

# Utjecaj parametara obrade na hrapavost rezne površine pri plazma rezanju čelika 25CrMo4

---

Šavora, Leon

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:560940>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

*Završni rad br. 428/PS/2024*

**Utjecaj parametara obrade na hrapavost rezne površine pri  
plazma rezanju čelika 25CrMo4**

**Leon Šavora, 4196/336**

Varaždin, listopad 2023.





# Sveučilište Sjever

Odjel za proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 428/PS/2024

## Utjecaj parametara obrade na hrapavost rezne površine pri plazma rezanju čelika 25CrMo4

**Student**

Leon Šavora, 4196/336

**Mentor**

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

Varaždin, listopad 2023.



# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Leon Šavora

JMBAG 4196/336

DATUM 21.02.2024.

KOLEGIJ Tehnologija 3

NASLOV RADA Utjecaj parametara obrade na hrapavost rezne površine pri plazma rezanju čelika  
25CrMo4

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU The influence of cutting parameters on the surface roughness during plasma cutting of  
steel 25CrMo4

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

### ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc dr. sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva
- doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
- Marko Horvat, dipl. ing., član povjerenstva
- doc. dr.sc. Tomislav Veliki, zamjenski član
- 

## Zadatak završnog rada

BROJ 428/PS/2024

### OPIS

U teoretskom dijelu završnog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupak plazma rezanja metala. Usporediti različite izvedenice plazma postupka rezanja te također usporediti plazma rezanje u ručnoj i automatiziranoj izvedbi. Navesti sve utjecajne parametre u postupku te ocijeniti njihov utjecaj na kvalitetu rezne površine. Definirati plinove koji se koriste pri plazma rezanju te objasniti njihov pojedinačni utjecaj na postupak.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je pomoću plazma uređaja komprimiranim zrakom rezati lim čelika 25CrMo4 uz promjenu utjecajnih parametara prema izrađenom planu eksperimenta. Na reznim površinama izrezanih uzoraka potrebno je izmjeriti hrapavost površine. 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.

ZADATAK URUČEN

18.03.2024.



M. Bušić

## **Predgovor**

*Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom i diplomskom radu na studijskim programima Sveučilišta Sjever, izjavljujem da sam ovaj rad napravio samostalno koristeći navedenu literaturu i stečena znanja tijekom studija.*

*Zahvaljujem se svome mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. stroj., na svojoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada, ali i tijekom studiranja.*

*Također, zahvaljujem se svojim roditeljima i bližnjima na strpljenju i nesebičnosti za sve vrijeme trajanja studija.*

*Leon Šavora*

## Sažetak

Tema ovog rada je optimizacija parametara pri rezanju plazmom čelika za poboljšavanje. Teorijski dio rada detaljno opisuje postupak rezanja plazmom, različite varijante tog postupka te najvažnije karakteristike svake varijante. Definira plazmu kao četvrto agregatno stanje tvari. Navedeni su glavni sustavi i njihove komponente. Opisane su različite mogućnosti izvedbi tehnologija rezanja plazmom, uz naglasak na njihove karakteristike. Na kraju teorijskog dijela navedene su najvažnije karakteristike vrste čelika na kojoj se provodi eksperiment.

U eksperimentalnom dijelu istraživanja provedenom u laboratoriju za tehnike spajanja na Sveučilištu Sjever, upotrijebljen je plazma uređaj Hypertherm Powermax30 AIR za rezanje čelika za poboljšanje 25CrMo4 debljine 4 mm u nepoboljšanom stanju. Uzorci su rezani s različitim brzinama u vidu optimizacije brzine rezanja s obzirom na kvalitetu reza. Različite brzine rezanja su primijenjene radi optimizacije, varirajući od 70 do 90 cm/min, kako bi se procijenio utjecaj brzine rezanja na kvalitetu reza. Nakon rezanja, mjerenja hrapavosti površine reza su provedena korištenjem uređaja za mjerenje hrapavosti, izražena parametrom  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]. Na temelju tih rezultata, izračunata je prosječna vrijednost parametra  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ].

Na samom kraju rada, napisan je zaključak na dobivene rezultate eksperimenta.

**Ključne riječi:** Plazma, plazma rezanje, električni luk, plazmeni plin, jakost struje, brzina rezanja, čelik za poboljšavanje, hrapavost



## Abstract

The topic of this thesis is optimization of plasma cutting parameters for alloy steel enhancement. The theoretical part of the study provides a detailed description of the plasma cutting process, different variations of the process, and the key characteristics of each variation. It defines plasma as the fourth state of matter and outlines the main systems and their components involved. Various performance possibilities of plasma cutting technologies are described, with emphasis on their characteristics. At the end of the theoretical part, the most important characteristics of the type of steel used in the experiment are listed.

In the experimental part of the research conducted at the Joining Techniques Laboratory at the University North, the plasma device Hypertherm Powermax30 AIR was used to cut 4 mm thick 25CrMo4 steel in its untreated state. Samples were cut at different speeds to optimize cutting speed regarding the quality of the cut. Various cutting speeds were applied for optimization, ranging from 70 to 90 cm/min, to assess the impact of cutting speed on the quality of the cut. After cutting, measurements of surface roughness were performed using a surface roughness measuring device, expressed by the parameter  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]. Based on these results, the average value of the  $R_a$  parameter [ $\mu\text{m}$ ] was calculated.

At the very end of the work, a conclusion was written about the obtained results of the experiment.

**Keywords:** Plasma, plasma cutting, electric arc, plasma gas, current intensity, cutting speed, improved steel, roughness

## **Popis korištenih kratica**

ZUT Zona utjecaja topline

CNC Računalno numeričko upravljanje (eng. Computer Numerical Control)

AISI Američki institut za željezo i čelik (eng. American Iron and Steel Institute)

MIG/MAG Metal inertni plin i metal aktivni plin (eng. Metal Inert Gas and Metal Active Gas)

IGBT bipolarni tranzistor s izoliranim vratima (insulated-gate bipolar transistor)

VDC Volti istosmjerne struje (Volts Direct Current)

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Oznaka	Jedinica	Značenje
$l$	mm	duljina
$v$	cm/min	brzina rezanja
$R_a$	$\mu\text{m}$	srednja hrapavost
$t$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
$I$	A	jakost električne struje
$\sigma_M$	MPa	vlačna čvrstoća
$P$	W	snaga
$m$	kg	masa
$p$	bar	tlak

# Sadržaj

1.	<u>Uvod</u> .....	1
2.	<u>Plazma rezanje</u> .....	2
2.1.	<u>Općenito o plazmi</u> .....	2
2.2.	<u>Rezanje plazmom</u> .....	2
2.2.1.	<u>Nepreneseni luk</u> .....	3
2.2.2.	<u>Preneseni luk</u> .....	4
2.3.	<u>Sustav za plazma rezanje</u> .....	5
2.3.1.	<u>Izvor za plazma rezanje</u> .....	6
2.3.2.	<u>Pištalj ili gorionik za plazma rezanje</u> .....	7
3.	<u>Tehnologije plazma rezanja</u> .....	11
3.1.	<u>Plazma rezanje bez sekundarnog medija</u> .....	11
3.2.	<u>Plazma rezanje sa sekundarnim medijem</u> .....	12
3.2.1.	<u>Plazma rezanje sa sekundarnim plinom</u> .....	12
3.2.2.	<u>Plazma rezanje injektiranom vodom</u> .....	14
3.2.3.	<u>Plazma rezanje pod zaštitom vode</u> .....	15
3.3.	<u>Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka</u> .....	16
4.	<u>Utjecajni parametri na kvalitetu plazmenog reza</u> .....	17
4.1.	<u>Jakost struje</u> .....	18
4.2.	<u>Brzina rezanje</u> .....	19
4.3.	<u>Trošenje sapnice</u> .....	20
4.4.	<u>Odabir plina za rezanje</u> .....	20
4.4.1.	<u>Zrak</u> .....	20
4.4.2.	<u>Argon</u> .....	21
4.4.3.	<u>Vodik</u> .....	21
4.4.4.	<u>Dušik</u> .....	21
4.4.5.	<u>Kisik</u> .....	21
4.4.6.	<u>Mješavina plinova</u> .....	22
4.5.	<u>Udaljenost pištolja plazme od radnog komada</u> .....	22
5.	<u>Faze u uspostavljanju plazama rezanja</u> .....	24
5.1.	<u>Stabilizacija brzine vrtloga plina</u> .....	24
5.2.	<u>Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom</u> .....	24
5.3.	<u>Uspostavljanje pilota luka na radnom komadu</u> .....	25
5.4.	<u>Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu</u> .....	25
6.	<u>Čelici za poboljšavanje</u> .....	27
6.1.	<u>Mehanička svojstva</u> .....	27
7.	<u>Eksperimentalni dio</u> .....	29
7.1.	<u>Radni materijal</u> .....	29
7.2.	<u>Priprema ispitnih uzoraka</u> .....	30
7.3.	<u>Oprema</u> .....	31
7.3.1.	<u>Oprema za rezanje</u> .....	32
7.3.2.	<u>Uređaj za mjerenje hrapavosti</u> .....	35

<u>7.4. Eksperiment</u> .....	36
7.4.1. <i>Plazma rezanje uz promjenu brzine rezanja</i> .....	36
7.4.2. <i>Mjerenje hrapavosti površine reza</i> .....	40
<u>8. Analiza rezultata</u> .....	41
<u>9. Zaključak</u> .....	42
<u>10. Literatura</u> .....	43
<u>POPIS SLIKA</u> .....	45
<u>POPIS TABLICA</u> .....	47

# 1. Uvod

Toplinsko rezanje metala, kao tehnika, zauzima ključno mjesto u različitim sektorima proizvodnje i obrade metala, uključujući željezare, brodogradilišta, industriju energetske opreme, proizvodnju vozila, odnosno gotovo u svakoj proizvodnji u kojoj se upotrebljavaju metali. Plazma rezanje primjenjuje se široko u proizvodnji i obradi limova te raznih metalnih profila. Tijekom povijesti, tehnike toplinskog rezanja metala su se razvijale i poboljšavale kako bi se povećala ekonomičnost i produktivnost u različitim industrijama. Ovaj kontinuirani napredak jasno ukazuje na važnost posvećivanja pažnje tehnikama toplinskog rezanja metala.

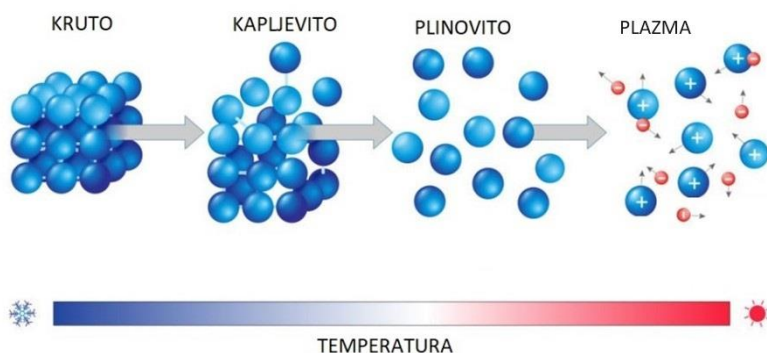
Tehnika toplinskog rezanja koja će biti detaljno istražena u ovom završnom radu je rezanje plazmom. Plazma ima poseban značaj u kontekstu toplinskog rezanja zbog svoje sposobnosti provodljivosti električne struje, disocijacije atoma i visoke ionizacije. Unutar plazme, broj pozitivnih i negativnih naboja je izjednačen, što znači da je plazma električki neutralna (jednak broj elektrona i pozitivnih iona). Tehnika rezanja plazmom pruža visoku preciznost i efikasnost te ima ključnu ulogu u modernoj metaloprerađivačkoj industriji i inovativnim tehnološkim procesima. Iz tog razloga, tema ovog završnog rada će detaljno istražiti tehnologiju i parametre koji utječu na rezanje plazmom, a sve s ciljem razumijevanja i optimizacije ove važne metode rezanja metala.

Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada bit će ispitati utjecajne parametre na kvalitetu rezne površine pri rezanju čelika za poboljšavanje.

## 2. Plazma rezanje

### 2.1. Općenito o plazmi

Plazma se često se opisuje kao četvrto agregatno stanje materije, uz kruto, kapljevito i plinovito. Kao što tekućina proključava i prelazi u plinovito stanje pod utjecajem topline, tako i plazma nastaje zagrijavanjem plina, što je prikazano na slici 2.1. Pojačavanjem temperature plina, događa se dramatična promjena u kretanju njegovih molekula. Na početku, molekule u čvrstoj tvari vibriraju usporeno. No, kako se energija i topline dodaju sustavu, kretanje molekula postaje sve brže i energičnije. U određenom trenutku, molekule postaju tako energične da počinju sudarati nasilno i intenzivno. To je trenutak kada čvrsta tvar prelazi u tekuće stanje. No, ako se i dalje dodaje energija, kretanje postaje toliko brzo u svim smjerovima da molekule više nisu u stanju održavati svoje veze. Kao rezultat toga, one se odvajaju i stvaraju plin. No, plazma je stepenica iznad tog stanja. Kada se plinu doda dodatna energija, molekule postaju sve brže i sudari među njima postaju snažniji i učestaliji. U ovom trenutku, elektroni počinju napuštati atome, ostavljajući pozitivne ione i slobodne elektrone u plazmi. Ovaj visokoionizirani plin je ono što čini plazmu posebnom [1].



Slika 2.1 Agregatna stanja tvari s porastom temperature [2]

Plazma se stoga sastoji od pozitivno nabijenih čestica (iona) i negativno nabijenih čestica (elektrona) te je električki neutralna u cjelini, jer broj pozitivnih iona jednak je broju elektrona. Ovo četvrto agregatno stanje, plazma, ima široku primjenu u mnogim industrijama i tehnološkim procesima, uključujući i tehniku rezanja metala poznatu kao rezanje plazmom [3].

### 2.2. Rezanje plazmom

Plazma rezanje je složen toplinski proces koji se temelji na energiji termičke plazme. Ovaj proces uzrokuje taljenje radnog komada, a rastaljeni materijal se uklanja mlazom plinova. Početak

postupka obuhvaća stvaranje električnog luka unutar plazme. Luk obično nastaje između elektrode, izrađene od volframa, cirkonija ili uskog komada bakra koji sadrži hafnij, koja je spojena na negativni pol izvora struje, i radnog komada ili sapnice, ovisno o načinu rezanja.

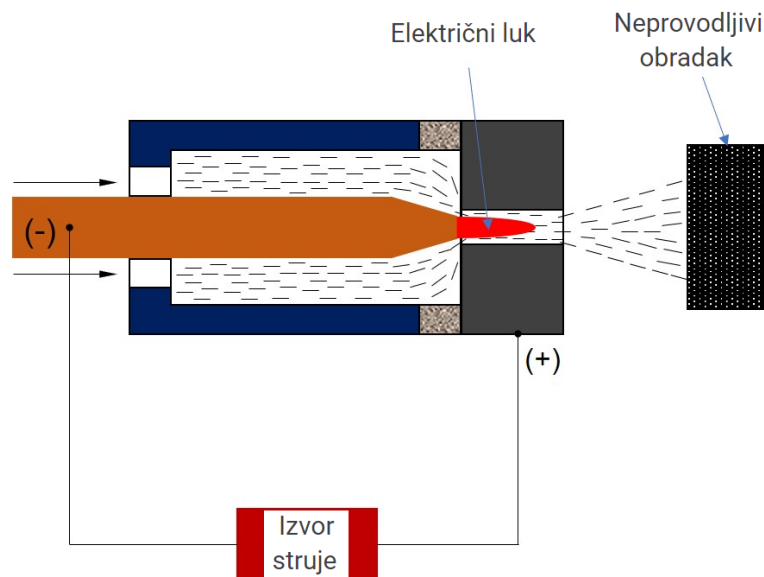
Najčešće korištena forma za prijenos električnog luka, preneseni luk, omogućuje unos veće količine toplinske energije u radni komad, što je posebno korisno kod rezanja materijala koji provode električnu struju. Suprotno tome, nepreneseni luk koristi se za rezanje polimera i ostalih materijala koji nisu električki provodljivi i za stvaranje pilot luka. Plazma plinovi nastaju kroz disocijaciju i ionizaciju plina pod utjecajem toplinske energije električnog luka. To rezultira stvaranjem mlaza plazme kojeg karakterizira visoka temperatura (između 20.000 i 40.000°C) i visoka gustoća snage. Rekombinacijom atoma i molekula, trenutačno se apsorbira energija na površini radnog komada, istovremeno oslobađajući i pojačavajući toplinski utjecaj plazma luka na radni komad pritom postiže temperature do 30 000°C.

Plazma rezanje može se izvoditi ručno ili strojno, uključujući upotrebu CNC sustava. Ovaj postupak ima široku primjenu u industriji zbog svoje brzine i učinkovitosti, omogućujući precizno i brzo oblikovanje metala i drugih materijala. Razvoj plazma rezanja započeo je u 1950-ima i donio brojne inovacije koje su povećale brzinu rezanja, kvalitetu reza i vijek trajanja potrošnih materijala. Automatizacija je također igrala značajnu ulogu u postizanju visokih brzina rezanja i kvalitete rezanja. CNC sustavi upravljanja donijeli su veću automatizaciju i smanjili ljudsku intervenciju u procesu. Plazma rezanje predstavlja ključan postupak za rezanje metala koje nije moguće rezati plinskim plamenom, poput nehrđajućeg čelika, aluminija i bakra, te ostaje nezamjenjiv dio suvremene metalne industrije [1].

### **2.2.1. Nepreneseni luk**

Plazmeni luk se oblikuje između elektrode, koja je na negativnom polu, i vodom hladene sapnice spojene na pozitivan pol, što je prikazano na slici 2.2. Kroz ovu sapnicu, plazmeni mlaz se izbacuje koristeći odgovarajući plazmeni plin. Važno je napomenuti da plazma luk nije ovisan o radnom komadu, pa stoga radni komad nije dio strujnog kruga. Postoji nekoliko načina primjene ove vrste luka. Plazmeni luk može se koristiti za naštrcavanje ili za obradu nemetala pri jako niskim strujama. Ova vrsta luka ima svoju primjenu i pri zavarivanju keramike i folija. Rezanje neprenesenim lukom, iako ima manji učinak, prikladnije je za ručno rezanje. Ovaj način rezanja omogućuje plameniku da se bez opasnosti nasloni na mjesto rezanja. Važno je napomenuti da se ovim načinom mogu rezati i materijali koji nisu električki provodljivi. Ova tehnologija nudi različite mogućnosti za precizno i učinkovito rukovanje materijalima u raznim aplikacijama [4].



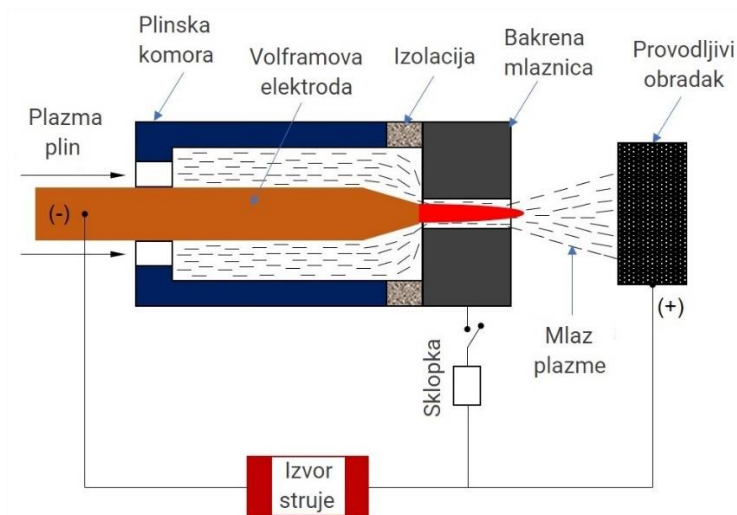


Slika 2.2 Nepreneseni luk [5]

### 2.2.2. Preneseni luk

Preneseni luk nastaje kada električna struja protječe od netaljive elektrode (katode) prema radnom komadu (anodi), a primjenjuje kako bi se postigao veći unos topline u radni komad, posebno prilikom rezanja električki provodljivih materijala. Preneseni luk je najčešće korišten oblik plazma rezanju i koje je također široko rasprostranjen i u zavarivanju. Struja kreće od vrha elektrode (koja je na negativnom polu), prolazi kroz otvor prema radnom komadu (na pozitivnom polu), a zatim se vraća do izvora. Preneseni luk karakterizira visoka gustoća energije i velika brzina plazmenog mlaza. Ova vrsta luka također se često koristi u zavarivanju, gdje omogućuje visoke brzine zavarivanja. Za inicijaciju prenesenog luka, često se koristi otpornik koji je dio strujnog kruga. Prvo se inicira pilot luk, što ograničava struju na približno 50A i uspostavlja se između sapnice plazma luka i elektrode. Nakon što dođe u kontakt s radnim komadom, glavna struja počinje teći između elektrode i radnog komada, pokrećući preneseni luk. Temperatura koja se postiže ovakvim plazmenim lukom kreće se u rasponu od 8000°C do 25000°C.

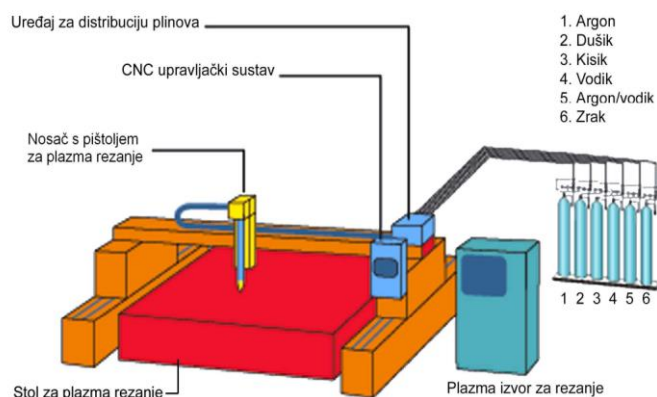
Ova tehnika rezanja prenesenim lukom karakterizira visok učinak rezanja, iako može biti izazovna za ručno rezanje zbog potrebe za održavanjem ujednačene duljine luka. Stoga se često primjenjuje u strojnom rezanju, gdje se postiže izvrsna preciznost i brzina rezanja. Na slici 2.3. vidljiv je pojednostavljeni prikaz izvedbe plazma gorionika za preneseni luk [4].



Slika 2.3 Preneseni luk [5]

### 2.3. Sustav za plazma rezanje

Sustav za plazma rezanje ima za cilj postizanje učinkovitog rezanja radnih komada u što kraćem vremenskom razdoblju, zadržavajući visoku kvalitetu rezanja. Balansiranje između cijene, brzine i kvalitete može biti izazovno prilikom projektiranja ili unaprjeđenja učinkovitosti sustava. Stoga je od velike važnosti da svaki korisnik tog sustava ima potpuno razumijevanje njegovog funkcioniranja. Kroz optimizaciju karakteristika pojedinačne komponente sustava za rezanje, moguće je postići visokokvalitetne rezultate i prihvatljive troškove rezanja. Na slici 2.4. ilustrirani je pojednostavljeni plazma sustav [1].



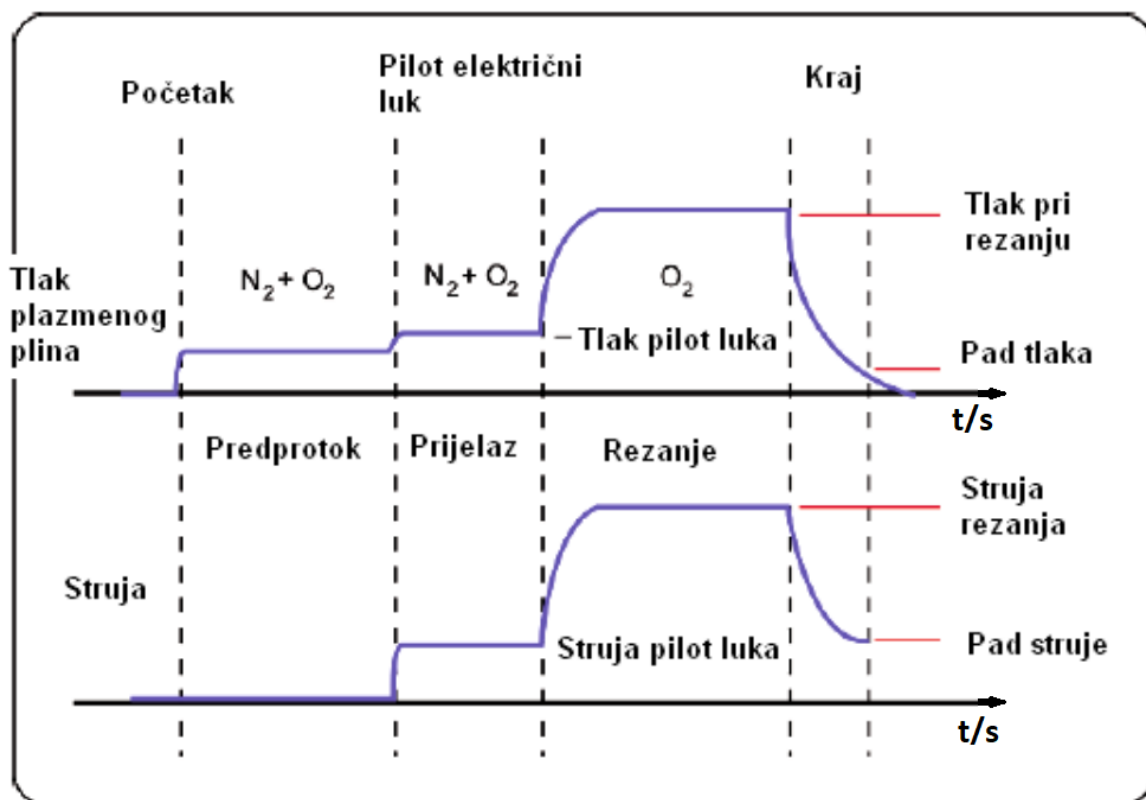
Slika 2.4 Pojednostavljeni prikaz plazma sustava [1]

Najvažnije komponente sustava uključuju izvor plazme za rezanje, plazma pištolj ili gorionik te plazmene i zaštitne plinove.

### 2.3.1. Izvor za plazma rezanje

Izvor za plazma rezanje predstavlja ključnu komponentu u sustavu za plazma rezanje jer određuje vrstu plazmenog ili zaštitnog plina koji se koristi za rezanje radnih komada. Kvaliteta rezanja radnog komada igra presudnu ulogu u proizvodnji, pa je odabir odgovarajućih plinova ili njihovih mješavina za određeni izvor za plazma rezanje ključan. Problemi s nereguliranom strujom ili protokom plina tijekom rezanja mogu značajno smanjiti vijek trajanja sustava i utjecati na kvalitetu rezanja.

Izvori za plazma rezanje opremljeni mikroprocesorskim kontrolerom omogućuju prilagodbu parametara tijekom postupka rezanja, tako i povećanje struje te predprotok mješavine plinova na početku rezanja kako bi se električni luk brže uspostavio, čime se smanjuje trošenje elektrode. Također, mogu kontrolirati smanjenje struje i tlaka plina pri završetku rezanja, omogućujući skurućivanje oksida što olakšava uklanjanje istog s površine elektrode i samim time produžuje trajanje potrošnih dijelova. Ovakvi izvori omogućuju održavanje visoke kvalitete reza tijekom duljeg razdoblja proizvodnje. Slikoviti prikaz algoritma početka i završetka rezanja prikazan je na slici 2.5 [2].



Slika 2.5 Algoritam mikroprocesorskog kontrolera [1]

Razvoj izvora za plazma rezanje prošao je kroz nekoliko faza. Raniji sustavi koristili su fiksni ispravljač temeljen na diodama za pretvaranje izmjenične struje u istosmjernu struju. Iako su takvi sustavi bili moćni, gubili su puno energije i imali su varijacije u izlaznoj snazi. Kasnije su se pojavili silicijski kontrolirani ispravljači i novi izvori snage temeljeni na inverterima. Inverteri su omogućili bolju kontrolu i smanjenje veličine sustava, čime su postali prikladni za različite primjene, uključujući i ručno plazma rezanje. Današnji izvori za plazma rezanje uglavnom koriste inverter tehnologiju i imaju izvrsne mogućnosti integracije s CNC i robotskim sustavima. Kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja obavlja se automatski pomoću mikroprocesorskog kontrolera, što osigurava konstantnu kvalitetu reza.

Uzimajući u obzir sve navedeno, izvor za plazma rezanje predstavlja ključnu kariku u ostvarivanju visokokvalitetnih rezultata rezanja uz optimalnu ekonomičnost u različitim proizvodnim postupcima. Slika 2.6. prikazuje inventorski plazma rezač [7].



*Slika 2.6 Inventorski plazma rezač proizvođača WÜRTH [8]*

### **2.3.2. Pištolj ili gorionik za plazma rezanje**

Gorionik ili pištolj za plazma rezanje ključni su alati u procesu plazma rezanja. Postoje različite veličine i oblici gorionika i pištolja, prilagođeni potrebama rezanja različitih materijala. Održavanje precizne udaljenosti između gorionika ili pištolja i radnog komada presudno je za postizanje visokokvalitetnog reza. U tu svrhu, mehanizirani uređaji opremljeni su sustavima za održavanje konstantne udaljenosti. Slika 2.7. prikazuje ručni gorionik prikladan za rezanje u rasponu od 20 do 75 A.



*Slika 2.7 Gorionik za ručno rezanje [9]*

Konstrukcija gorionika ili pištolja obično uključuje vanjsku oplatu koja štiti uređaj od topline koja se generira tijekom rezanja. Također, sadrže sustav kanala za različite plinove (zaštitne i plazmene) koji su pravilno odvojeni i izolirani da bi se spriječilo formiranje električnog luka unutar samog uređaja. Ključni potrošni dijelovi gorionika ili pištolja prikazani su na slici 2.8., a to su s lijeva na desno; kapica za pričvršćenje, unutarnja sapnica, vrtložni prsten i elektroda. Kvaliteta i trajnost ovih dijelova izravno utječu na kvalitetu rezanja. U industrijskim postavkama često se koriste mehanizirani gorionici ili pištolji opremljeni automatskim kontrolnim sustavima koji održavaju preciznu udaljenost između uređaja i radnog komada, što poboljšava konzistenciju rezanja. Gorionici i pištolji su dizajnirani za različite primjene, uključujući rezanje čelika, nehrđajućeg čelika, aluminija i drugih materijala, prilagođavajući se specifičnim potrebama industrije. Redovito održavanje i zamjena potrošnih dijelova ključni su za održavanje učinkovitosti i kvalitete rezanja gorionika ili pištolja. Gorionici i pištolji za plazma rezanje igraju ključnu ulogu u metalurgiji, proizvodnji, građevinarstvu i drugim industrijama gdje je potrebno precizno i učinkovito rezanje metala i drugih materijala [1] [10].



*Slika 2.8 Osnovni potrošni dijelovi plazma gorionika [11]*

Elektroda je neizostavna komponenta u procesu plazma rezanja, jer služi kao emitirajući element koji stvara električni luk. Tijekom rezanja emitirajući element se troši, a zatajenje elektrode događa se zbog odbijanja električnog luka od srebrne ili bakrene navlake koja ga okružuje, što može uzrokovati ozbiljna oštećenja elektrode. U različitim uvjetima rezanja koristi se različiti materijal za elektrodu, pri čemu volfram često dolazi u obzir u neoksidirajućim okolinama, dok se za rezanje s kisikom preferira hafnij. Bez obzira na materijal, osnovna funkcija elektrode je prihvatiti električnu struju iz katodnog bloka unutar gorionika, usmjeravajući je kroz svoj vrh kako bi se stvorio električni luk na radnom komadu. Visoki tlakovi plazmenih plinova često uzrokuju brže istrošenje elektrode, dok niži tlakovi obično doprinose produljenju njenog vijeka trajanja. Održavanje elektrode i redovita zamjena ključni su za očuvanje učinkovitosti procesa plazma rezanja. Slika 2.9. prikazuje različite vrste elektroda koje se koriste kod plazma rezanja [10] [13].



*Slika 2.9 Različite vrste elektroda [12]*

Konstrukcija sapnice pažljivo je dizajnirana s otvorom nešto većim od promjera fokusiranog ionizirajućeg plazma luka kako bi efikasno fokusirala plazma luk i okolni plin, osiguravajući precizno rezanje. Oštećenje sapnice, bilo unutarnjeg ili vanjskog dijela, može ozbiljno narušiti kvalitetu rezanja. Unutarnje oštećenje često je posljedica pregrijavanja elektrode, problema s paljenjem luka, protokom plina ili nepravilnom postavkom struje. Kada se radi s debljim materijalima (najčešće kod probijanja), nedostatna udaljenost između vrha gorionika i materijala može rezultirati prskanjem i potencijalno oštetiti vanjsku površinu sapnice. Zaštita sapnice pomoću odgovarajuće navlake ključna je za sprječavanje fizičkog kontakta sa radnim komadom i očuvanje integriteta sapnice, čime se osigurava kvalitetno plazma rezanje. Osim toga, oštećenje vanjskog dijela sapnice može se pojaviti zbog poteškoća u stvaranju električnog luka između

elektrode i materijala koji se reže. Na slici 2.10. uspoređene su nekorištena i korištena sapnica [10] [13].



*Slika 2.10 Potpuno nova unutarnja sapnica lijevo i oštećena unutarnja sapnica desno [13]*

Vrtložni prsten u unutrašnjosti gorionika ima ulogu stvaranja vrtloga u plinu koji će okruživati plazma luk. Vanjski sloj plina oko elektrode dodatno fokusira i usmjerava plazma luka kako bi se postigla veća preciznost rezanja. Osim toga, vrtloženje plina ima značajnu ulogu u hlađenju procesa. Važno je napomenuti da kontakt zaštitnog sloja plina s sapnicom često predstavlja kritičan aspekt u plazma rezanju. Niže temperature oko sapnice sprječavaju njezino izgaranje i doprinose sporijem trošenju. Gustoća vrtloga značajno utječe na sam proces rezanja. Na primjer, veći intenzitet vrtloga sužava električni luk, povećava tlak plina i doprinosi visokoj kvaliteti rezanja, ali može smanjiti trajnost elektrode. Manji pak intenzitet vrtloga omogućava duže trajanja elektrode, ali može rezultirati slabijom kvalitetom rezanja. Stoga, pravilno podešavanje gustoće vrtloga ključno je za postizanje optimalnih rezultata u plazma rezanju [10] [13].

Kapica za pričvršćenje služi za održavanje cjelokupne stabilnosti i integriteta gorionika tijekom procesa plazma rezanja. S obzirom na iznimno visoke temperature pri vrhu gorionika, ova komponenta nije samo odgovorna za povezivanje i podršku potrošnih dijelova, već također mora izdržati ekstremne uvjete rada. Naime, visoke temperature ne utječu samo na dijelove koji sudjeluju u formiranju luka, već i na komponente koje održavaju strukturalnu stabilnost gorionika tijekom cijelog procesa rezanja. Stoga, kapica za pričvršćenje pridonosi dugotrajnosti komponenata i pouzdanosti plazma rezanja [10] [13].

### 3. Tehnologije plazma rezanja

Tehnologije rezanja plazmom neprestano napreduju s glavnim ciljem poboljšanja kapaciteta i kvalitete rezanja, smanjenja troškova proizvodnje te smanjenja utjecaja na okoliš. Danas su dostupne različite opcije rezanja plazmom, ovisno o materijalu, debljini i jakosti izvora. Varijacije se uglavnom odnose na dizajn plazma pištolja ili gorionika, vrstu i jakost izvora te upotrebu plazma medija poput zraka, vode, plinova i njihovih kombinacija.

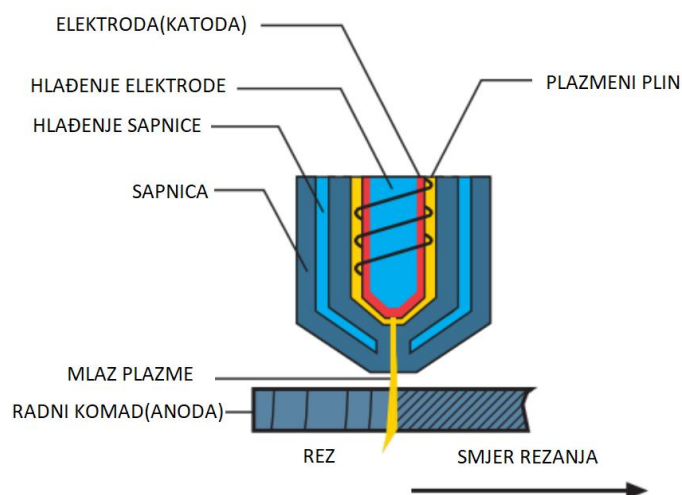
Postoje tri glavne tehnike rezanja plazmom, ovisno o dizajnu plazma pištolja ili gorionika:

- konvencionalno rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima
- plazma rezanje s primjenom sekundarnog medija, poput plina ili vode, u atmosferskim uvjetima
- plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka.

#### 3.1. Plazma rezanje bez sekundarnog medija

Uobičajeni uređaji za plazma rezanje opremljeni su relativno jednostavnim plazma pištoljima koji su konstruirani za uporabu s jednim plinom. Plin koji obavlja dvostruku funkciju: stvaranje plazma luka i hlađenje dijelova unutar plazma pištolja. Često korišteni plinovi za ovu svrhu uključuju dušik, kisik ili mješavine argona i vodika. Ponekad se za specifične primjene može koristiti i komprimirani zrak, uz uporabu posebne elektrode od hafnija ili cirkonija koja se montira u bakreni držač. Plazma luk se sužava unutar sapnice, što rezultira kosim reznim površinama karakterističnim kod ove metode. Ovaj postupak obično se koristi za ručno rezanje i prikladan je za materijale debljine do 16 mm s radnom strujom do 100 A. Rezanje bez upotrebe sekundarnog medija najčešće se primjenjuje u ručnim operacijama, žljebljenju i za rezanje tanjih materijala gdje visoki standardi kvalitete nisu presudni. Također, CNC sustavi često kontroliraju plazma pištolj u raznim industrijama kao što su brodogradnja, obrada limova i automatizirano rezanje profila. Slika 3.1. prikazuje rezanje bez sekundarnog medija [1] [14].





Slika 3.1 Standardni postupak rezanja (bez sekundarnog medija) [14]

## 3.2. Plazma rezanje sa sekundarnim medijem

Primjena sekundarnog medija, poput vode ili određenih plinova, donosi određene prednosti kod procesa rezanja plazmom. Ova tehnika korisna je u sljedećim situacijama:

- pri proizvodnji manjih dijelova
- kod čestih početaka rezanja ili probijanja materijala
- kada je potrebna visoka kvaliteta reza, posebno kod visokolegiranog čelika i aluminija
- za rezanje rešetaka ili izvođenje rezova s prekidima
- u podvodnom rezanju plazmom

Korištenje sekundarnog medija doprinosi poboljšanju kvalitete i preciznosti rezanja u ovim specifičnim situacijama.

### 3.2.1. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom

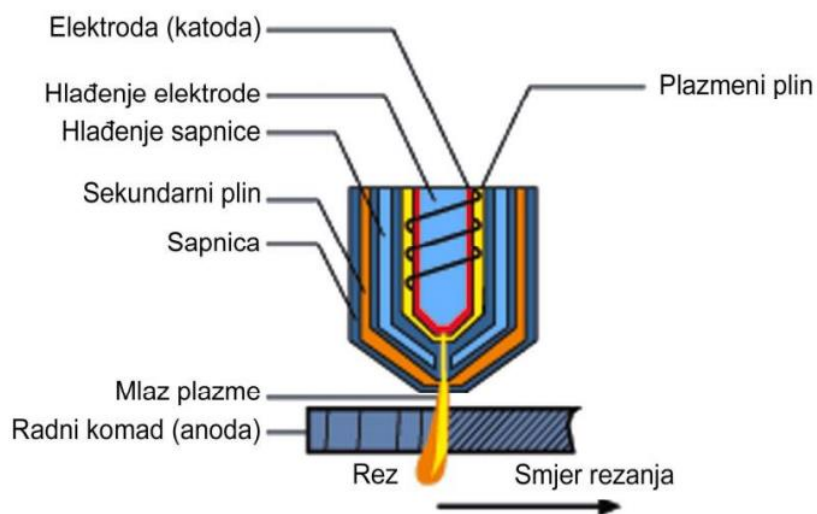
Sapnica plazma pištolja, smještena koaksijalno s glavnom sapnicom, služi za unos rotirajućeg plina koji okružuje plazma luk. Ovaj rotirajući plin, zajedno sa sapnicom, štiti plazma luk od utjecaja okolne atmosfere i sprječava štrcanje rastaljenog metala, posebno prilikom bušenja lima (slika 3.3.). Osim toga, rotirajući plin igra ključnu ulogu u očuvanju kvalitete reza. Na primjer, kada se radi o rezanju visokolegiranih čelika, kod kojih postoji potencijalna opasnost od oksidiranja rezne površine, ključno je koristiti dušik kao sekundarni plin kako bi se osiguralo čisto

rezanje bez formiranja troske na limovima debljine do 20 mm. Prednost ovog procesa je u tome što sekundarni plin sužava plazma luk i učinkovitije otpuhuje rastaljeni materijal. Ovisno o materijalu koji se obrađuje, koristi se odgovarajući sekundarni plin, kao što su zrak ili kisik za čelike s nižim udjelom ugljika, ugljični dioksid za nehrđajući čelik i mješavina argona i vodika za aluminij, a primarni plin je najčešće dušik. Rezanje plazmom s dva plina omogućuje veće brzine rezanja u usporedbi s konvencionalnim plazma rezanjem. Također, plazma pištolji koji koriste rotirajući plin omogućuju i podvodno rezanje plazmom. Ova metoda rezanja smanjuje buku, stvaranje prašine i aerosola te filtrira ultraljubičasto zračenje luka. Unatoč manjoj deformaciji radnih komada, podvodno rezanje plazmom zahtijeva veću potrošnju energije. Maksimalna debljina lima koja se može rezati suhim postupkom kreće oko 180 mm kada koristite struji od 600 A. Međutim, kada se primjenjuje podvodno rezanje plazmom, ovaj postupak omogućuje rezanje materijala debljine do 100 mm pri struji od 750 A. Kod plazma rezanja pod vodom, radni komad je potopljen u vodu na dubinu od 60 do 100 mm. Ovaj pristup ima dodatnu korist jer znatno smanjuje potencijalno štetan utjecaj postupka rezanja plazmom na okoliš. Naime, toplina koja se razvija tijekom rezanja i potencijalno štetni ispušni plinovi apsorbiraju se i rashlađuju vodom, čime se minimizira negativan ekološki utjecaj ovog procesa. No, jedan od nedostataka podvodnog rezanja leži u tome što je radni komad potopljen u vodi tijekom samog procesa rezanja, što može predstavljati izazov u praćenju i procjeni kvalitete reza. Brzine rezanja su smanjene za približno 10-20%, a također postoji ograničenje u rezanju većih debljina radnih komada.

Proces podvodnog rezanja plazmom zahtijeva specijalizirane opreme, kao što su kade ili stolovi koji omogućuju naplavljivanje vodom, što je prikazano na slici 3.2. Periodičko čišćenje tih kada ili stolova može rezultirati privremenim zaustavljanjem proizvodnje i dodatnim troškovima održavanja. Minimalizacija dodatnih troškova i nepotrebna zaustavljanja postigla se razvojem vodenih stolova koji posjeduju funkciju samočišćenja te su kao takvi najpraktičnije i najekonomičnije rješenje za korisnike podvodnog rezanja plazmom [1] [15].



*Slika 3.2 Postupak podvodnog plazma rezanja [16]*

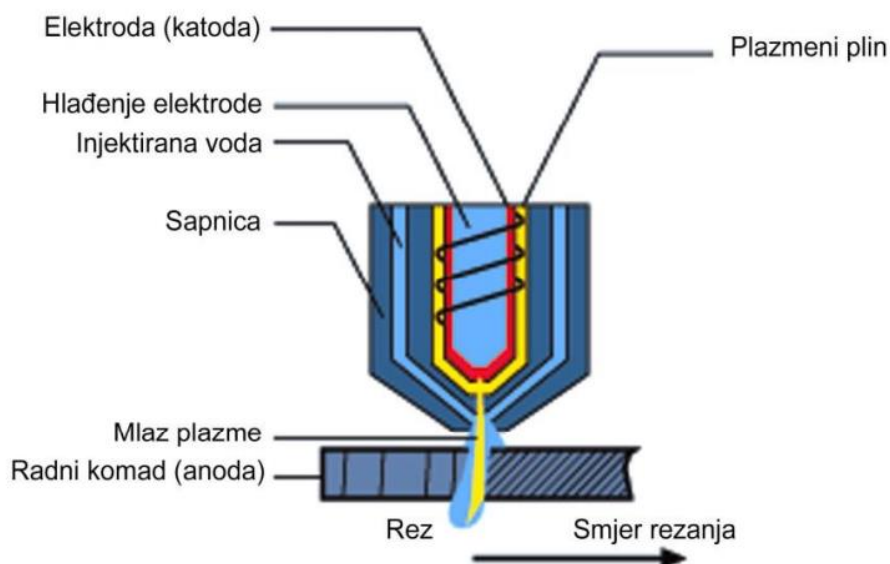


Slika 3.3 Postupak rezanja sa sekundarnim plinom [15]

### 3.2.2. Plazma rezanje injektiranom vodom

Na slici 3.4. se prikazuje postupak plazma rezanja s dodatkom ubrizgane vode, gdje se za stvaranje luka upotrebljava samo jedan plin, dok se ubrizgavanje vode vrši radijalno ili spiralno izravno u plazma luk. Ovaj pristup ima prednost sužavanja električnog luka i povećanja gustoće plazme. Sužavanje električnog luka postiže se stvaranjem izolacijskog parnog sloja između plazmenog mlaza i ubrizgane vode. Ovaj inovativni postupak, razvijen 1968. godine, omogućio je upotrebu cijelog donjeg dijela sapnice izrađenog od keramike, čime se eliminirala pojava dvostrukog električnog luka koja je često uzrokovala oštećenje sapnice. Ovaj postupak može se primijeniti za struje u rasponu od 260 do 750 A i omogućuje visokokvalitetno rezanje materijala različitih vrsta i debljina. Također se često koristi u strojno mehaniziranim procesima rezanja.

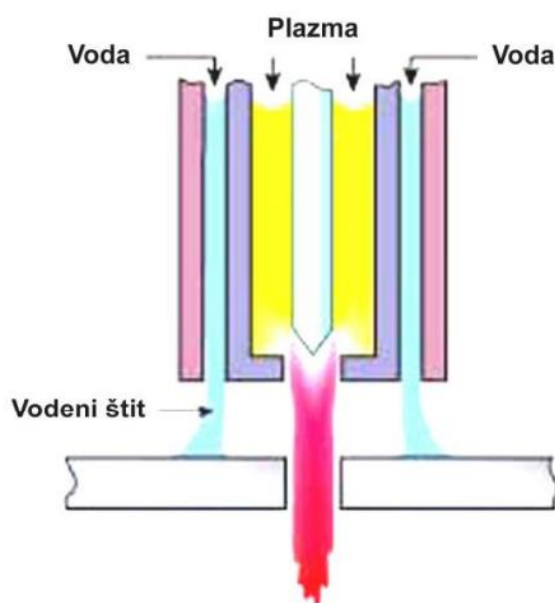
Kao plazmeni plin, osim dušika, također se može upotrebljavati zrak, čineći postupak znatno ekonomičnijim. Dušik je fizički najpovoljniji zbog sposobnosti prenošenja toplinske energije iz električnog luka na materijal koji se reže. Iako se na mjestu gdje se voda ubrizgava u električni luk postižu visoke temperature, manje od 10% vode isparava. Preostala voda, osim navedenih poboljšanja, također ima ulogu hlađenja površine radnog komada, čime se sprječava pojava troske na površini reza i pomaže u održavanju optimalne temperature sapnice tijekom najvećeg toplinskog opterećenja [2] [15].



Slika 3.4 Postupak rezanja s injektiranom vodom [15]

### 3.2.3. Plazma rezanje pod zaštitom vode

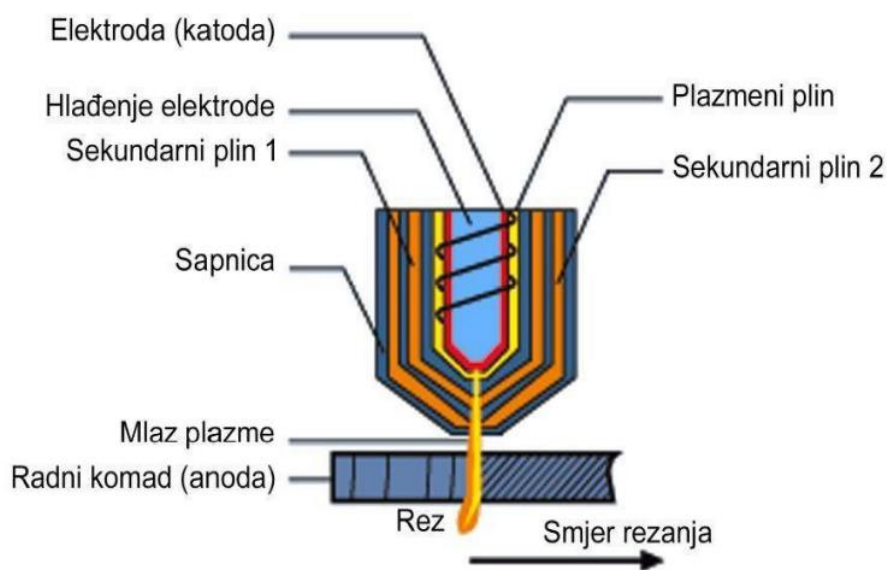
Proces rezanja pod zaštitom vode (slika 3.5.) za hlađenje zagrijanih dijelova gorionika i hlađenje materijala koji se reže upotrebljava vodu, poboljšavajući tako kvalitetu reza, a naročito kod rezanja visokolegiranih čelika i aluminija debljine do 50 mm. U ovom procesu, primjena vodenog zaštitnog sloja ima za posljedicu razbijanje plazmenog luka i kao rezultat toga nastaje vodik. Prisutnost vodika pozitivno utječe na kvalitetu rezanja, rezultirajući sjajnom metalnom površinom reza. Ovaj postupak primjenjuje se isključivo za strojno mehanizirano rezanje [2] [15].



Slika 3.5 Postupak rezanja pod zaštitom vode [15]

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

Plazma rezanje s povećanim suženjem plazmenog luka predstavlja tehniku u kojoj se povećava gustoća električnog luka, ali zahtijeva niže brzine rezanja s ciljem postizanja preciznijih rezova. Veća gustoća električnog luka postiže se korištenjem sapnica s manjim izlaznim promjerom. Proizvođači koriste različite pristupe za sužavanje luka, pri čemu neki od njih omogućuju izradu iznimno preciznih vertikalnih rezova prilikom rezanja metalnim limovima debljine od 0,5 do 25 mm. Ovaj pristup odlikuje se malom širinom reza i znatno manjom deformacijom zbog smanjenog toplinskog utjecaja. Rezultat ovog procesa rezanja smješta se između uobičajenog plazma rezanja i laserskog rezanja u smislu kvalitete rezanja. Glavna ograničenost ove tehnike je da se može koristiti za rezanje materijala debljine do 20 mm, uz niže brzine rezanja u usporedbi s konvencionalnim plazma rezanjem i još niže brzine u usporedbi s laserskim rezanjem (60 – 80% sporije). Postupak je prikazan na slici 3.6 [1] [2].

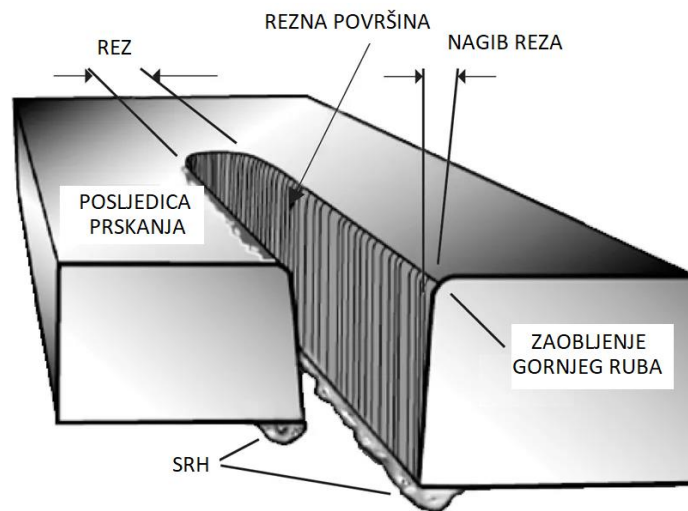


Slika 3.6 Postupak rezanja s povećanim suženjem plazmenog luka [15]

## 4. Utjecajni parametri na kvalitetu plazmenog reza

Širina je glavno svojstvo reza, što odgovara količini rastaljenog materijala koja je otpuhana plazmenim mlazom. Širina reza obično varira od dimezije promjera otvora sapnice do dvostruko veće širine od otvora sapnice. Različiti utjecajni čimbenici na dimezije reza u odnosu na dimenzije sapnice, uključujući brzinu, jakost struje i razmak između sapnice i materijala koji se reže. [2]

Sljedeće bitno svojstvo kvalitete reza je nagib reza ili kut površine reza. Kut površine reza može varirati ovisno o vrsti zaštite pri rezanju i drugim faktorima. Na primjer, kada se koriste vrtložni plinovi kao zaštita pri rezanju, nagib reza na gornjoj strani materijala iznosi 1 do 3°, dok na donjoj strani materijala iznosi 3 do 8°. Kod laminarnog strujanja zaštitnih plinova, nagib na obje strane radnog materijala iznosi 4 do 8°. Udaljenost sapnice također može značajno utjecati na nagib reza, pri čemu manja udaljenost rezultira manjim nagibom reza. Smanjenjem brzine rezanja također se može smanjiti nagib reza. Na slici 4.1. ilustrirani je plazma rez [1] [2].



Slika 4.1 Prikaz reza prije uklanjanja troske [18]

Zakrivljenost gornjeg ruba reza zavisno je o debljini materijala, o primijenjenom postupku te korištenom zaštitnom plinu. Zakrivljenost je najizraženija pri rezanju tanjih materijala, a može smanjiti na najmanju moguću mjeru primjenom zaštitne atmosfere, plina ili vode [1] [2].

Troska se obično formira na dnu reza i ovisi o brojnim faktorima poput brzine i struje rezanja, ali i o vrsti i debljini materijala. Prebrzo, ali i presporo rezanje mogu uzrokovati nastanak troske, što vodi do dodatnih troškova za njeno uklanjanje. Na slici 4.2. prikazan je izrezani segmet s skrućenom troskom na rubovima i segmet na kojem je troska uklonjena brušenjem. Stoga je od ključnog značaja precizno podešavanje parametara rezanja. Također, moguće je da se na vrhu reza nakupi mala količina troske (naštrcane kapljice), što se obično događa zbog niske brzine rezanja, prevelikog razmaka između sapnice i radnog materijala ili oštećene sapnice [2].



*Slika 4.2 Izrezani segmenti prije i nakon uklanjanja troske [17]*

Zona utjecaja topline (ZUT) u plazma rezanju obuhvaća područje materijala koje nije direktno rastaljeno tijekom postupka rezanja, ali je podvrgnuto značajnim promjenama temperature zbog blizine rastaljenih dijelova materijala. Uobičajeno je da je ZUT kod plazma rezanja relativno uska, što je posljedica uskog fokusa plazmenog mlaza i brzine izvođenja samog procesa. Korištenjem plazma rezanja pod vodom, moguće je smanjiti veličinu ZUT-a [1].

Neodgovarajuća kvaliteta reza često zahtijeva dodatnu obradu i povećava ukupne troškove proizvodnje. Stoga je ključno razumjeti kako različiti čimbenici utječu na kvalitetu rezanja. Najbitniji utjecajni parametri na kvalitetu rezanja plazmom su:

- jakost struje
- brzina rezanja
- trošenje sapnice
- odabir plina za rezanje
- udaljenost pištolja plazme od radnog komada [1] [2].

#### **4.1. Jakost struje**

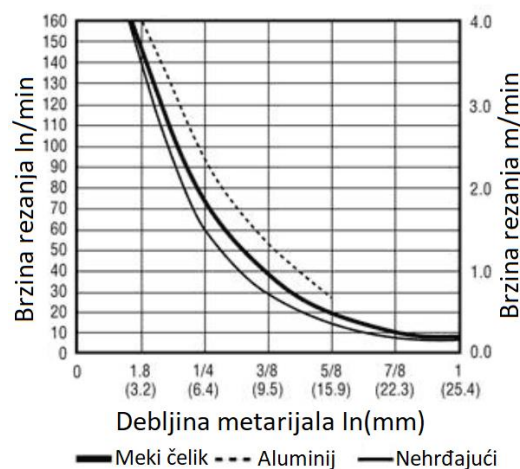
Jakost struje u plazma rezanju prilagođava se zavisno o materijalu koji se reže i o veličini sapnice. Za postizanje veće produktivnosti i brzine rezanja, često se koristi najveća dostupna sapnica i maksimalna struja koju sustav podržava. Međutim, za postizanje najbolje moguće kvalitete reza, često je potrebno rezati pri nižim brzinama koristeći manju sapnicu i umjerenu struju. To rezultira ravnomjernijim rezom s manjim nagibom i boljom kvalitetom. Jakost struje

koja se primjenjuje za rezanje ovisit će o dimezijama sapnice i obratno. Na primjer, sapnica s promjerom 1.5 mm ima sposobnost podnošenja struje od 100 A, dok će sapnica s promjerom 6 mm biti u stanju podnijeti struju od čak 1000 A. Važno je pravilno uskladiti jakost struje kako bi se ostvarilo 95% maksimalne izlazne snage sapnice. Nedostatak snage rezultira manjom energijom plazmenog mlaza, mlazom koji nije fokusiran te nečistim rezom. S druge strane, prevelika snaga ili jakost struje rezultira slabijim lukom i grubljom površinom reza [1].

## 4.2. Brzina rezanje

Optimalna brzina rezanja je ključna za postizanje visoke kvalitete reza. Slika 4.3. prikazuje ovisnost brzine rezanja o debljini materijala. Kod rezanje materijala, važno je održavati odgovarajuće uvjete kako bi se postigao ravni i čist rez bez pojave srha. U slučaju da je brzina rezanja prevelika, može doći do oscilacije ili zaostajanja luka, što rezultira neravnomjernim rezom s velikim nagibom i pojavom troske na donjoj površini reza. Uklanjanje troske koja nastaje uslijed previsoke brzine rezanja može biti teško i često zahtijeva naknadno brušenje. Međutim, kod premale brzine rezanja, širina žlijeba je veća, a rastaljeni materijal neće biti u potpunosti ispuhan mlazom plina, te će se lijepiti pri dnu reza i skrućivanjem će nastati troska. Za razliku od srha koji nastaje uslijed prevelike brzine rezanja, srh koji se pojavi pri manjoj brzini relativno je jednostavan za uklanjanje.

Najbolji način za procjenu odgovarajuće brzine je promatranje luka, koji bi trebao biti vertikalalan u odnosu na radni materijal, tj. bez vidljivog nagiba na izlaznom bridu reza. Poznavajući optimalne brzine rezanja za različite debljine i vrste materijala, moguće je lako odrediti proizvodni kapacitet, obično izražen u metrima reza po satu [1] [19].



Slika 4.3 Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [17]



### **4.3. Trošenje sapnice**

Istrošenje sapnice ima značajan utjecaj na vertikalnost reza i preciznost nagiba, kao i na pojavu srha na rubu reza. Promjer sapnice igra ključnu ulogu u određivanju koliko jaku struju može podnijeti. Važno je napomenuti da jakost struje treba biti podešena tako da ostvari otprilike 95% izlazne snage na sapnici. Kada je jakost struje premala u odnosu na kapacitet sapnice, rezultat će biti smanjena energija plazmenog mlaza, nejasno usmjeren mlaz te nečist rez. S druge strane, kada je jakost struje prevelika, moguć je slabljenje luka i grublja površina reza. Dakle, pravilno odabir jakosti struje u skladu s promjerom sapnice ključan je za postizanje visokokvalitetnih rezova plazmom [1].

### **4.4. Odabir plina za rezanje**

Sastav tehničkih plinova koji se primjenjuju u procesu rezanja, bilo da su plazmeni ili za zaštitu, ima značajan utjecaj na stabilnost i brzinu rezanja te na kvalitetu rezanih površina. Kako bi se postigao ekonomičan proces rezanja uz željeni standard kvalitete, neophodno je pažljivo odabrati plazmeni plin ili njihovu mješavinu koja odgovara određenom materijalu. Pri odabiru tehničkog plina, ključnu ulogu igraju fizičke karakteristike tog plina, uključujući njegovu sposobnost ionizacije i energiju disocijacije, toplinsku vodljivost, atomsku težinu i kemijsku reaktivnost.

Također, čistoća plina je od iznimne važnosti; na primjer, minimalna potrebna čistoća dušika za plazma rezanje iznosi 99,995%, dok je za kisik potrebno osigurati čistoću od 99,5%. Ako se ne zadovolji potrebna čistoća plina, to može rezultirati smanjenjem kvalitete rezanja, značajnim smanjenjem životnog vijeka elektrode ili nemogućnošću probijanja tankih materijala. Pored karakteristika koje utječu na svojstva rezanja plina, također je važno razmotriti praktične aspekte kao što su dostupnost, cijena i čistoća plina pri izboru plina za određenu primjenu [1].

#### **4.4.1. Zrak**

Zrak se smatra najsvestranijim plazmenim plinom i omogućuje visoku kvalitetu i brzinu rezanja kod nelegiranih i nehrđajućih čelika, kao i aluminijskih. Upotreba zraka također smanjuje troškove jer nema potrebe za nabavkom posebnog plina. Međutim, komprimirani zrak koji se koristi treba biti pažljivo pročišćen od svih nečistoća, poput čestica ili vlage. Zrak je mješavina dušika (oko 70%) i kisika (oko 21%). Uporaba zračne plazme može rezultirati nitracijom i oksidacijom površine reza, te kasnije može dovesti do poroznosti u zavarenim spojevima [1] [2].

#### **4.4.2. Argon**

Argon je inertni plin, što implicira da ne dolazi do kemijskih reakcija s materijalom tijekom procesa rezanja. S obzirom na njegovu značajnu atomsku masu, postiže se visoka energija potrebna za izbacivanje otopljenog materijala, a njegova niska energija ionizacije olakšava stvaranje električnog luka. To rezultira stvaranjem visokoenergetskog plazmenog mlaza. Radi svoje niže toplinske vodljivosti, a i veće cijene, argon se često primjenjuje u kombinaciji s drugim plinovima u procesu rezanja [1] [2].

#### **4.4.3. Vodik**

Vodik, s druge strane, ima iznimno dobru toplinsku vodljivost i disocira pri visokim temperaturama. To znači da većina energije prelazi na električni luk, sužava ga i omogućuje postizanje veće gustoće energije. Čisti vodik, zbog svoje male atomske težine, nije prikladan za plazma rezanje jer ne proizvodi dovoljno kinetičke energije za ispuhivanje taline metala [1] [2].

#### **4.4.4. Dušik**

Dušik jedino u slučaju visokih temperatura kemijski reagira s materijalom, dok ostaje inertan pri nižim temperaturama. U smislu toplinske vodljivosti i atomske težine, dušik se nalazi između argona i vodika. Dodavanjem dušika argonu povećava se toplinska vodljivost i kvaliteta reza. Dušik je i dalje najčešće korišteni plin pri rezanju aluminija i nehrđajućeg čelika [1] [2].

#### **4.4.5. Kisik**

Kisik ima slične karakteristike kao dušik u pogledu toplinske vodljivosti i atomske težine, ali ima oksidacijski učinak na otopljeni materijal, proizvodeći dodatnu toplinsku energiju koja može rezultirati povećanom brzine rezanja. Učestalo se primjenjuje za rezanje ugljičnih čelika i pruža optimalnu kvalitetu i najbrže rezanja među svim plazmenim plinovima. Međutim, veći troškovi i potreba za češćom izmjenom potrošnih dijelova plazma pištolja mogu se navesti kao nedostaci rezanja kisikom kao plazmenim plinom [1] [2].

#### **4.4.6. Mješavina plinova**

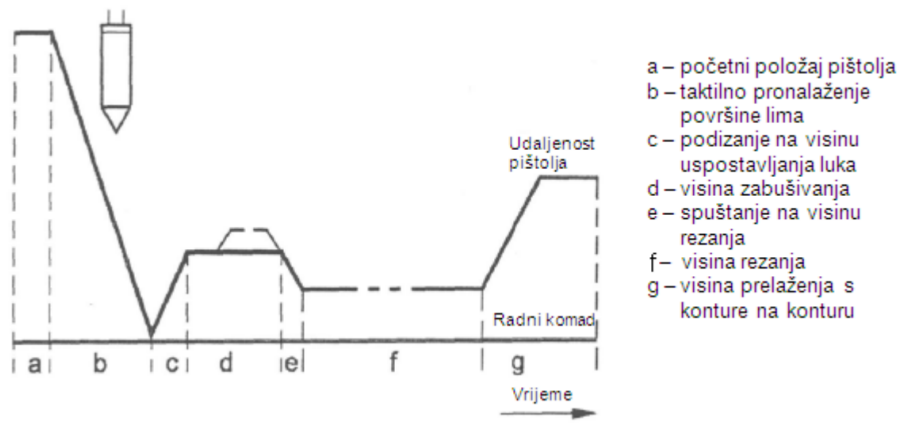
Mješavine plinova se dobivaju kombiniranjem navedenih plinova. Na primjer, mješavina argona i vodika omogućuje rezanje aluminija i nehrđajućeg čelika s različitim postotkom vodika ovisno o debljini materijala. Pravilan izbor mješavine plinova može rezultirati glatkim i visokokvalitetnim rezovima, ali može dovesti i do pojave srha na donjem rubu reza. Upotreba kisika kao plazmenog plina postala je standardna za rezanje ugljičnih čelika i omogućuje fini mlaz taline metala. Nedostaci uključuju više troškove i kraći vijek trajanja potrošnih materijala [1] [2].

#### **4.5. Udaljenost pištolja plazme od radnog komada**

Za postizanje visokokvalitetnih rezova plazmom, pravilno održavanje i održavanje konstantnog razmaka između gorionika i radnog komada igra ključnu ulogu. Očuvanje konstantnog razmaka tijekom cijelog procesa rezanja ključno je za osiguravanje konstantne dimezije širine reza i točnih dimenzija izrezanih komponenta, čak i ako je površina nepravilna ili neravna.

Ovaj zahtjev se također odnosi na proces probijanja, što je posebno ključno kod rezanja srednjih i debelih limova kako bi se minimaliziralo štrcanje rastaljenog materijala u sapnicu. Obično se na početku bušenja koristi taktilni senzor koji određuje visinu bušenja tako da pištolj približava limu dok senzor ne dotakne površinu materijala. Nakon bušenja, glava se podiže na određenu visinu rezanja da bi se izbjeglo oštećenje sapnice, a zatim započinje proces rezanja.

Visina bušenja i brzina rezanja ovise o plinskoj mješavini koja se koristi i materijalu radnog komada. Tijekom samog rezanja, udaljenost između vrha pištolja i površine obratka koji se reže održava se konstantnom pomoću automatskog sustava regulacije visine. Očitavanja napona u luku koriste se za prilagodbu visine Z osi prema gore ili dolje, ovisno o promjenama u napetosti. Kao rezultat toga, postiže se visoka kvaliteta reza bez potrebe za intervencijom korisnika. Na slici 4.4. prikazana je automatska regulacija visine gorionika [1].

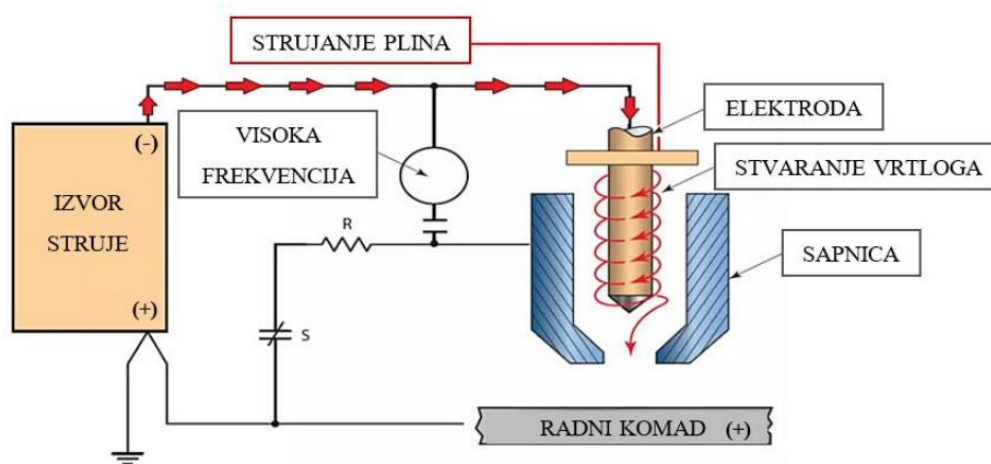


Slika 4.4 Tijek gibanja pištolja kod CNC upravljanog rezanja plazmom [1]

## 5. Faze u uspostavljanju plazma rezanja

### 5.1. Stabilizacija brzine vrtloga plina

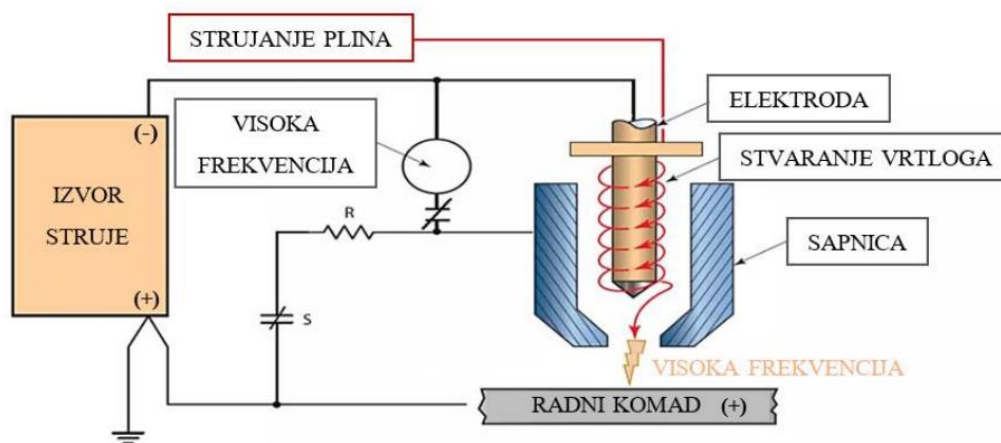
Za ostvarivanje i održavanje procesa rezanja, izvor struje i električni krug su povezani s plazma pištoljem posredstvom električnih kablova i vodova. Ti vodovi i kablovi omogućavaju neophodan protok plina i visokofrekventne električne struje, koja pokreće i održava rezanje. Kao što se vidi na slici 5.1. plazmeni plin cirkulira oko elektrode kroz otvor sapnice. U početnoj fazi ovog procesa, ostvarenje stabilne brzine vrtloga plina ključno je za pravilan kontakt i stvaranje električnog luka. [2]



Slika 5.1 Stabilizacija brzine vrtloga luka [2]

### 5.2. Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom

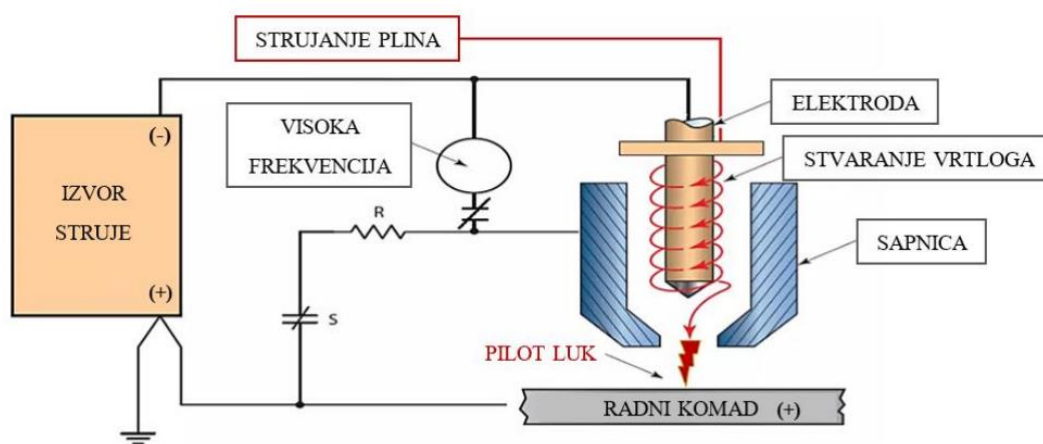
Napon otvorenog kruga mjeri se od elektrode (-) do sapnice (+). Kako se prikazuje na slici 5.2., sapnica je spojena s pozitivnim (+) polom napajanja putem otpornika i releja, dok je elektroda povezana s negativnim (-) polom putem izvora struje. Nakon postizanja stabilnosti vrtloga plazmenog plina, visokofrekventna struja inicira ionizaciju plazmenog plina [2].



Slika 5.2 Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom [2]

### 5.3. Uspostavljanje pilota luka na radnom komadu

Visokofrekventni luk prenosi energiju na plin, što dovodi do ionizacije plina i daje mu sposobnost vođenja električne struje. Ovaj električki provodljivi plin omogućava struji da teče između elektrode i sapnice, formirajući pilot luk, što je prikazano na slici 5.3. Pretpostavljajući da je sapnica blizu površine reza, pilot luk će se spojiti s radnim komadom. Kada pilot luk ostvari kontakt s uzemljenim radnim komadom, struja se prenosi s elektrode na radni komad, a visokofrekventni modul se isključuje, čime se zatvara strujni krug [2].

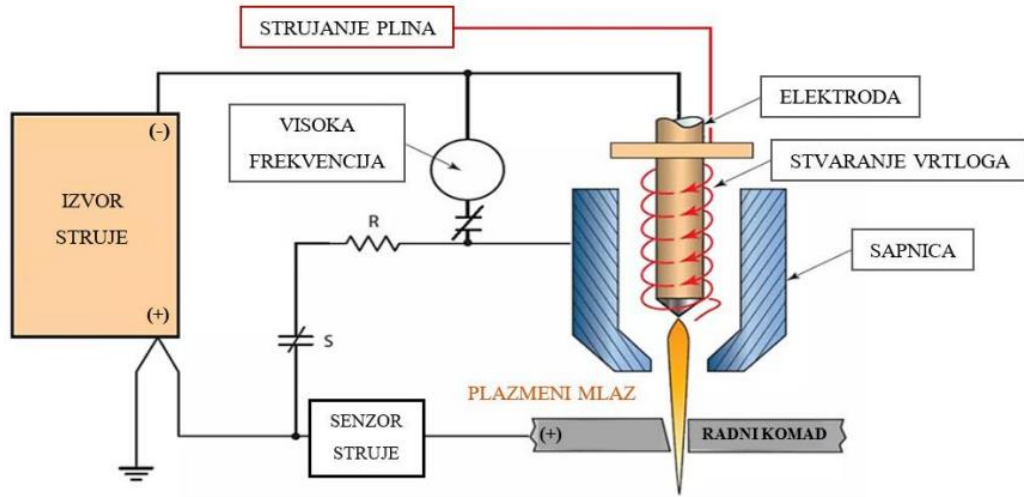


Slika 5.3 Uspostavljanje pilota luka na radnom komadu [2]

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

Izvor istosmjernje struje generira napon za rezanje, koji operater može prilagoditi prema zahtjevima za određeni materijal. Kada električni luk stupi u kontakt s radnim komadom, proces probijanja započinje, nakon čega slijedi proces rezanja tog komada. Plazma luk ima visoku

temperaturu koja tali materijal i omogućuje probijanje radnog komada, dok plin pod visokim tlakom odstranjuje rastaljeni materijal s dna reza. Zaštitni plin cirkulira kroz vanjsku sapnicu, okružujući mlaz plazme i pružajući zaštitu rezu. Trenutak probijanja prikazan je na slici 5.4 [1] [2].



Slika 5.4 Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu [2]

## 6. Čelici za poboljšavanje

Čelici za poboljšanje pripadaju kategoriji nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji postižu zadovoljavajuće granice čvrstoće, vlačne čvrstoće i žilavosti kroz procese kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja na temperaturama većim od 500°C. Ovi čelici sadrže 0,25-0,60% ugljika, što značajno utječe na njihovu sposobnost kaljenja. Također, među čelike za poboljšanje ubrajaju se i čelici za cementaciju, koji, iako nisu legirani, prođu kroz postupak kaljenja na temperaturama iznad temperature austenitizacije jezgre, nakon čega slijedi popuštanje na temperaturi iznad 200°C ili čak 500°C. Preciznim izborom čelika za poboljšanje i temeljitom primjenom procesa poboljšanja postiže se visoka "konstrukcijska čvrstoća" proizvoda. Ovaj koncept uključuje visoku granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću, žilavost i dinamičku izdržljivost. Potpuno prokaljivanje se postiže gašenjem cijelog presjeka proizvoda uz uporabu nadkritične brzine hlađenja kako bi se postigla potpuno martenzitna mikrostruktura. Ovaj pristup osigurava maksimalnu otpornost na udarce i homogenost ostalih mehaničkih svojstava.

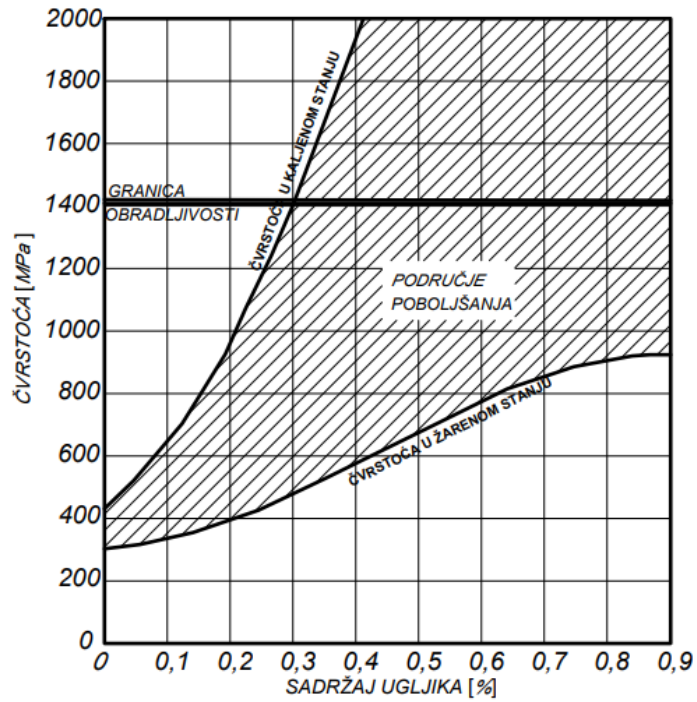
Čelici za poboljšanje široko se koriste u izradi konstrukcijskih komponenti koje su izložene značajnim i kompleksnim naprezanjima tijekom upotrebe. Proces poboljšanja uključuje termički tretman u kojem se čelik, obično u stanju poluobrađenih ili potpuno obrađenih komada, podvrgava kaljenju, a zatim se ponovno zagrijava na temperaturu iznad 530°C prije brzog ili postupnog hlađenja. Karakteristično je da čelici za poboljšanje pokazuju visoku granicu razvlačenja, čvrstoću i žilavost, što povoljno utječe na njihovu otpornost na zamor i dinamička naprezanja, posebno naizmjenična i udarna naprezanja [20].

### 6.1. Mehanička svojstva

Poboljšanje mehaničkih svojstava čelika procjenjuje se putem različitih mehaničkih ispitivanja, uključujući određivanje granice razvlačenja, čvrstoće, izduženja, kontrakcije, žilavosti, svojstava pri povišenim temperaturama, trajne čvrstoće i mehaničkih svojstava pod dinamičkim opterećenjima. Primjenom poboljšanja, širok spektar mehaničkih karakteristika čelika može značajno evoluirati. Značajna karakteristika, posebice za inženjere i konstruktore, jest granica razvlačenja čelika. U slučaju kada granica razvlačenja čelika nije izražena, koristi se 0,2% granica razvlačenja kao referenca. Odnos između granice razvlačenja i čvrstoće čelika varira ovisno o tipu čelika, dimenzijama i primijenjenim procesima poboljšanja. Na slici 6.1. može se vidjeti grafikon koji prikazuje čvrstoću nelegiranih ugljičnih čelika manjih dimenzija u dva različita stanja - stanje nakon žarenja i stanje nakon kaljenja, uz uzimanje u obzir različitih razina sadržaja ugljika u čeliku. Između ovih dvaju stanja (žarenja i kaljenja) postoji opsežno područje u kojem različite



kombinacije procesa kaljenja i popuštanja te različiti sadržaji ugljika u čeliku omogućuju postizanje raznolikih čvrstoća čelika [20].



Slika 6.1 Mehanička svojstva poboljšanog nelegiranog čelika s obzirom na sadržaj ugljika [20].

## 7. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio ovog rada prati ispitivanje utjecaja varijacija brzine rezanja na kvalitetu rezne površine čelika za poboljšavanje 25CrMo4. Ova istraživanja provedena su u laboratoriju za tehnike spajanja na Sveučilištu Sjever s fokusom na analizu konvencionalnog plazma rezanja bez sekundarnog medija. Proces ispitivanja obuhvatio je tri različite brzine rezanja  $v$ , [cm/min] uz održavanje konstantne jakosti struje  $I$ , [A]. Nakon eksperimenata rezanja, provedeno je precizno mjerenje hrapavosti reza svake površine uzorka, koristeći sofisticirani uređaj za ispitivanje hrapavosti površine. Ovaj eksperiment ima za cilj pružiti detaljno razumijevanje utjecaja varijacija u brzini rezanja na kvalitetu rezne površine čelika 25CrMo4, doprinoseći općem razumijevanju procesa plazma rezanja.

### 7.1. Radni materijal

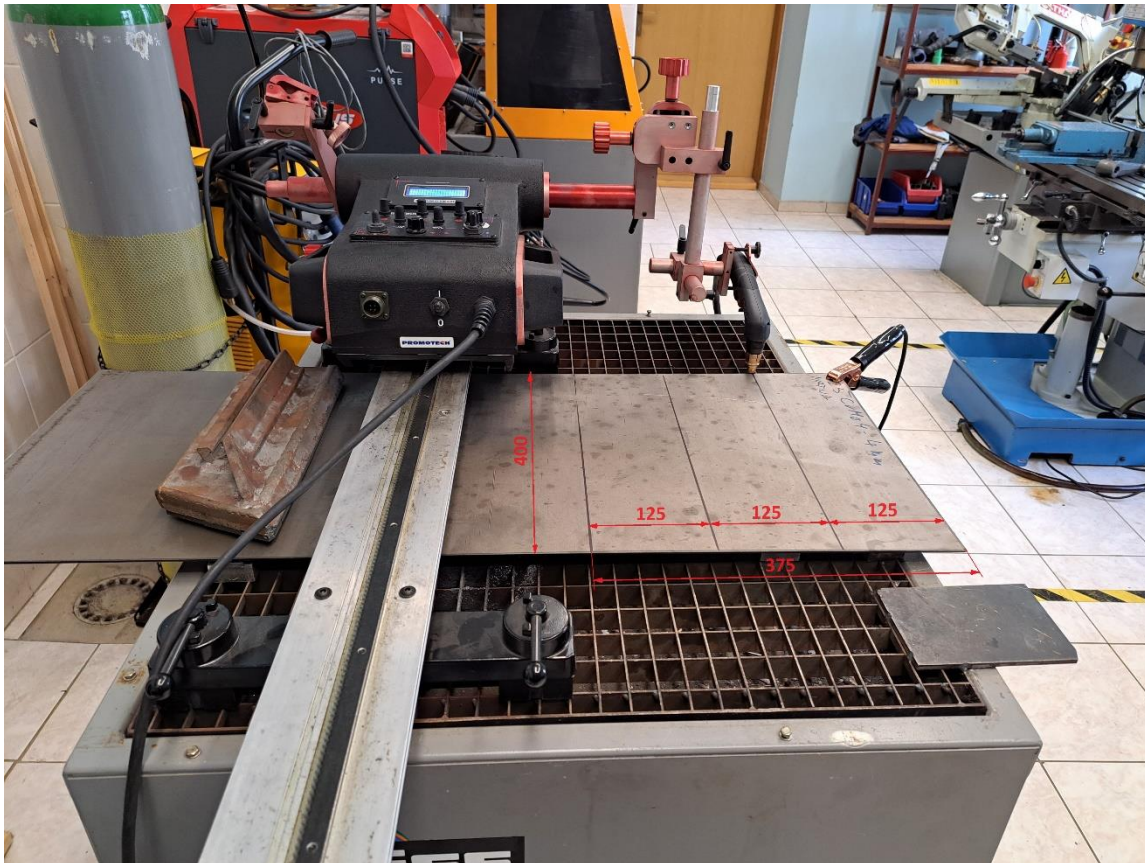
Materijal koji je korišten za provođenje eksperimenata je čelik za poboljšavanje 25CrMo4 u nepoboljšanom stanju ili prema normi AISI čelik 4130, s debljinom od 4 mm. Čelik 25CrMo4 je pogodan za termičku obradu te se lako može zavarivati. Očekivana vlačna čvrstoća ovog materijala kreće se između 700 MPa i 950 MPa. Često se koristi za izradu dijelova u automobilske i zrakoplovnoj industriji, gdje je potrebna izuzetna čvrstoća, poput okvira, osovina, vratila te dijelova turbina. Kemijski sastav materijala prikazan je u tablici 7.1.

Element	Sastav (%)
C	0,22–0,29
Si	0,15–0,35
Mn	0,60–0,90
P	$\leq 0,025$
S	$\leq 0,035$
Cr	0,90–1,20
Mo	0,15–0,25

Tablica 7.1 Kemijski sastav čelika za poboljšavanje 25CrMo4

## 7.2. Priprema ispitnih uzoraka

Polazni materijal za provođenje eksperimenata bio je ploča lima dimenzija 1000 mm x 400 mm, debljine 4 mm. Na površini uzorka precizno su iscrtane ravne linije flomasterom kako bi se olakšalo postavljanje savnice i definirao smjer rezanja, te linije dijele materijal na tri segmenta dimenzija 125 mm x 400 mm svaki te ostatak, što je prikazano na slici 7.1. Svaki je segment uz rub dodatno označen brojevima od 1 do 3, što će olakšati identifikaciju tijekom analize budući da će za svaki rez biti primijenjena različita brzina posmaka.



*Slika 7.1 Priprema uzorka za rezanje (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

### 7.3. Oprema

Oprema korištena za izvođenje eksperimenata pripada inventaru Sveučilišta Sjever i smještena je unutar laboratorija za tehnike spajanja. Osnovna oprema koja se koristi uključuje plazma rezač, uređaj za linearno kretanje te uređaj za precizno mjerenje hrapavosti. Detaljni opisi ovih uređaja slijedi u nastavku rada kako bi se omogućilo bolje razumijevanje njihove funkcionalnosti i uloge u provedbi eksperimenata, a slika 7.2. prikazuje opremu za rezanje te ispitivani materijal.



Slika 7.2 Oprema za provođenje rezanja (fotografirano na Sveučilištu Sjever)

### 7.3.1. Oprema za rezanje

Korišteni plazma uređaj za rezanje materijala bio je Hypertherm Powermax30 AIR, ručni plazma rezač s ugrađenim zračnim kompresorom. Gorionik plazma rezača bio je montiran na linearni traktor Promotech Rail Bull, pružajući stabilno i ravno kretanje plazma pištolja po površini ispitnog uzorka. Ovo precizno kretanje ostvareno je upotrebom zupčaste letve i tračnica koje su čvrsto pričvršćene za zavarivački stol uz pomoć magnetskih jedinica. Za vrijeme rezanja uzoraka, plazma pištolj bio je pažljivo podešen kako bi održavao konstantan razmak od 1 mm između pištolja i ispitnog uzorka tijekom cijelog procesa rezanja.

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

Hypertherm Powermax30 AIR predstavlja prenosivi plazma rezač koji kombinira izvanrednu svestranost s praktičnim dizajnom. Ovaj kompaktni uređaj idealan je za terenske radove i rad na različitim lokacijama. Ono što čini Powermax30 AIR posebnim je njegov integrirani sustav komprimiranog zraka, eliminirajući potrebu za vanjskim izvorom plina i pružajući korisnicima potpunu neovisnost. Bez obzira radite li s čelikom, nehrđajućim čelikom, aluminijem ili drugim metalima, ovaj uređaj ima sposobnost rezanja limova debljine do 16 mm za niskouglični čelik te do 13 mm za nehrđajući čelik i aluminij, pružajući svestranost u različitim radnim okruženjima. Glavne karakteristike uređaja prikazane su na tablici 7.3. Maksimalna jakost struje uređaja iznosi 30 A. Vrlo je prilagodljiv jer može raditi na 120 V i na 240 V. Powermax30 AIR dizajniran je s naglaskom na jednostavnoj uporabi, a intuitivni upravljački panel omogućuje brzo postavljanje parametara rezanja i početak rada bez dugotrajnih priprema te je opremljen sustavom za automatski napon. Hyperthermova tehnologija osigurava visoku učinkovitost rezanja, kombinirajući preciznost i brzinu rezanja. Osim toga, uređaj je opremljen sigurnosnim značajkama poput termičke zaštite i zaštite od preopterećenja, pružajući pouzdanost i sigurnost tijekom rada. Potrošni dijelovi ovog uređaja nalaze se u plazma pištolju i prikazani su na slici 7.2., a to su: deflektor, kapica za pričvršćivanje, sapnica, vrtložni prsten i elektroda. Sve te značajke čine Powermax30 AIR sveobuhvatnim alatom za rezanje metala, omogućujući radnicima brzo i precizno rezanje, bilo da se nalaze na terenu ili u radionici. Plazma uređaj prikazan je na slici 7.4.



*Slika 7.3 Zamjenjivi dijelovi gorionika*

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

Tablica 7.2 Karakteristike plazma uređaja

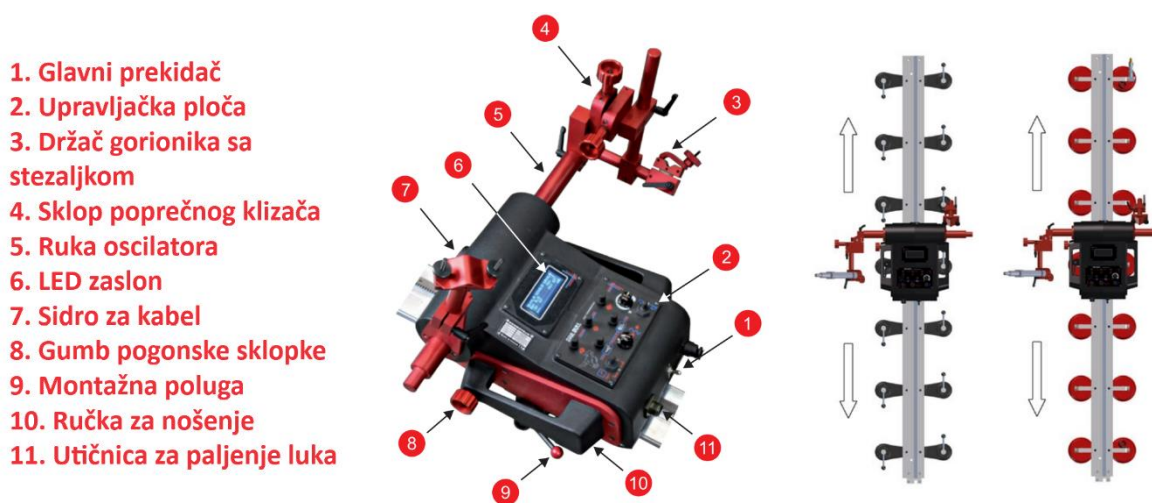


Slika 7.4 Plazma uređaj

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

Promotech Rail Bull je visokoučinkovit traktor za zavarivanje koji može biti korišten i za rezanje. Može se koristiti u raznim položajima, uključujući ravno, horizontalno, vertikalno, nadglavno i slično. Neke od primjena Rail Bull su u proizvodnji prikolica, rezervoara, tlačnih posuda, greda mostova te drugih konstrukcijskih elemenata. Pomiče se duž krute ili polufleksibilne tračnice na feromagnetskim i neferomagnetskim materijalima zahvaljujući pogonu sa zupčanicima. Ovaj kompaktni traktor ima izdržljivo aluminijsko kućište, a za napajanje mu je dovoljna struja od 115–230 V ili 42 V. Brz mehanizam za pričvršćivanje omogućuje upotrebu različitih vrsta MIG/MAG gorionika, dok precizno podešavanje gorionika osigurava visoku kvalitetu zavora. Sa sposobnošću rada u vertikalnim i horizontalnim položajima, Rail Bull omogućuje svestranost u raznim situacijama. Slike 7.5. i 7.6. prikazuju glavne dijelove Promotech Rail Bull traktora.

Ostale značajke uključuju višenamjenski LED zaslon za praćenje procesa i upozorenja, mogućnost automatskog uključivanja/isključivanja luka koje olakšava početak i kraj zavarivanja ili rezanja. S ugrađenim linearnim oscilatorom za proizvodnju valovitih zavora, Rail Bull pruža preciznost i konzistentnost u zavarivačkim operacijama. Sa svojim krutim tračnim sustavom, omogućuje kontinuirano zavarivanje, dok se fleksibilnost tračnice prilagođava različitim površinama.



*Slika 7.5 Promotech Rail Bull*

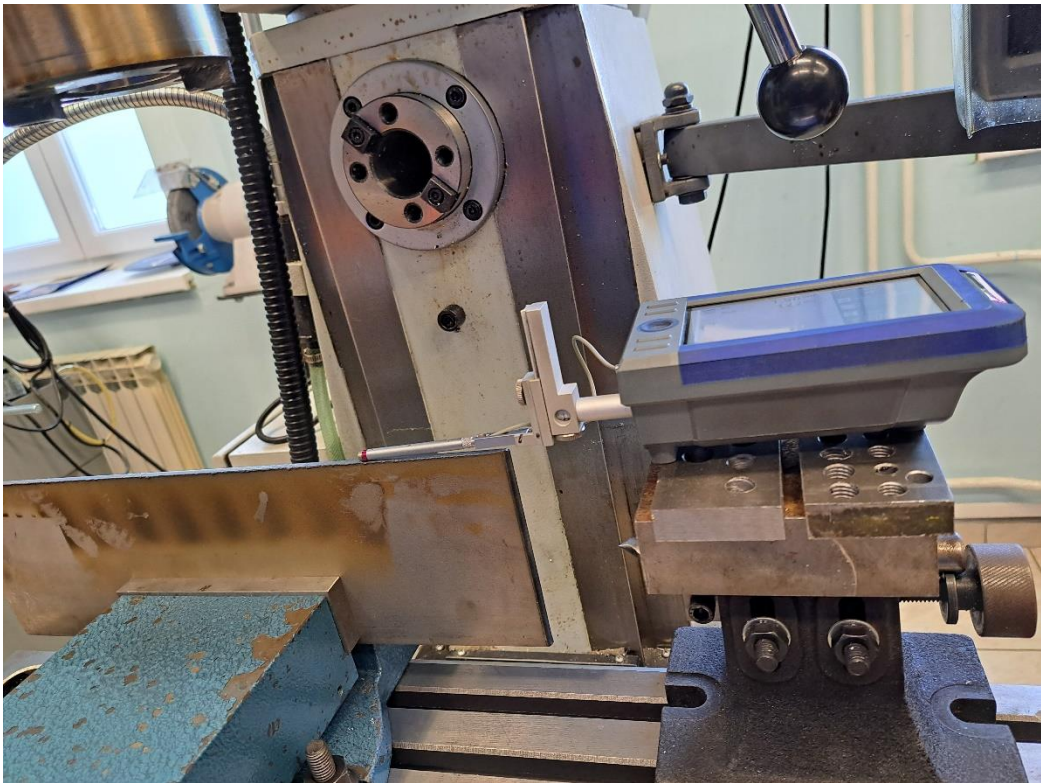


*Slika 7.6 Upravljačka ploča Promotech Rail Bull traktora s led zaslonom (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

### **7.3.2. Uređaj za mjerenje hrapavosti**

Nakon rezanja lima izmjerena je hrapavost rezne površine za što je korišten visokokvalitetni uređaj za precizno mjerenje hrapavosti površina AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 100. Uređaj pruža pouzdane i detaljne informacije o teksturi i finišu različitih materijala, koje se kasnije mogu koristiti za analizu površinskih karakteristika. Jednostavna upotreba ovog uređaja olakšava postavljanje, izvođenje mjerenja te interpretaciju rezultata. Mobilnost ga čini prikladnim i za rad na terenu, pružajući svestranost u različitim industrijskim okruženjima. AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 100 široko se primjenjuje u raznim industrijama, uključujući inženjering, proizvodnju, metalurgiju, medicinu i druge sektore gdje precizno praćenje hrapavosti materijala ima ključnu ulogu u osiguravanju visokih standarda kvalitete i preciznosti. Uređaj je prikazan na slici 7.7.





*Slika 7.7 Uređaj za mjerenje hrapavosti AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 100 (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

## 7.4. Eksperiment

### 7.4.1. Plazma rezanje uz promjenu brzine rezanja

Brzina rezanja će se mijenjati od 90 do 70 cm/min. Svi ostali parametri će se držati konstantnima, što je prikazano u tablici 7.3. Uzorci materijala 25CrMo4 će biti izrezani različitim brzinama rezanja kako bi se vidio utjecaj promjene brzine rezanja na značajke kvalitete rezanja (hrapavost površine, kvaliteta reza, srh).

Uzorak	Plin	Brzina (cm/min)	Udaljenost sapnice od lima(mm)	Jakost struje (A)
1	Zrak	90	1	30
2	Zrak	80	1	30
3	Zrak	70	1	30

*Tablica 7.3 Prikaz parametara rezanja*

Nakon postavljanja lima, označavanja linija rezanja te pravilnog pozicioniranja gorionika i traktora za linearno kretanje, termometrom je izmjerena temperaturu lima te je iznosila 24.4°C, što je prikazano na slici 7.8.



*Slika 7.8 Temperaturu materijala prije prvog reza (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

Prije svakog sljedećeg reza, kontrolirana je temperatura lima sve dok se ne ohladi natrag na tu referentnu temperaturu, što je prikazano na slici 7.9. Ovaj postupak osigurao je da su uvjeti za svaki rez konzistentni, s izuzetkom parametra brzine posmaka, koji je prilagođavan svjesno. Takav pristup jamči dosljednost rezultata i kontrolu uvjeta kako bi se postigli što točniji i pouzdaniji rezultati.



*Slika 7.9 Provjera temperature materijala prije trećeg reza (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

Tijekom izvršenja eksperimenta plazma rezanja čelika za poboljšavanje 25CrMo4 debljine 4 mm, pri promjenama brzina rezanja od 90 do 70 mm/min došlo je do potpunog rezanja materijala, što je prikazano na slici 7.10. Slika 7.11. prikazuje postupak rezanja.



*Slika 7.10 Materijal nakon rezanja na tri segmeneta (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*



*Slika 7.11 Postupak plazma rezanja (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

#### 7.4.2. Mjerenje hrapavosti površine reza

Nakon rezanja materijala i njegovog hlađanja na početnu temperaturu, uslijedilo je mjerenje hrapavosti rezne površine za što je korišten već spomenuti prijenosni ručni uređaj AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 100. Prije nego što se pristupi samom mjerenju hrapavosti rezne površine, ključno je uvjeriti se da je mjesto na kojem se provodi mjerenje oslobođeno vibracija, te osigurati stabilno postavljanje mjernog uređaja kako bi se garantirala preciznost rezultata. Ticalo uređaja postavlja se na sredinu rezne površine. Nakon završetka mjerenja i povratka ticala na početnu poziciju, pogonska jedinica je pažljivo uklonjena s mjernog područja, a zatim su očitane vrijednosti prikazane na zaslonu uređaja.

Mjerenje hrapavosti rezne površine svakog od reza ponovljeno je pet puta, te su rezultati zapisani u tablicu. Mjerno područje korišteno u ovom eksperimentu iznosilo je 4 mm, a skala 100  $\mu\text{m}$ . Navedene postavke zadane su iskustveno prema dobivenoj hrapavosti reza. Slika 7.12. prikazuje uređaj za mjerenje hrapavosti te je na led zaslonu vidljiv rezultat jednog od mjerenje.



*Slika 7.12 Prikaz rezultata na led zaslonu uređaja nakon izmjerene hrapavosti jednog od reza (fotografirano na Sveučilištu Sjever)*

## 8. Analiza rezultata

Tijekom eksperimenta, prije samog izvođenja mjerenja hrapavosti, bilo je vidljivo golim okom da će neki od uzoraka vjerojatno imati visoku hrapavost. To se očitovalo u gruboj teksturi izrezanih uzoraka s uočljivim brazdama. Nakon plazma rezanja, primijećeno je da su neki uzorci imali naglašenu zakošenu reznu površinu, s talinom i troskom zalijepljenom na površini reza i donjem rubu reza. U području reza, zona utjecaja topline na svim izrezanim uzorcima bila je uska. Važno je napomenuti da nije postignuta jednolika rezna površina svih uzoraka zbog varijacija u brzini rezanja, te se mjerenje hrapavosti na određenim mjestima uzoraka suočilo s ograničenjima. Mjerenje hrapavosti nekih uzoraka ponovljeno je više puta zbog problema s naljepljivanjem taline i troske, uz uzimanje u obzir najbližih rezultata.

Dobiveni rezultati mjerenja svih uzoraka prikazani su u tablici 7.4., gdje su navedene izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza, izražene parametrom  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]. Na temelju tih mjerenja, izračunata je prosječna vrijednost parametra  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ].

MJERENJE HRAPAVOSTI $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]			
Redni broj mjerenja	Uzorak 1 (90 cm/min)	Uzorak 2 (80 cm/min)	Uzorak 3 (70 cm/min)
1.	1.84	2.34	1.68
2.	1.80	1.90	1.62
3.	2.08	2.10	1.62
4.	1.96	2.50	1.64
5.	2.12	1.90	1.56
<b>Srednja vrijednost</b>	1.96	2.148	1.624

Tablica 8.1 Rezultati mjerenja hrapavosti

Uzorak 2 rezan je brzinom posmaka od 80 cm/min, na donjoj površini skrutilo se zanemarivo malo otopljene taline u obliku srha, manje nego kod ostala dva reza. Na prvi pogled, rezna površina djelovala je prilično glatko, no rezultati mjerenja hrapavosti otkrili su da je uzorak 1 zapravo imao grublju površinu u usporedbi s druga dva uzorka. Uzorak 3 je rezan brzinom posmaka od 70 cm/min, što je rezultiralo nižim parametrom hrapavosti u odnosu na preostala dva uzorka. Međutim, primijećena je nešto veća količina stvrdnute troske na donjoj površini materijala uz rub reza. Uzorak 1, rezan brzinom od 90 cm/min, pokazao je sličnu količinu stvrdnute taline kao i uzorak 2, dok je parametar hrapavosti smješten između uzorka 1 i 3.

## 9. Zaključak

Plazma rezanje predstavlja široko primijenjen postupak rezanja, ističući se svojom učinkovitošću i mnogobrojnim područjima primjene. U ovom toplinskom procesu, plazma tali radni materijal, te ga istovremeno izbacuje mlazom plina. Za izvođenje ovog postupka najčešće se koristi preneseni luk, omogućujući rezanje svih materijala koji provode električnu struju. Plazma rezanje često se primjenjuje u mehaniziranim sustavima zbog visokih brzina rezanja koje pruža. Glavni ulazni parametri plazma rezanja obuhvaćaju jakost električne struje i brzinu rezanja. Operater, vođen preporukama proizvođača opreme, prilagođava parametre kako bi postigao optimalnu kvalitetu rezanja. Važno je napomenuti da preporuke proizvođača, iako korisne, ponekad mogu sadržavati marketinške poruke usmjerene više prema prodaji opreme nego prema postizanju ekonomske isplativosti i vrhunske kvalitete rezanja. Izlazni parametri plazma rezanja odnose se na kvalitetu rezultirajućih površina, uključujući hrapavost, količinu srha, kut nagiba rezne površin, širinu zone utjecaja topline i mnoge druge. Faktori koji se ne mogu kontrolirati tijekom rezanja proizlaze iz radnog okruženja. Dakle, plazma rezanje ostaje važna tehnologija u procesima rezanja, pružajući brze rezultate i visoku prilagodljivost u različitim radnim uvjetima. Održavanje ravnoteže između kontroliranih ulaznih parametara i nepredvidivih faktora radnog okruženja ključno je za postizanje optimalne kvalitete rezanja.

Prilikom analize površine rezova dalo se primijetiti da brzina rezanja značajno utječe na kvalitetu reza. Tako možemo zaključiti da je najbolja brzina rezanja u ovom slučaju 80 cm/min, te obradak rezan tom brzinom zahtijeva minimalnu ili nikakvu dodatnu obradu u vidu brušenja srha kojeg ima tada najmanje. Srh nastao pri nižoj i višoj brzini rezanja, odnosno pri brzinama 70 cm/min i 90 cm/min, predstavlja izazov za uklanjanje te često zahtijeva dodatno brušenje. Ako je brzina rezanja prevelika, postoji rizik da plazmeni mlaz ne prođe potpuno kroz materijal. S druge strane, kod premale brzine rezanja, širina reza se povećava, a rastaljeni materijal ne ispuhuje se učinkovito plinom, nakupljajući se na dnu reza kao srh. U situaciji kada je bitnija niska hrapavost rezne površine, najbolje je birati brzinu od 70 cm/min, ali u tom slučaju treba uložiti dodatno vrijeme na brušenje srha.

## 10. Literatura

- [1] Josip Mioč: Optimizacija parametara pri rezanju plazmom; Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [2] <https://www.istockphoto.com/vector/matter-in-different-states-gm1166570995-321398356> dostupno 03.10.2023.
- [3] Matija Pintarić: Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog čelika X5CrNi8-10; Diplomski rad, Sveučilište sjever, Varaždin, 2023.
- [4] Martina Radoš: Plazma rezanje, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2016.
- [5] <https://www.difference.minaprem.com/ntm/difference-between-transferred-arc-and-non-transferred-arc-plasma-torch/> dostupno 03.10.2023.
- [6] <https://hr.sott.net/article/6877-Sto-je-plazma>: dostupno 03.10.2023.
- [7] Elvira Grginčić: Rezanje plazmom; Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [8] <https://shophr.climate-kic-proposal.org/content?c=plazma+reza%C4%8D&id=23> dostupno 04.10.2023.
- [9] <https://servus.hr/proizvodi/potrosni-dijelovi/plazma-gorionici-za-rezanje/abicut-25-zrakom-hladen/> dostupno 04.10.2023.
- [10] <https://espritautomation.com/plasma-cutting-consumables/> dostupno 04.10.2023.
- [11] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/plasma-cutting-maintenance-are-you-throwing-money-away> dostupno 04.10.2023.
- [12] <https://formanweld.en.made-in-china.com/product/MOgaHnbEvuhm/China-Plasma-Cutter-Nozzle-Tip-Plasma-Cutting-Nozzle-Electrode.html> dostupno 04.10.2023.
- [13] <https://torchmate.com/news/replacing-consumables.html> dostupno 05.10.2023.
- [14] [https://www.wermac.org/specials/plasma\\_cutting.html](https://www.wermac.org/specials/plasma_cutting.html) dostupno 05.10.2023.
- [15] Dragan Lučić: Opravdanost uvođenja plazma rezača u proizvodni proces, Diplomski rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2020.
- [16] <https://www.ho-chon.com.tw/en/equipment/56> dostupno 05.10.2023.,
- [17] <https://www.timesaversint.com/applications/heavy-slag-removal/> dostupno 05.10.2023.
- [18] <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/cuttingweldprep/troubleshooting-cnc-plasma-cutting-part-ii> dostupno 05.10.2023.
- [19] <https://directmachines.com/blog/plasma-cutting-machines-hotter-than-the-sun> 13.10.2023.
- [20] Ivana Gagula: Poboljšavanje čelika; Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2020
- [21] <https://www.taylor-hobson.com/products/surface-profilers/handheld-surtronic/surtronic-s-100-series-surface-roughness-tester> 14.01.2024.



- [22] [https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull\\_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator\\_21.02.pdf](https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator_21.02.pdf) 14.01.2024.
- [23] Tomislav Veliki: Predavanja iz kolegija Mjerenje u proizvodnji, UNIN, Varaždin, 2022.
- [24] Sanja Šolić: Predavanja iz kolegija Materijali 2, UNIN, Varaždin, 2020.

# POPIS SLIKA

<u>Slika 2.1 Agregatna stanja tvari s porastom temperature [4]</u> .....	2
<u>Slika 2.2 Nepreneseni luk [6]</u> .....	7
<u>Slika 2.3 Preneseni luk [6]</u> .....	8
<u>Slika 2.4 Pojednostavljeni prikaz plazma sustava [1]</u> .....	8
<u>Slika 2.5 Algoritam mikroprocesorskog kontrolera[1]</u> .....	9
<u>Slika 2.6 Inventorski plazma rezač proizvođača WURTH[8]</u> .....	10
<u>Slika 2.7 Gorionik za ručno rezanje[9]</u> .....	11
<u>Slika 2.8 Osnovni potrošni dijelovi plazma gorionika[11]</u> .....	11
<u>Slika 2.9 Različite vrste elektroda[12]</u> .....	12
<u>Slika 2.10 Potpuno nova unutarnja sapnica lijevo i oštećena unutarnja sapnica desno[13]</u> .....	13
<u>Slika 3.1 Standardni postupak rezanja (bez sekundarnog medija)[14]</u> .....	15
<u>Slika 3.2 Postupak podvodnog plazma rezanja[16]</u> .....	16
<u>Slika 3.3 Postupak rezanja sa sekundarnim plinom[15]</u> .....	17
<u>Slika 3.4 Postupak rezanja s injektiranom vodom[15]</u> .....	18
<u>Slika 3.5 Postupak rezanja pod zaštitom vode[15]</u> .....	18
<u>Slika 3.6 Postupak rezanja s povećanim suženjem plazmenog luka[15]</u> .....	19
<u>Slika 4.1 Prikaz reza prije uklanjanja troske [18]</u> .....	20
<u>Slika 4.2 Izrezani segmenti prije i nakon uklanjanja troske[17]</u> .....	21
<u>Slika 4.3 Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [17]</u> .....	22
<u>Slika 4.4 Tijek gibanja pištolja kod CNC upravljanog rezanja plazmom [1]</u> .....	26
<u>Slika 5.1 Stabilizacija brzine vrtloga luka [2]</u> .....	27
<u>Slika 5.2 Ionizacija plazmenog plina visokom frekvencijom [2]</u> .....	28
<u>Slika 5.3 Uspostavljanje pilot luka na radnom komadu [2]</u> .....	28
<u>Slika 5.4 Uspostavljanje probijanja i rezanja na radnom komadu [2]</u> .....	29
<u>Slika 6.1 Mehanička svojstva poboljšanog nelegiranog čelika s obzirom na sadržaj ugljika. [20]</u> .....	31

<u>Slika 7.1 Priprema uzorka za rezanje</u> .....	33
<u>Slika 7.2 Oprema za provođenje rezanja</u> .....	34
<u>Slika 7.3 Zamjenjivi dijelovi gorionika</u> .....	35
<u>Slika 7.4 Plazma uređaj</u> .....	36
<u>Slika 7.5 Promotech Rail Bull</u> .....	37
<u>Slika 7.6 Upravljačka ploča Promotech Rail Bull traktora s led zaslonom</u> .....	38
<u>Slika 7.7 Uređaj za mjerenje hrapavosti AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 100</u> .....	39
<u>Slika 7.8 Temperaturu materijala prije prvog reza</u> .....	40
<u>Slika 7.9 Provjera temperature materijala prije trećeg reza</u> .....	41
<u>Slika 7.10 Materijal nakon rezanja na tri segmeneta</u> .....	42
<u>Slika 7.11 Postupak plazma rezanja</u> .....	42
<u>Slika 7.12 Prikaz rezultata na led zaslonu uređaja nakon izmjerene hrapavosti jednog od reza</u> .....	43

## POPIS TABLICA

<u>Tablica 7.1 Kemijski sastav čelika za poboljšavanje 25CrMo4 .....</u>	29
<u>Tablica 7.2 Karakteristike plazma uređaja.....</u>	37
<u>Tablica 7.3 Prikaz parametara rezanja .....</u>	40
<u>Tablica 8.1 Rezultati mjerenja hrapavosti.....</u>	45



### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički 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, LEON ŠAVORA (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom VTJECAS PARAMETARA OBRANE NA ADAPATIVOSTI REŠNE PLOŠNE IRI PLAZMA POČANJU ČELIKA ZSCrMo4 (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Leon Šavora  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.