rezanja.



Slika 5.4.1. ImageJ - provođenje računalne analize slike

## 5.5. Rezultati eksperimenta

Prije samog provođenja eksperimenta, moglo se zaključiti da će izrezani uzorci imati oksidiranu obojenu površinu na gornjoj plohi reza zato što je za plazmeni plin korišten komprimirani zrak. Razlog pojave oksidirane obojene površine je taj da nije postojala specifična zaštitna atmosfera oko plazmenog plina pri rezanju visokolegiranog čelika. Za vrijeme eksperimenta, odnosno prije samog provođenja mjerenja hrapavosti, vizualnom metodom se moglo naslutiti da će površine reza nekih od uzoraka imati visoku hrapavost jer su izrezani uzorci imali na dodir grubu površinu s izraženim brazdama. Također, nakon plazma rezanja neki uzorci su imali izraženiju zakošenu reznju površinu, nalijepljenu talinu i šljaku na površini reza i donjem rubu reza. U području reza, zona utjecaja topline svih izrezanih uzoraka bila je uska.

Važno je naglasiti da prilikom rezanja nisu dobivene jednolike rezne površine svih uzoraka zbog utjecaja brzine rezanje i jakosti struje, te je mjerenje hrapavosti na mjestima pojedinih uzoraka bilo ograničeno. Mjerenje hrapavosti nekih uzoraka izvršeno je u više ponavljanja

(pomoćna mjerenja) zbog pojave naljepljivanja taline i pojave šljake pa su obzir uzeti najbliži rezultati.

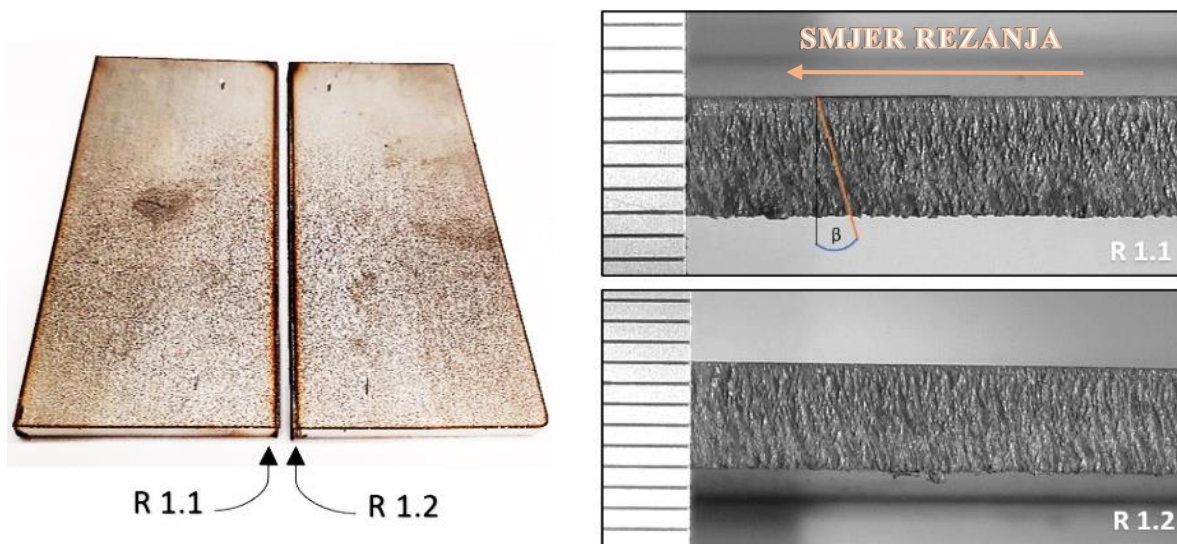
U nastavku će biti prikazane slike površina reza svih izrezanih uzoraka u smjeru napredovanja plazma rezanja za *jakost struje od 30 A, brzine rezanja 40 – 80 cm/min* i za *jakost struje od 25 A, brzine rezanja 40 – 70 cm/min*.

Tablicom su prikazani dobiveni rezultati mjerenja svih uzoraka. Prikazana je izmjerena hrapavost površine reza, parametar  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ], dobiveni kut nagiba brazdi rezne površine i iznos razmaka između najizraženijih brazdi na reznim površinama. Rezultatima mjerenja, izračunata je srednja vrijednost parametra  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] i kuta nagiba  $\beta$  [ $^\circ$ ].

### Plazma rezanje – jakost struje 30 A, brzina rezanja 40 – 80 cm/min

Tablica 8. UZORAK 1

UZORAK 1						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRAPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 1.1	REZ 1.2	KUT BRAZDI $\beta$ [ $^\circ$ ]	REZ 1.1	REZ 1.2
40	1.	12,30	12,50	1.	16,66°	16,51°
STRUJA REZANJA [A]	2.	13,50	14,40	2.	16,15°	16,54°
	3.	14,10	10,90	3.	16,55°	16,62°
30	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	13,30	12,60	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	16,45°	16,44°
Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 0,92 mm.						

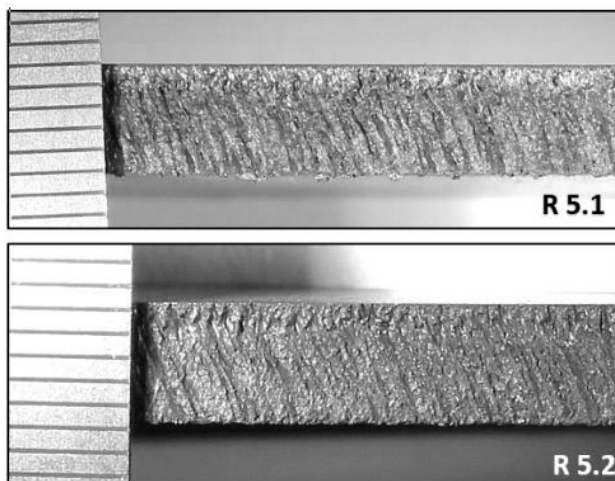
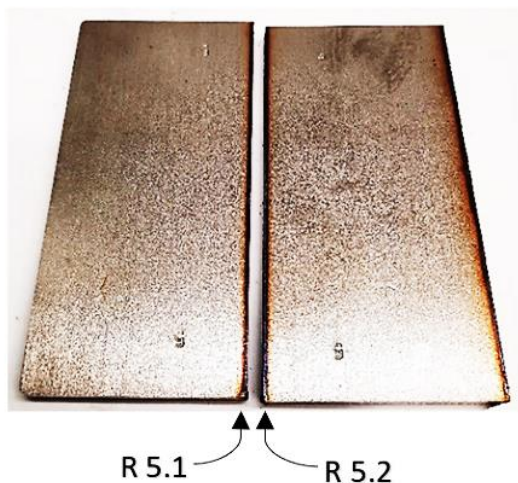


Slika 5.5.1. UZORAK 1

Tablica 9. UZORAK 5

UZORAK 5						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 5.1	REZ 5.2	KUT BRAZDI $\beta$ [ $^\circ$ ]	REZ 5.1	REZ 5.2
50	1.	13,50	13,30	1.	23,96 $^\circ$	23,71 $^\circ$
STRUJA REZANJA [A]	2.	12,90	13,20	2.	23,15 $^\circ$	23,48 $^\circ$
	3.	12,10	12,0	3.	23,35 $^\circ$	23,16 $^\circ$
30	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	12,83	12,83	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	23,49 $^\circ$	23,45 $^\circ$

Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 1,08 mm.

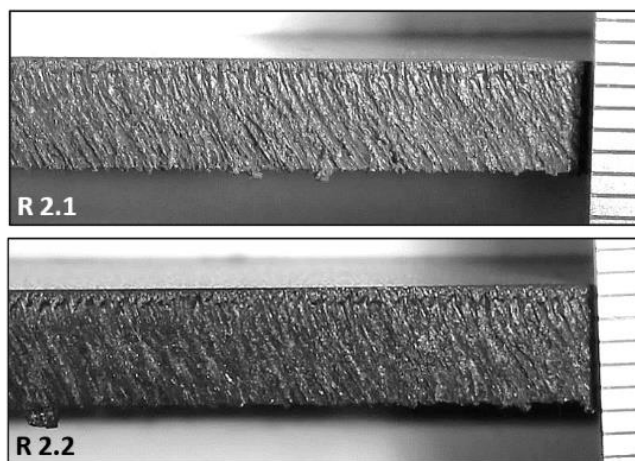
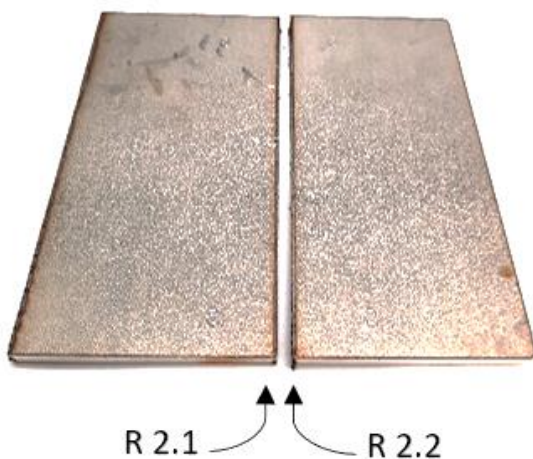


Slika 5.5.2. UZORAK 5

Tablica 10. UZORAK 2

UZORAK 2						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 2.1	REZ 2.2	KUT BRAZDI $\beta$ [ $^\circ$ ]	REZ 2.1	REZ 2.2
60	1.	11,80	11,90	1.	29,89 $^\circ$	28,20 $^\circ$
STRUJA REZANJA [A]	2.	12,50	13,20	2.	29,70 $^\circ$	28,98 $^\circ$
	3.	13,40	14,10	3.	29,90 $^\circ$	28,90 $^\circ$
30	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	12,57	13,07	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	29,83 $^\circ$	28,69 $^\circ$

Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 1,18 mm.

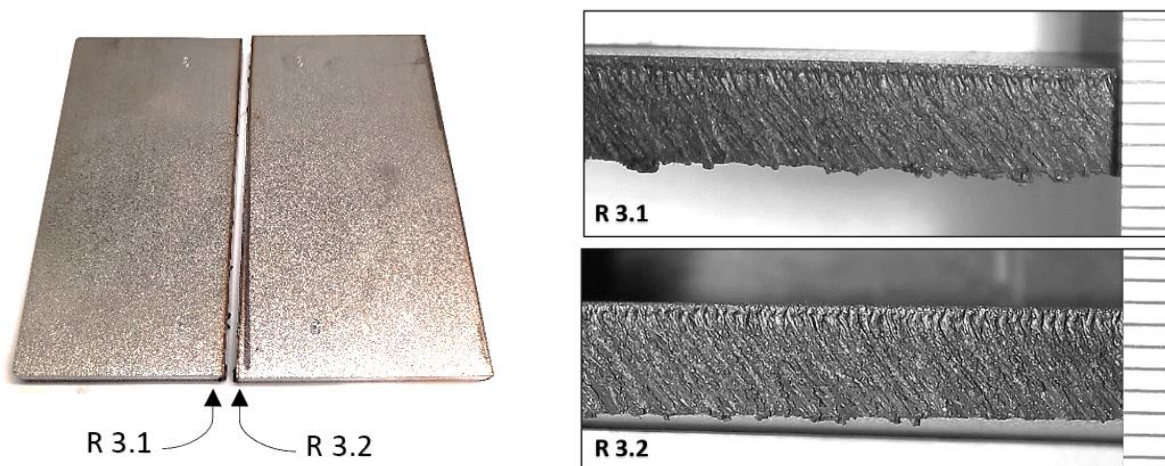


Slika 5.5.3. UZORAK 2

Tablica 11. UZORAK 3

UZORAK 3						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 3.1	REZ 3.2	KUT BRAZDI $\beta$ [°]	REZ 3.1	REZ 3.2
70	1.	13,10	13,60	1.	35,78°	36,65°
STRUJA REZANJA [A]	2.	14,30	13,90	2.	37,39°	35,19°
	3.	15,10	12,90	3.	36,61°	33,76°
30	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	14,17	13,47	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	36,59°	35,20°

Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 1,54 mm.

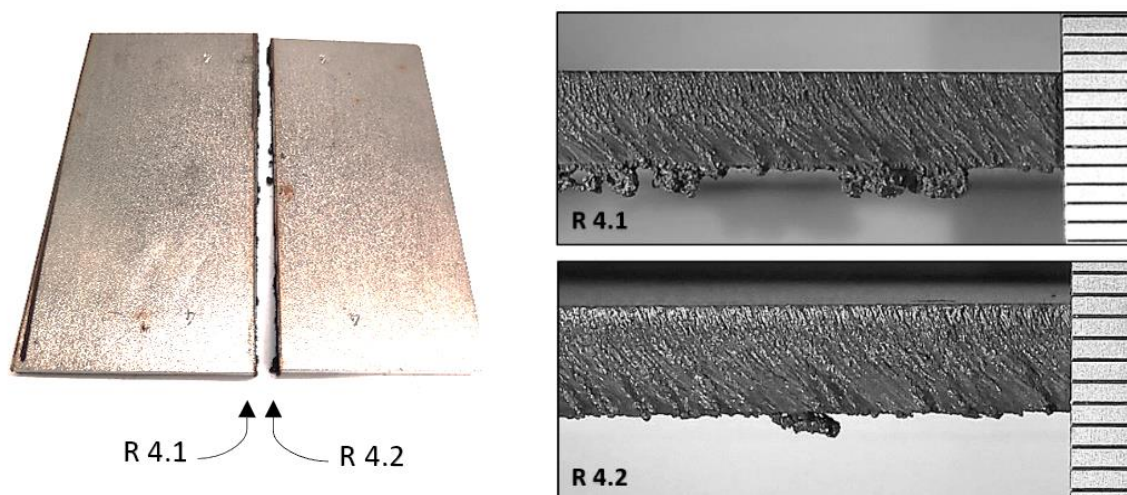


Slika 5.5.4. UZORAK 3

Tablica 12. UZORAK 4

UZORAK 4						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 4.1	REZ 4.2	KUT BRAZDI $\beta$ [°]	REZ 4.1	REZ 4.2
80	1.	16,20	15,7	1.	40,46°	40,46°
STRUJA REZANJA [A]	2.	14,50	12,8	2.	40,11°	38,81°
	3.	15,40	13,3	3.	40,78°	41,18°
30	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	15,37	13,93	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	40,12°	40,15°

Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 2,67 mm.



Slika 5.5.5. UZORAK 4

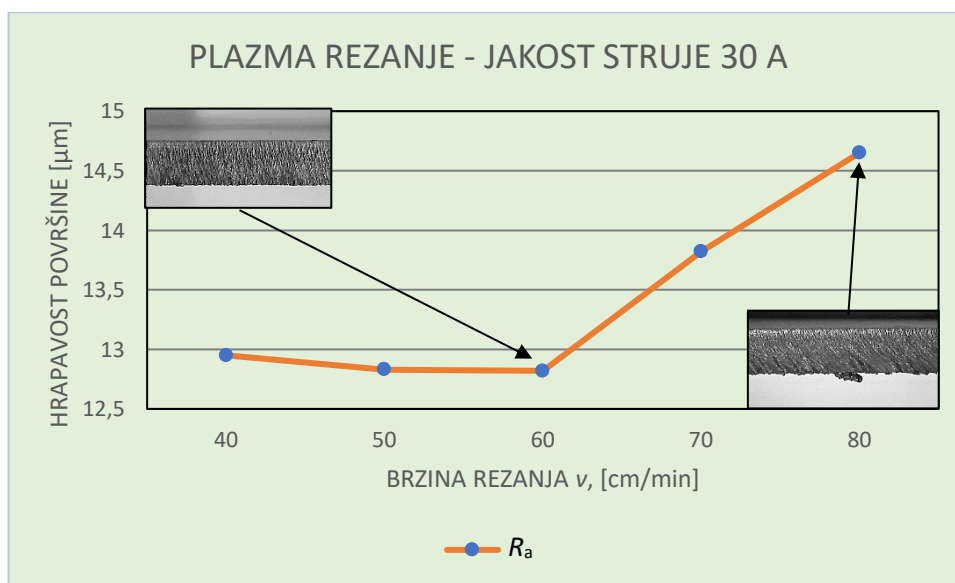
U nastavku se nalazi tablica u kojoj su izračunate srednje vrijednosti promatranih veličina svih uzoraka (od 1.1 do 5.2) koji su rezani s jakošću struje od 30 A.

Tablica 13. Vrijednosti promatranih veličina uzoraka od 1.1 do 5.2

AISI 304 – LIM 5mm	BRZINA REZANJA $v$ , [cm/min]	$\bar{x}$ $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$ KUT BRAZDI	RAZMAK BRAZDI [mm]
UZORAK 1 (1.1 + 1.2)	40	12,95	16,45°	0,92
UZORAK 5 (5.1 + 5.2)	50	12,83	23,47°	1,08
UZORAK 2 (2.1 + 2.2)	60	12,82	29,26°	1,18
UZORAK 3 (3.1 + 3.2)	70	13,82	35,90°	1,54
UZORAK 4 (4.1 + 4.2)	80	14,65	40,14°	2,67

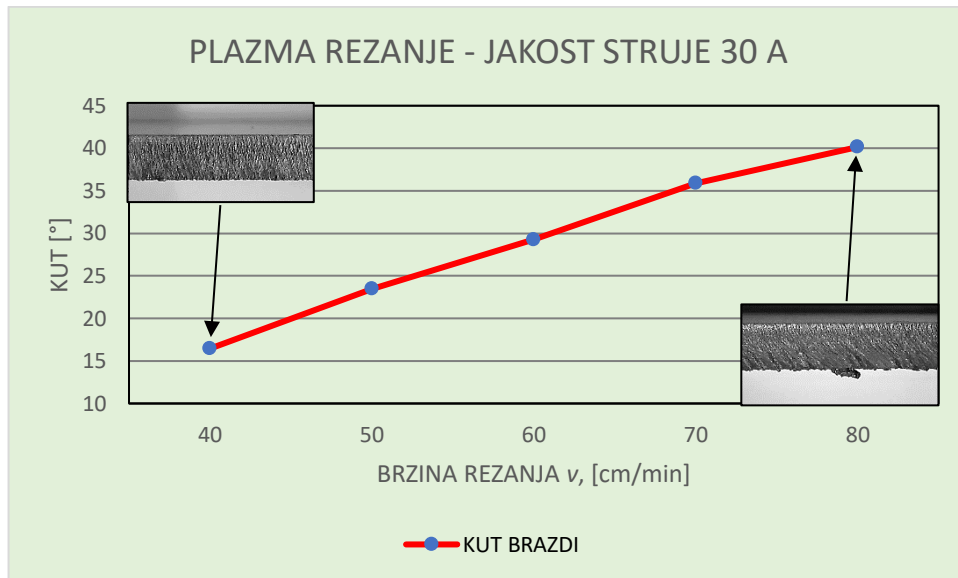
Plazma rezanje zrakom nehrđajućeg čelika pri jakosti struje od 30 A pokazuje da brzina rezanja ima veliki utjecaj na kvalitetu hrapavosti reza. Najbolje rezultate pri rezanju nehrđajućeg čelika AISI 304, debljine 5 mm, dostupnom laboratorijskom opremom pri jakosti struje od 30 A možemo postići u području brzina rezanja između 40 i 60 cm/min. Nadalje, svako povećanje brzine rezanja znatno utječe na porast hrapavosti što je vidljivo iz dijagrama na slici 5.5.6.

Uzorcima je na temelju dobivenih rezultata, dodijeljen stupanj hrapavosti N10 i razred hrapavosti 11 prema normi HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302.



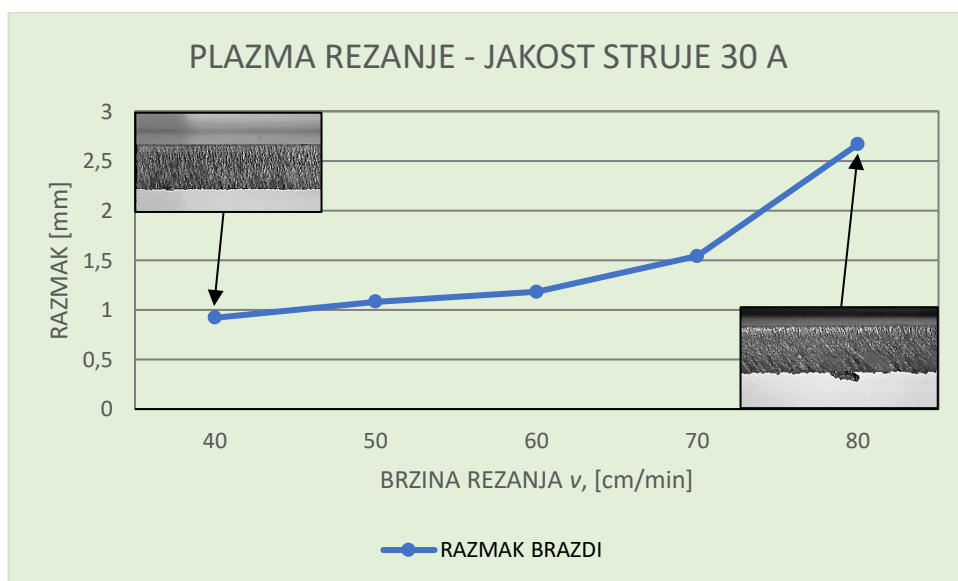
Slika 5.5.6. Dijagram brzine rezanja i hrapavosti površine za jakost struje rezanja od 30 A

Kut nagiba brazdi raste s porastom brzine rezanja. Tijekom eksperimenta, prilikom plazma rezanja pri većim brzinama, plazma luk nije bio u potpunosti okomit na uzorak i njegovo zaostajanje je prouzrokovalo veliki nagib reza. Vidljivo je da pri većim brzinama rezanja dolazi do pojave stepeničastih brazdi i pojave povećane količine šljake koja se nakuplja ispod površine uzorka.



Slika 5.5.7. Dijagram brzine rezanja i kuta brazdi za jakost struje rezanja od 30 A

Za jakost struje od 30 A, veći razmak brazdi se sve više pojavljuje što je veća brzina rezanja, Uzrok tome je zaostajanje luka i premala jakost struje.



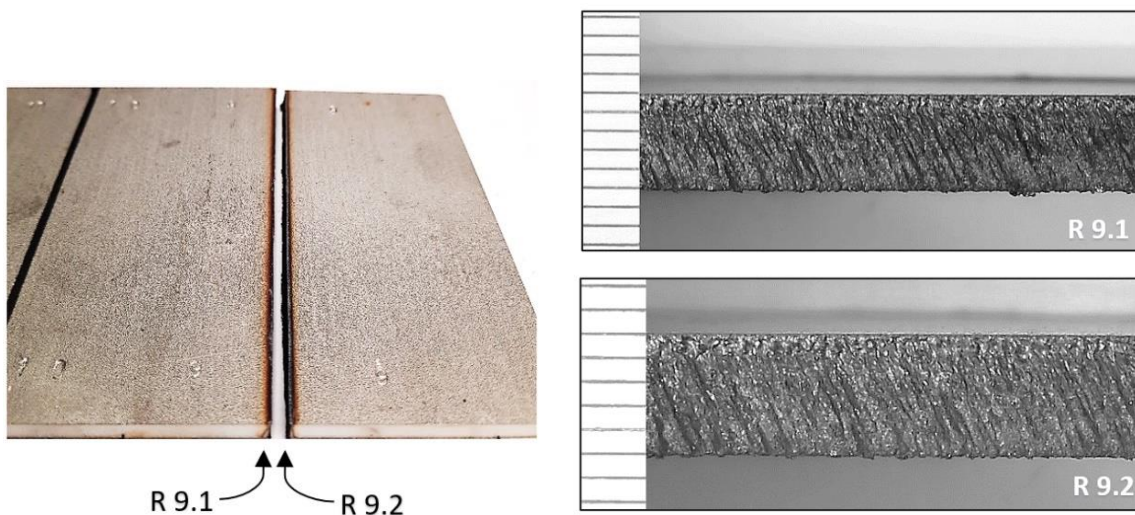
Slika 5.5.8. Dijagram brzine rezanja i razmaka brazdi za jakost struje rezanja od 30 A

**Plazma rezanje – jakost struje 25 A, brzina rezanja 40 – 70 cm/min**

Tablica 14. UZORAK 9

UZORAK 9						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRAPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 9.1	REZ 9.2	KUT BRAZDI $\beta$ [°]	REZ 9.1	REZ 9.2
40	1.	12,20	14,20	1.	28,45°	24,85°
STRUJA REZANJA [A]	2.	13,80	12,80	2.	27,33°	25,64°
	3.	13,10	12,50	3.	29,12°	25,22°
25	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	13,03	13,17	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	28,30°	25,24°

*Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 1,05 mm.*

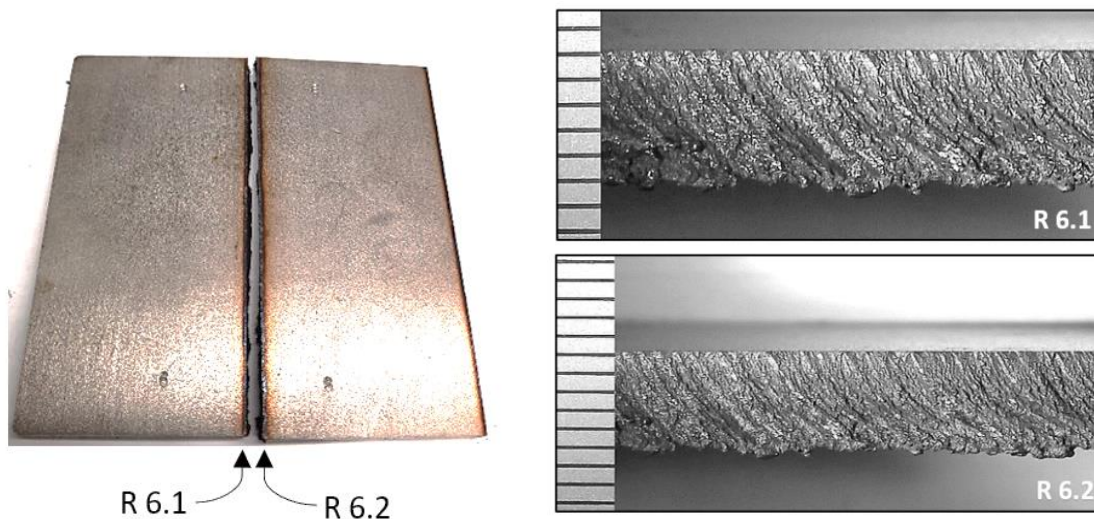


Slika 5.5.9. UZORAK 9

Tablica 15. UZORAK 6

UZORAK 6						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRAPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 6.1	REZ 6.2	KUT BRAZDI $\beta$ [°]	REZ 6.1	REZ 6.2
50	1.	13,00	14,90	1.	42,38°	41,85°
STRUJA REZANJA [A]	2.	15,90	13,40	2.	41,86°	41,64°
	3.	15,40	10,90	3.	42,39°	42,22°
25	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	14,77	13,07	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	42,21°	41,90°

*Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 2,87 mm.*



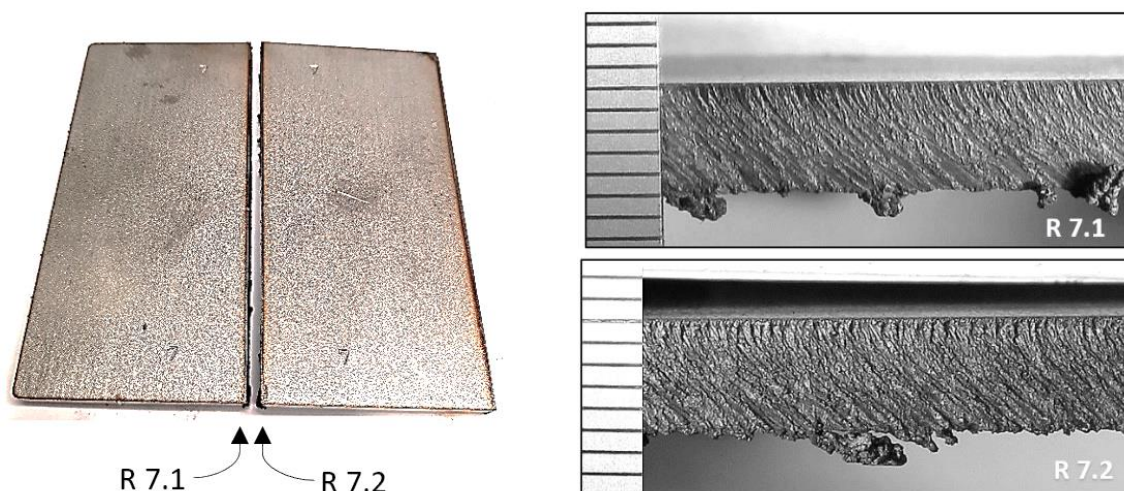
Slika 5.5.10. UZORAK 6



Tablica 16. UZORAK 7

UZORAK 7						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 7.1	REZ 7.2	KUT BRAZDI $\beta$ [ $^\circ$ ]	REZ 7.1	REZ 7.2
60	1.	16,70	15,40	1.	43,27°	44,57°
STRUJA REZANJA [A]	2.	16,50	16,20	2.	43,13°	45,81°
	3.	15,90	15,90	3.	43,45°	44,72°
25	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	16,37	15,83	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	43,28°	45,03°

Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je 3,12 mm.

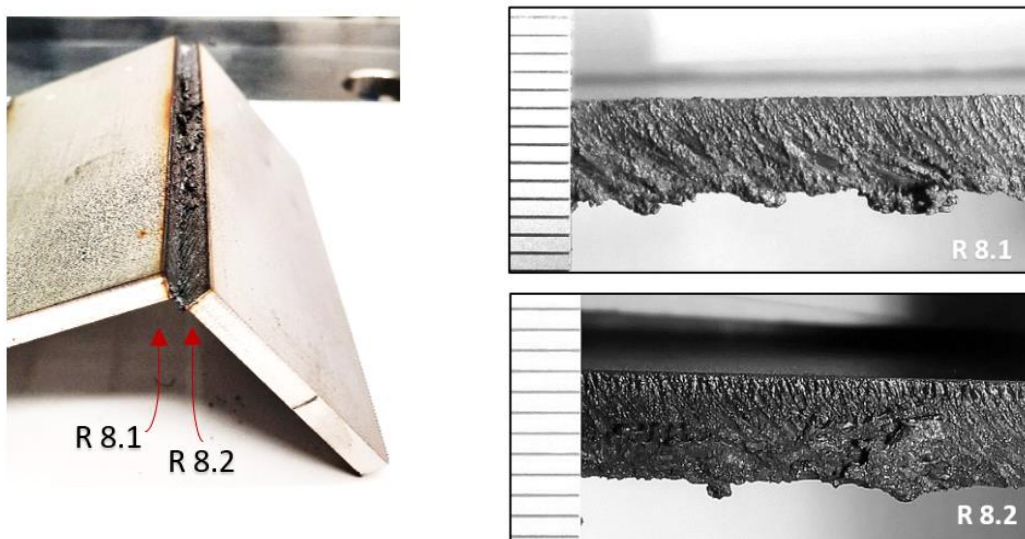


Slika 5.5.11. UZORAK 7

Tablica 17. UZORAK 8

UZORAK 8						
BRZINA REZANJA [cm/min]	MJERENJE HRPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	REZ 8.1	REZ 8.2	KUT BRAZDI $\beta$ [ $^\circ$ ]	REZ 8.1	REZ 8.2
70	1.	16,50	18,50	1.	53,33°	62,79°
STRUJA REZANJA [A]	2.	19,40	19,20	2.	56,93°	61,72°
	3.	19,50	17,30	3.	56,11°	59,43°
25	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	18,47	18,33	SREDNJA VRIJEDNOST $\bar{x}$	55,46°	61,31°

Najveći razmak između dvije najizraženije brazde na jednom od uzroka iznosio je > 4,21 mm.



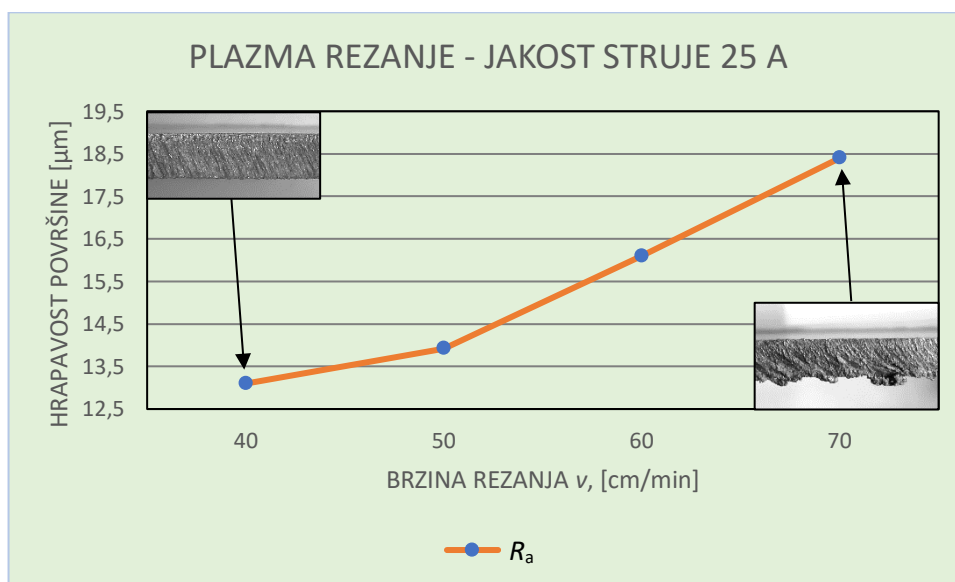
Slika 5.5.12. UZORAK 8

U nastavku se nalazi tablica u kojoj su izračunate srednje vrijednosti promatranih veličina svih uzoraka (od 6.1 do 9.2) koji su rezani s jakošću struje od 25 A.

Tablica 18. Vrijednosti promatranih veličina uzoraka od 6.1 do 9.2

AISI 304 – LIM 5mm	BRZINA REZANJA $v$ , [cm/min]	$\bar{x}$ $R_a$ [ $\mu$ m]	$\bar{x}$ KUT BRAZDI	RAZMAK BRAZDI [mm]
UZORAK 9 (9.1 + 9.2)	40	13,1	26,77°	1,05
UZORAK 6 (6.1 + 6.2)	50	13,92	42,1°	2,87
UZORAK 7 (7.1 + 7.2)	60	16,1	44,16°	3,12
UZORAK 8 (8.1 + 8.2)	70	18,4	58,39°	> 4,21

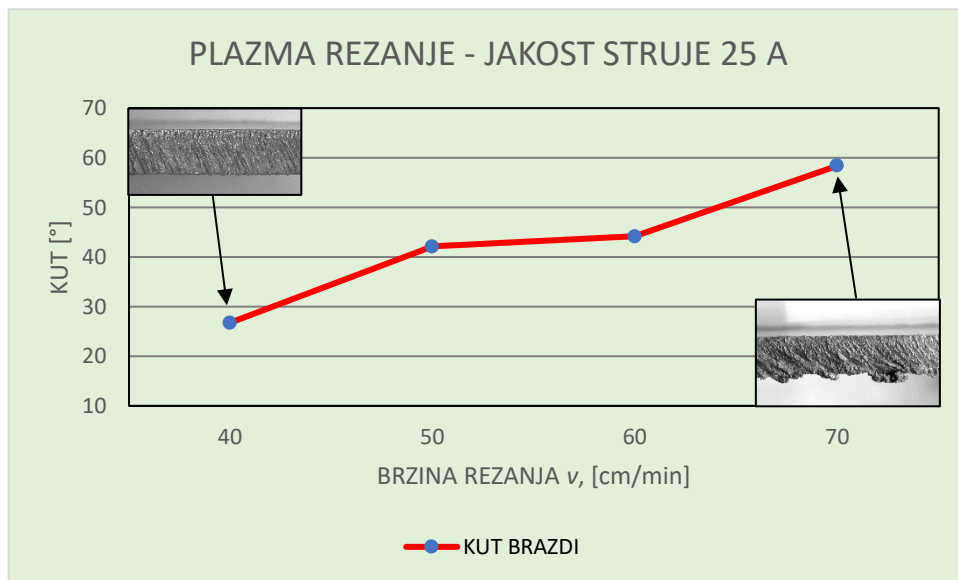
Najbolje rezultate pri rezanju nehrđajućeg čelika AISI 304, debljine 5 mm dostupnom laboratorijskom opremom, pri jakosti struje od 25 A možemo postići u području brzina rezanja između 40 i 50 cm/min. U odnosu na jakost struje od 30 A, manjom strujom rezanja kao u ovom slučaju dobivamo lošije rezultate kvalitete hrapavosti reza za iste ispitne brzine rezanja. Lošija hrapavost kvalitete reza uzrokovano je premalom jakosti struje koja je utjecala na nefokusirani plazmeni luk i na pojavu prljavog reza što se može uočiti na slici 5.5.12., "Uzorak 8" nije u potpunosti izrezan, njegova hrapavost je izmjerena na početku reza gdje nije došlo do naljepljivanja. Svako daljnje povećanje brzine rezanja (> 70 cm/min) znatno bi utjecalo na porast hrapavosti što možemo uočiti iz dijagrama na slici 5.5.13.



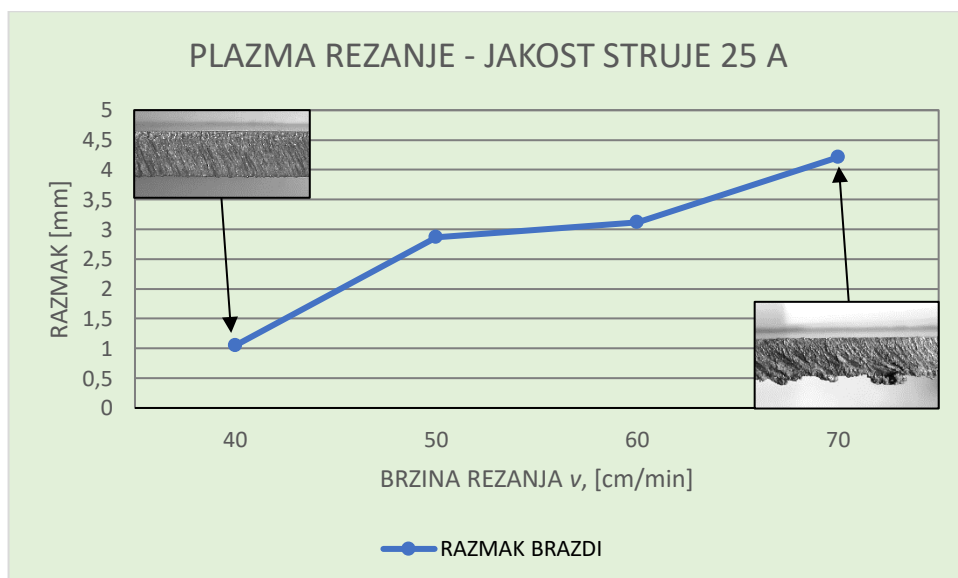
Slika 5.5.13. Dijagram brzine rezanja i hrapavosti površine za jakost struje rezanja od 25 A

Uzorcima je na temelju dobivenih rezultata, dodijeljen stupanj hrapavosti N10 i razred hrapavosti 11 prema normi HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302.

Povećanjem brzine rezanja, za jakost struje od 25 A, dolazi do povećane pojave šljake na donjem rubu i na donjoj površini reza. Također, na površini reza uzoraka pri brzinama većim od 60 cm/min dolazi do suprotnog usmjerenja brazdi od smjera plazma rezanja, nepotpunog reza i naljepljivanja taline. Iz dijagrama na slici 5.5.14. i 5.5.15. vidljivo je kako daljnjim povećanjem brzine rezanja raste nagib i razmak između brazdi.



Slika 5.5.14. Dijagram brzine rezanja i kuta brazdi za jakost struje rezanja od 25 A



Slika 5.5.15. Dijagram brzine rezanja i razmaka brazdi za jakost struje rezanja od 25 A

## 6. ZAKLJUČAK

Rezanje plazmom je toplinski proces u kojem energija plazme tali radni komad, a nastalu talinu izbacuje mlaz plinova koji se koristi za stvaranje plazme. Ulazni parametri kod plazma rezanju su parametri koji se mogu kontrolirati i njihove vrijednosti podešava operater. Prilikom plazma rezanja operater na temelju preporuka datih od strane proizvođača opreme određuje jačinu električne struje i brzinu rezanja koja mu je potrebna za vršenje plazma rezanja. Međutim, te preporuke ponekad sadrže marketinške i reklamne poruke koje uključuju samo prodaju, ali ne moraju biti najbolja i ekonomski isplativa rješenja za postizanje optimalne kvalitete. Izlazni parametri plazma rezanja se odnose na kvalitetu dobivenih površina kao što je hrapavost, a faktori koji se ne mogu kontrolirati tijekom rezanja proizlaze iz radnog okruženja. Eksperimentalno ispitivanje i dobiveni rezultati plazma rezanja se poklapaju s teoretskim razmatranjima utjecajnih parametara koji su opisani u radu.

Dostupnom laboratorijskom opremom za plazma rezanje nehrđajućeg čelika zrakom, jakost struje od 30 A pokazala se najboljom za optimizaciju kvalitete reza. Najbolji rezultati postignuti su u području brzina rezanja između 40 i 60 cm/min. Parametar jakosti struje i brzine rezanja u tom području rezultirao je ravnijim (manjim kutem nagiba brazdi) i kvalitetnijim rezom (manjim razmakom između brazdi) što je vidljivo iz prikazanih slika i utjecaja promatranih veličina u dijagramima. Također, u tom području je smanjena pojava količine šljake i nema naljepljivanja taline. U slučaju korištenja jakosti struje od 25 A, može se zaključiti da niže vrijednosti jačine struje zahtijevaju manje brzine rezanja između 40 i 50 cm/min, kako bi se proizvelo dovoljno topline u zoni rezanja, ali dobivena kvaliteta rezne površine je znatno lošija od korištenja jakosti struje od 30 A. Korištenjem struje manje jačine i znatno veće brzine rezanja, od preporučenih vrijednosti, događa se da radni komad nije u potpunosti izrezan, tj. ne dolazi do potpunog probijanja prilikom rezanja. Uzorcima je na temelju dobivenih rezultata, dodijeljen stupanj hrapavosti N10 i razred hrapavosti 11 prema normi HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302, prema tome možemo zaključiti da su dobivene rezne površine uzoraka grube, ali njihova kvaliteta je zadovoljavajuća obzirom da je korištena jednostavna oprema i zrak kao plazmeni i zaštitni plin.

Pojava oksidirane površine bila je predvidiva jer nije korištena zaštitna atmosfera. Korištenje zraka kao plazmenog i zaštitnog plina pri rezanju, zahtjeva dodatno uklanjanje nastale oksidirane površine rezova, ali u konačnici ono nije jedini pokazatelj smanjenja kvalitete ili povišenja troškova (potrebe za dodatnim operacijama – brušenje). Prilikom plazma rezanja sa zrakom, za što bolju produktivnost u proizvodnji, poželjno je vršiti obradu pri što većoj brzini, ali pritom vodeći računa da ta brzina ne kompromitira konačnu kvalitetu odrezanog komada.

## 7. LITERATURA

- [1] BOC: Facts about Plasma Technology, A Member of The Linde Group, časopis
- [2] Internetski izvor Sott.net, autor: Pierre Lescaudron, link: <https://hr.sott.net/article/6877-Sto-je-plazma.>, dijelovi iz knjige: Zemaljske promjene i ljudsko kozmička veza, 2016.
- [3] Josip Mioč: Optimizacija parametara pri rezanju plazmom; Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [4] <https://www.slideshare.net/Hboskany/optimization-of-cutting-parameters-for-cnc-plasma-cutting-machine-alfhatech-maxpro-200>
- [5] Križanić Vid: Optimizacija parametara tehnološkog procesa za izradu pločastih metalnih proizvoda, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2021.
- [6] Božičević, Luka: Plazma rezanje, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci, Rijeka 2017.
- [7] <https://microstep.com/en/Expert-know-how/Plasma-cutting#Plasma%20technology>
- [8] [https://esab.com/dk/eur\\_en/esab-university/blogs/what-is-a-cnc-plasma-cutter/](https://esab.com/dk/eur_en/esab-university/blogs/what-is-a-cnc-plasma-cutter/)
- [9] <https://www.materialwelding.com/plasma-cutting/>
- [10] <https://espritautomation.com/plasma-cutting-consumables/>
- [11] T. Pfeifer: Modern systems of automatic plasma cutting, Zbornik radova, Eurojoin 4: Development of welding and allied process at the beginning of the new millenium, Cavtat – Dubrovnik, 24.-26.05., 2001.
- [12] <https://servus.hr/strucni-clanci/plazma-rezanje-nehrdajucih-celika-dio-1/>  
<https://servus.hr/strucni-clanci/plazma-rezanje-nehrdajucih-celika-dio-2/>
- [13] Biserka Runje, Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, katedra za mjerenje i kontrolu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.
- [14] Tomašević Toni, Utjecaj hrapavosti na procjenu otpornosti na klizanje lakiranih drvenih površina, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb 2018.
- [15] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/improved-plasma-cutting-of-stainless-steel>

- [16] Darko Herceg: Usporedba parametara hrapavosti i valovitosti obrađene plohe s teorijskom visinom kinematskih tragova obrade kod osnovnih procesa mehaničke obrade drva, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb 2020.
- [17] INTERNATIONAL STANDARD, ISO 9013:2017, Thermal cutting – Classification of thermal cuts – Geometrical product specification and quality tolerances,

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Područje primjene toplinskih procesa rezanja.....	1
Slika 2.1.1. Agregatna stanja tvari [2] .....	2
Slika 2.1.2. Prikaz čestica plina i plazme (ionizacija) [2] .....	2
Slika 2.2.1. Shematski prikaz strujnog kruga i gorionika plazma rezanja [3] .....	3
Slika 2.2.2. Shematski prikaz prenesenog luka i neprenesenog luka [5].....	4
Slika 2.3.1. Stabilizacija brzine vrtloga luka [4] .....	4
Slika 2.3.2. Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom [4] .....	5
Slika 2.3.3. Uspostavljanje pilot luka na radnom komadu [4].....	5
Slika 2.3.4. Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu [4] .....	6
Slika 2.4.1. Ručna plazma [7].....	6
Slika 2.4.2. CNC plazma s rotirajućim plazma gorionikom [6] .....	7
Slika 2.4.3. Plazma rezanje robotom [8].....	7
Slika 2.5.1. Padajuća karakteristika napona i struje plazma izvora [1] .....	8
Slika 2.5.2. Primjer izvora struje plazma rezanja za CNC rezanje (višepinski sustav) [9] .....	9
Slika 2.5.3. Dijagram početka i završetka plazma rezanja [3].....	9
Slika 2.5.4. Osnovni i potrošni dijelovi plazma pištolja ili gorionika [9] .....	10
Slika 2.5.5. Elektroda [9].....	11
Slika 2.5.6. Sapnica [9].....	11
Slika 2.5.7. Vrtložni prsten [9] .....	11
Slika 2.5.8. Kapica za pričvršćenje [9] .....	12
Slika 2.5.9. Zaštitna kapa [9].....	12
Slika 2.6.1. Konvencionalno rezanje plazmom bez sekundarnog [1].....	13
Slika 2.6.2. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom [1].....	14
Slika 2.6.3. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim medijem [1] .....	15

Slika 2.6.4. Plazma rezanje s injektiranom vodom [1] .....	16
Slika 2.6.5. Plazma rezanje pod zaštitom vode [3] .....	17
Slika 2.6.6. Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka [1] .....	17
Slika 2.7.1. Utjecaj temperature na toplinsku vodljivost plinova [1] .....	22
Slika 2.7.2. Regulacije visine pištolja u odnosu na radni komad [3] .....	23
Slika 2.7.3. Visina gorionika prilikom probijanja (lijevo) i rezanja (desno) [5] .....	24
Slika 2.7.4 Kvaliteta reza ovisi o stanju istrošenosti sapnice [11] .....	24
Slika 3.3.1. Različite kombinacije plazma i zaštitnog plina na nehrđajućem čeliku [15] .....	26
Slika 3.3.2. Plazma rezanja nehrđajućeg čelika [15] .....	26
Slika 3.3.3. Nakupljena šljaka na površini ploče [15] .....	27
Slika 4.1.1. 2D mjerenje površine hrapavosti [13] .....	28
Slika 4.1.2. Komponente profila površine hrapavosti [13] .....	28
Slika 4.2.1. Parametri hrapavosti površine $m$ , $R_p$ , $R_v$ , $R_z$ [13] .....	29
Slika 4.2.2. Srednje aritmetičko odstupanje profila $R_a$ [13] .....	30
Slika 4.3.1. Neposredna kontaktna metoda mjerenja hrapavosti [16] .....	30
Slika 4.4.1. Veličine i definicije u procesu rezanja na radnom komadu [17] .....	31
Slika 4.4.2. Veličine i definicije na izrezanom komadu [17] .....	31
Slika 4.4.3. Prosječna visina neravnina ( $R_{z5}$ ) [13] .....	32
Slika 4.4.4. Prosječna visina neravnina, $R_{z5}$ – debljine radnog komada do 30 mm .....	33
Slika 5.2.1. Ispitni uzorak .....	35
Slika 5.3.1. Poluautomatsko plazma rezanje uzoraka .....	36
Slika 5.3.2. Hypertherm Powermax 30 AIR – ručna plazma .....	37
Slika 5.3.3. PROMOTECH Rail Bull uređaj .....	38
Slika 5.3.4. Postupak mjerenja hrapavosti reznih površina dobivenih uzoraka .....	39
Slika 5.3.5. AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116 .....	39



Slika 5.4.1. ImageJ - provođenje računalne analize slike.....	40
Slika 5.5.1. UZORAK 1 .....	41
Slika 5.5.2. UZORAK 5 .....	42
Slika 5.5.3. UZORAK 2 .....	42
Slika 5.5.4. UZORAK 3 .....	43
Slika 5.5.5. UZORAK 4 .....	43
Slika 5.5.6. Dijagram brzine rezanja i hrapavosti površine za jakost struje rezanja od 30 A .....	44
Slika 5.5.7. Dijagram brzine rezanja i kuta brazdi za jakost struje rezanja od 30 A .....	45
Slika 5.5.8. Dijagram brzine rezanja i razmaka brazdi za jakost struje rezanja od 30 A .....	45
Slika 5.5.9. UZORAK 9 .....	46
Slika 5.5.10. UZORAK 6 .....	46
Slika 5.5.11. UZORAK 7 .....	47
Slika 5.5.12. UZORAK 8 .....	47
Slika 5.5.13. Dijagram brzine rezanja i hrapavosti površine za jakost struje rezanja od 25 A .....	48
Slika 5.5.14. Dijagram brzine rezanja i kuta brazdi za jakost struje rezanja od 25 A .....	49
Slika 5.5.15. Dijagram brzine rezanja i razmaka brazdi za jakost struje rezanja od 25 A .....	49

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Inertni i aktivni plinovi i njihove smjese kao plazmeni i zaštitni plinovi.....	22
Tablica 2. Raspon tolerancije hrapavosti.....	32
Tablica 3. Standard HRN M.A0.065 i DIN ISO 1302 .....	33
Tablica 4. Kemijski sastav materijala.....	34
Tablica 5. Parametri kod provođenja eksperimenta .....	35
Tablica 6. Karakteristike HYPERTHERM Powermax30 AIR.....	37
Tablica 7. Karakteristike PROMOTECH Rail Bull uređaja.....	38
Tablica 8. UZORAK 1.....	41
Tablica 9. UZORAK 5.....	42
Tablica 10. UZORAK 2.....	42
Tablica 11. UZORAK 3.....	43
Tablica 12. UZORAK 4.....	43
Tablica 13. Vrijednosti promatranih veličina uzoraka od 1.1 do 5.2 .....	44
Tablica 14. UZORAK 9.....	46
Tablica 15. UZORAK 6.....	46
Tablica 16. UZORAK 7.....	47
Tablica 17. UZORAK 8.....	47
Tablica 18. Vrijednosti promatranih veličina uzoraka od 6.1 do 9.2 .....	48

## Sveučilište Sjever

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, Matija Pintarić (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljen način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(*upisati ime i prezime*)

Matija Pintarić

(*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, Matija Pintarić (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 (*upisati naslov*) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(*upisati ime i prezime*)

Matija Pintarić

(*vlastoručni potpis*)