

# Automatizirano plazma rezanje lima bakra Cu-ETP pomoću komprimiranog zraka

---

**Makovec, Dino**

**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:122:360079>

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

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



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 089/STR/2023**

**Automatizirano plazma rezanje lima bakra Cu-ETP pomoću  
komprimiranog zraka**

**Dino Makovec, 2100/336**





**Sveučilište  
Sjever**

**Odjel za Strojtarstvo**

**Diplomski rad br. 089/STR/2023**

**Automatizirano plazma rezanje lima bakra Cu-ETP pomoću  
komprimiranog zraka**

**Student**

Dino Makovec, 2100/336

**Mentor**

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

Varaždin, rujan 2023. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Dino Makovec

JMBAG 0336021076

DATUM 30.08.2023.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Automatizirano plazma rezanje lima bakra Cu-ETP pomoću komprimiranog zraka

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Automated air plasma cutting of Cu-ETP sheets

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

### ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva
- doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
- doc. dr. sc. Jasna Leder Horina, član povjerenstva
- doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenski član
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 089/STR/2023

### OPIS

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

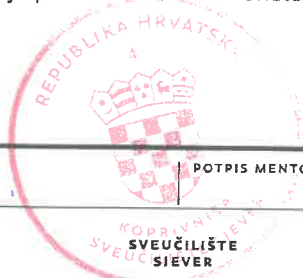
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim plazma rezanjem rezati lim bakra Cu-ETP 3 mm debljine uz promjenu utjecajnih parametara prema izrađenom planu eksperimenta. Na izrezanim uzorcima izmjeriti hrapavost na površini reza te vizualnim pregledom ocijeniti kvalitetu reza. Na izrezanim uzorcima također je potrebno izmjeriti vlačnu čvrstoću materijala uz samu rub reza. 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

30.08.2023.

POTPIS MENTORA

M. Bušić



## **Predgovor**

*Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na pomoći, utrošenom vremenu, savjetima, prenesenom znanju i predloženoj temi ovog diplomskog rada.*

*Od srca se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i velikoj podršci koju su mi pružali tijekom izrade ovoga rada i za vrijeme cijelog razdoblja studiranja.*

*Dino Makovec*

## Sažetak

Prvi dio teorijskog dijela rada govori o tehnologiji plazma rezanja. Spomenuta je povijest plazma rezanja, princip rada, plazmeni plinovi, primjene u industrijskim granama, prednosti i nedostaci postupaka, postupci plazma rezanja i vrste industrijskih automatizacija rezanja plazmom. Opisan je proces plazma rezanja od uključenja struje do izlaska plazmenog mlaza prema radnom komadu. Opisuju se postupci plazma rezanja te njihov način rada, prednosti i nedostaci, vrste materijala rezanja, brzine rezanja i debljine rezanja materijala. Definirane su značajke korištenja određenih plinova kako bi odabir odgovarajućeg bio što bolji. Opisani su plazma rezači i sigurnosne mjere koje je potrebno ispuniti pri korištenju. U eksperimentalnom dijelu rada rezao se bakar plazma rezačem koji radi pomoću komprimiranog zraka te je opisan odabir plazma rezača, odabir kompresora i prednosti i nedostaci plazma rezanja pomoću komprimiranog zraka. Na kraju teorijskog dijela, opisan je bakar kao materijal.

U eksperimentalnom dijelu izvršeno je rezanje te je mjerena hrapavost i ispitivala vlačna čvrstoća. Opisana je oprema koja se koristila kod rezanja bakra lima 3 mm. Različiti parametri brzine i jakosti struje kod rezanja bakra pokazuju različitost rezova dobivenih uzoraka. Uzorci su nakon plazma rezanja obrađeni strojnom obradom glodanja kako bi se dobili uzorci odgovarajućih oblika i dimenzija. Izmjerena je hrapavost svakog reza uzroka te su uzorci kasnije ispitani na kidalici, gdje je izmjerena vlačna čvrstoća materijala pored mjesta rezanja. Donesen je zaključak na temelju dobivenih rezultata.

**Ključne riječi:** plazma, brzina rezanja, jakost struje, plazmeni plinovi, plazma rezač, bakar, hrapavost, vlačna čvrstoća, uzorci, kidalica

## Abstract

The first part of the theoretical section of the paper discusses plasma cutting technology. It mentions the history of plasma cutting, the working principle, plasma gases, applications in industrial sectors, advantages and disadvantages of the processes, plasma cutting procedures, and types of industrial plasma cutting automation. The process of plasma cutting is described from the activation of the current to the emergence of the plasma jet towards the workpiece. The plasma cutting procedures are described along with their modes of operation, advantages and disadvantages, types of cutting materials, cutting speeds, and material thicknesses. The characteristics of using specific gases are defined to improve the selection process. Plasma cutters are described, and safety measures to be followed during usage are outlined. In the experimental part of the study, copper was cut using a plasma cutter operating with compressed air. The selection of the plasma cutter, compressor choice, and the pros and cons of plasma cutting with compressed air are described. Towards the end of the theoretical section, copper is described as a material.

In the experimental section, cutting was performed, and roughness was measured while tensile strength was tested. The equipment used for cutting 3mm copper sheet is described. Different parameters of speed and current intensity for cutting copper yield variations in the obtained samples. After plasma cutting, the samples were subjected to milling machining to achieve desired shapes and dimensions. The roughness of each cut sample was measured, and the samples were later tested on a tensile testing machine, where the tensile strength of the material adjacent to the cutting area was measured. A conclusion was drawn based on the obtained results.

**Keywords:** plasma, cutting speed, current intensity, plasma gases, plasma cutter, copper, roughness, tensile strength, samples, tensile testing machine



## Popis korištenih kratica

<b>Cu</b>	bakar
<b>AC-DC</b>	Izmjenična struja - istosmjerna struja
<b>CNC</b>	Računalno numeričko upravljanje (Computer numerical control)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Ugljikov dioksid
<b>ISO</b>	Međunarodna organizacija za standardizaciju (International Organization for Standardization)
<b>S<sub>0</sub></b>	Površina početnog poprečnog presjeka
<b>E</b>	Modul elastičnosti
<b>R<sub>p0,2</sub></b>	Konvencionalna ili tehnička granica razvlačenja
<b>F<sub>max</sub></b>	Maksimalna sila
<b>R<sub>m</sub></b>	Vlačna čvrstoća
<b>a<sub>0</sub></b>	Debljina epruvete
<b>b<sub>0</sub></b>	Širina epruvete
<b>L<sub>c</sub></b>	Stvarna duljina epruvete
<b>L<sub>0</sub></b>	Početna mjerna duljina epruvete
<b>L<sub>t</sub></b>	Ukupna duljina epruvete
<b>L<sub>u</sub></b>	Konačna mjerna duljina nakon loma
<b>S<sub>0</sub></b>	Početni poprečni presjek epruvete

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Plazma rezanje .....	4
2.1.	Proces plazma rezanja.....	5
2.2.	Postupci plazma rezanja.....	8
2.2.1.	Suhi postupak plazma rezanja.....	8
2.2.2.	Postupak plazma rezanja sa sekundarnim plinom ( dualni tok ).....	8
2.2.3.	Plazma rezanje s vodenom zaštitom .....	9
2.2.4.	Plazma rezanje ubrizgavanjem vode.....	10
2.2.5.	Plazma rezanje ispod vode.....	11
2.2.6.	Plazma rezanje visoke tolerancije .....	12
2.3.	Odabir plina plazma rezanja .....	13
2.3.1.	Komprimirani zrak.....	14
2.3.2.	Kisik.....	15
2.3.3.	Dušik.....	15
2.3.4.	Argon - vodik.....	16
2.4.	Plazma rezač .....	16
2.5.	Neprikladnosti kod rezanja plazmom .....	19
2.6.	Sigurnost kod plazma rezanja .....	20
2.7.	Primjene plazma rezanja u različitim granama industrije .....	21
3.	Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka.....	23
3.1.	Odabir plazma rezača koji radi pomoću komprimiranog zraka .....	24
3.2.	Odabir kompresora plazma rezača.....	25
3.3.	Prednosti i nedostaci plazma rezanja pomoću komprimiranog zraka.....	26
4.	Bakar.....	27
5.	Ekperimentalni dio – Plazma rezanje Cu-ETP bakar .....	30
5.1.	Materijal za ispitivanje.....	30
5.2.	Priprema ispitnih uzoraka .....	31
5.3.	Oprema korištena za provođenje eksperimenta .....	31
5.3.1.	Hypertherm Powermax30® AIR .....	31
5.3.2.	Uređaj za automatizirano pravocrtno pomicanje gorionika .....	33
5.3.3.	AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116.....	35
5.3.4.	INSPEKT Blue 20.....	35
5.4.	Izrada ispitnih uzoraka.....	37

5.5. Priprema uzoraka za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala.....	41
5.6. Mjerenje hrapavosti površine.....	43
5.7. Ispitivanje vlačne čvrstoće.....	45
6. Zaključak.....	48
7. Literatura.....	50
Popis slika.....	53
Popis tablica.....	55

# 1. Uvod

Plazma rezanje (slika 1.1.) je proces kojim se režu električno vodljivi materijali pomoću ubrzanog mlaza vruće plazme na temperaturama iznad 20 000°C. Tipični materijali koji se režu plazmom uključuju ugljični čelik, nehrđajući čelik, aluminij, mjed i bakar, iako se mogu rezati i drugi vodljivi metali. Rezanje plazmom često se koristi u industrijskoj proizvodnji, industriji automobila, brodogradnji, avio industriji, građevinarstvu i umjetničkim primjenama u metalu. Plazma rezanje je učinkovita metoda rezanja tankih i debelih materijala podjednako, s većom preciznošću i brzinom od mnogih drugih metoda rezanja [1].

Proces rezanja plazmom funkcionira stvaranjem električnog luka između materijala koji se reže i plazma rezača, koji ionizira plin koji teče kroz plamenik. Ionizirani plin ili plazma postaju dovoljno vrući da rastale metal i otpuhnu ga dalje od reza. Plazma rezač uključuje plamenik i izvor energije koji stvara električni luk i kontrolira protok plazme [1].

Plazma plinovi su obično argon, argon/vodik ili dušik. Ovi inertni plinovi mogu se zamijeniti zrakom, ali to zahtijeva posebnu elektrodu od hafnija ili cirkonija. Upotreba komprimiranog zraka čini ovu varijantu plazma procesa vrlo konkurentnom postupku s kisikom za rezanje nehrđajućih čelika debljine do 20 mm. Inertni plinovi su poželjni za visokokvalitetne rezove u reaktivnim legurama [2].



*Slika 1.1. CNC Plazma rezanje [3]*

Rezanje plazmom ima mnoge prednosti i može biti vrlo korisno u mnogim primjenama.

Glavne prednosti plazma rezanja:

- relativno jeftino za rezove srednje debljine
- visokokvalitetno rezanje za debljine do 50 mm
- maksimalna debljina 150 mm
- može se provoditi na svim vodljivim materijalima
- najučinkovitiji način rezanja nehrđajućeg čelika i aluminija srednje debljine
- CNC plazma rezanje može ponuditi izvrsnu preciznost i ponovljivost
- može se izvesti u vodi što rezultira manjim zonama utjecaja topline kao i smanjenjem razine buke
- mogu se rezati složeniji oblici zbog visoke razine točnosti. Plazma rezanje rezultira minimalnom troškom jer se sam proces oslobađa viška materijala, što znači da je potrebno vrlo malo dorade
- ne dovodi do savijanja jer velika brzina značajno smanjuje prijenos topline.

Glavni nedostaci plazma rezanja:

- rezanje plazmom rezultira mnogo većom zonom utjecaja topline nego lasersko rezanje (međutim, kao što je prethodno spomenuto, to se može ublažiti rezanjem u vodi)
- kod tanjih ploča kvaliteta nije tako dobra kao kod laserskog rezanja
- ne može rezati debljine tako velike kao rezanje vodenim mlazom ili plinsko rezanje
- buka koju stvara plazma rezanje može biti prilično glasna, što dovodi do oštećenja sluha radnika ako ne nose odgovarajuću zaštitu za uši
- mlaz ioniziranog plina velike brzine koji se koristi za rezanje metala može biti izuzetno vruć i može izazvati ozbiljne opekline kod nepažnje [3].

Postupci plazma rezanja razvijaju se godinama kako bi se postigla što veća brzina, kvaliteta reza, veći izbor rezanja različitih materijala, rezanje većih debljina materijala, ograničenost primjene. Postoje više postupaka plazma rezanja:

- suhi postupak rezanja
- postupak plazma rezanja sa sekundarni plinom ( dualni tok )
- plazma rezanje s vodenom zaštitom
- plazma rezanje ubrizgavanjem vode
- plazma rezanje ispod vode
- plazma rezanje visoke tolerancije
- plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka.

Industrijska automatizacija rezanja plazmom je tehnologija koja je revolucionirala industriju obrade metala. Postoji nekoliko vrsta:

- ručno plazma rezanje
- automatizirano plazma rezanje
- CNC plazma rezanje
- plazma rezanje robotom.

Plazma rezač uključuje potrošne komponente kao što su elektrode, sapnice i vrtložni prstenovi, koji se moraju povremeno mijenjati kako bi se održala kvaliteta rezanja i dugovječnost rezača.

## 2. Plazma rezanje

Plazma se često naziva četvrtim agregatnim stanjem i slična je fluidu. Plazma se sastoji od neutralnih i električno nabijenih čestica. Plazmu je formirao vrući ionizirani plin. Ovaj postupak rezanja se temelji isključivo na vanjskoj energiji, odnosno na toplinskoj energiji plazme koja tali metalni radni komad. Mlaz plinova izbacuje nastalu talinu koja se koristi za stvaranje plazme. Rezanje plazmom je prvi put primijenjeno 1950-ih godina, a suhi postupak je započeo 1957. godine (slika 2.1.). Suhi postupak je koristio skupocjene mješavine argona i vodika, koje su prolazile pored volframove elektrode. Plin se sabijao kroz sapnicu kako bi se stvorila plazma [4]. Plazma rezači korišteni u to doba bili su nepredvidivi i nedostajala im je preciznost prisutna u modernim rezačima. Također, korištene elektrode i sapnice brzo su se pokvarile zbog topline nastale tijekom procesa. Mijenjanje sapnica i elektroda često je činilo rezanje plazmom skupim u ovo doba.

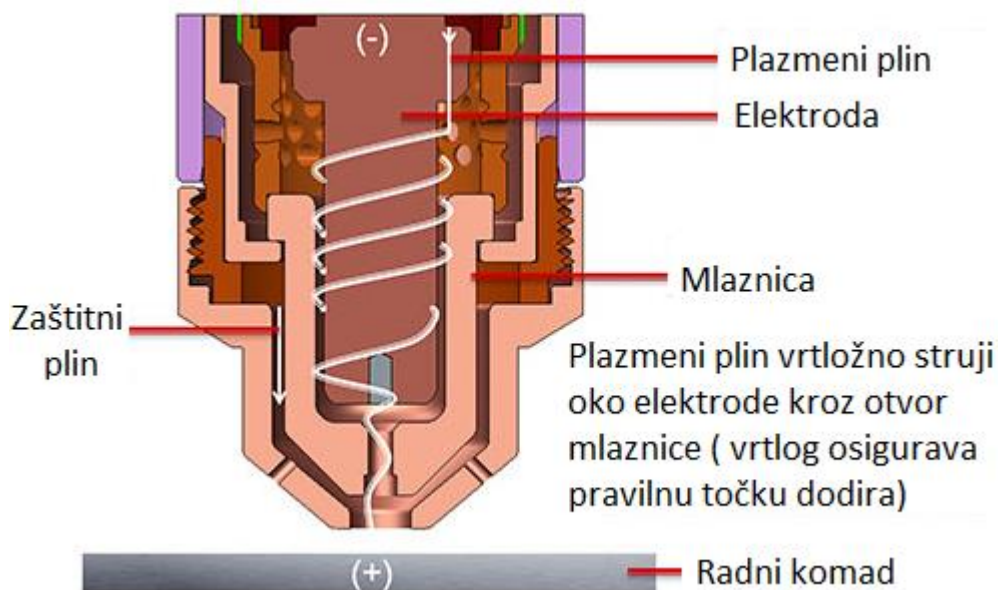


*Slika 2.1. Radnik s plazma opremom 1957. godine [5]*

Nakon laserskog rezanja, plazma rezanje metala je druga najčešća metoda rezanja metala. Iako postoje sličnosti s laserskim rezanjem, proces plazma rezanja ima značajne razlike. Plazma rezanje je iznimno popularno u različitim radionicama zbog svoje učinkovitosti i jednostavnosti primjene, uz osiguravanje zadovoljavajuće kvalitete reza. Zahvaljujući kombinaciji plazma rezača i CNC tehnologije, moguće je izvesti čak i najzahtjevnije rezove, što otvara vrata za široku primjenu u različitim industrijskim sektorima.

## 2.1. Proces plazma rezanja

Unutar plazma pištolja, elektroda i unutarnja sapnica nisu fizički povezani, već su odvojeni vrtložnim prstenom koji ima male otvore za odušak. Ti otvori omogućavaju pretvaranje plazma plina u plazma vrtlog unutar pištolja. Između unutarnje i vanjske sapnice nalazi se prostor kroz koji protječe zaštitni plin. Kada se uključi električni tok, napon protječe. Plin počinje protjecati kroz crijevo koje je postavljeno na pištolju (slika 2.2.). Privremeno, sapnica je spojena na pozitivni pol izvora struje, dok je elektroda spojena na negativni pol.

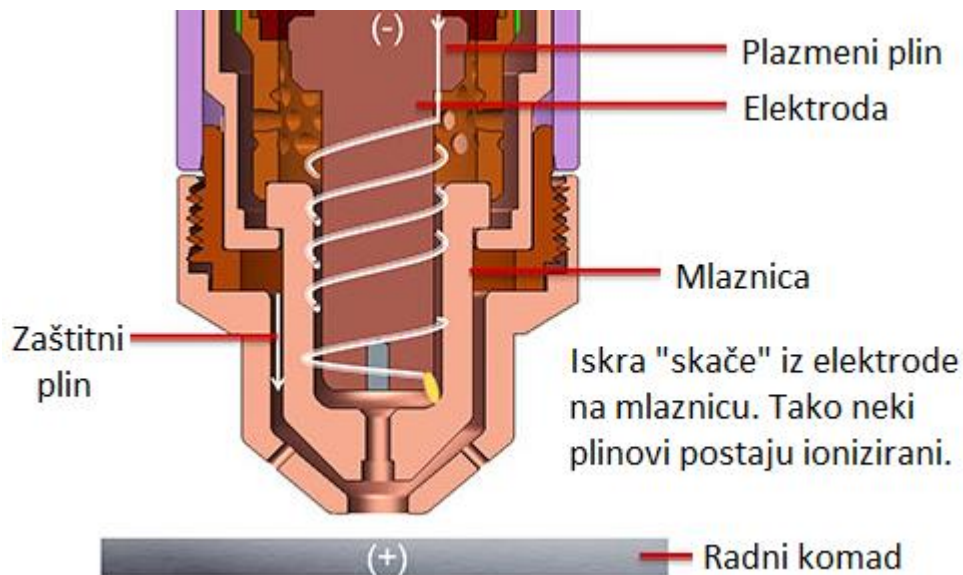


Slika 2.2. Početak plazma rezanja [6]

Zatim se iz konzole za pokretanje luka generira iskra visoke frekvencije koja uzrokuje da plazma plin postane ioniziran i električki vodljiv (slika 2.3.), što rezultira strujni put od elektrode do sapnice, te se stvara pilot luk plazme.

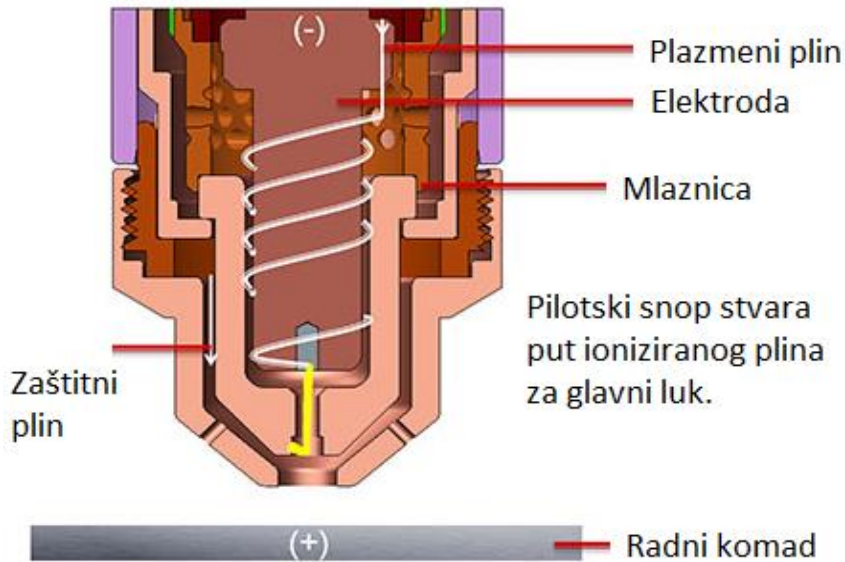
Pilotski snop je pomoćni luk koji se koristi u postupku rezanja i aktivira se prije glavnog luka. Kada se pilotski luk upali, zrak postaje ioniziran i postaje provodljiv, stvarajući tako provodljivu vezu s materijalom. Ova veza omogućuje beskontaktno paljenje glavnog luka. Isto tako, kao nuspojava, pilotski snop sagorijeva neprovodne nečistoće prisutne na materijalu, kao što su boja, hrđa, itd. Ovaj proces čisti površinu materijala prije glavnog rezanja.





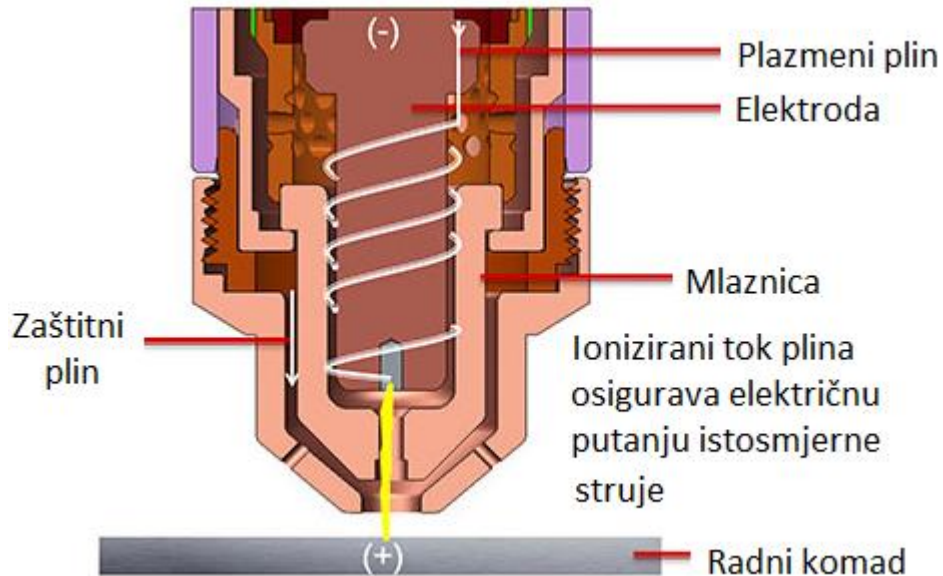
Slika 2.3. Ionizacija plazmenog plina [6]

Nakon dolaska pilot luka komadom (koji je uzemljen preko stola za rezanje), struja se prenosi s elektrode na radni komad. U isto vrijeme, visoka frekvencija se isključuje i otvara se pilot luk (slika 2.4.).



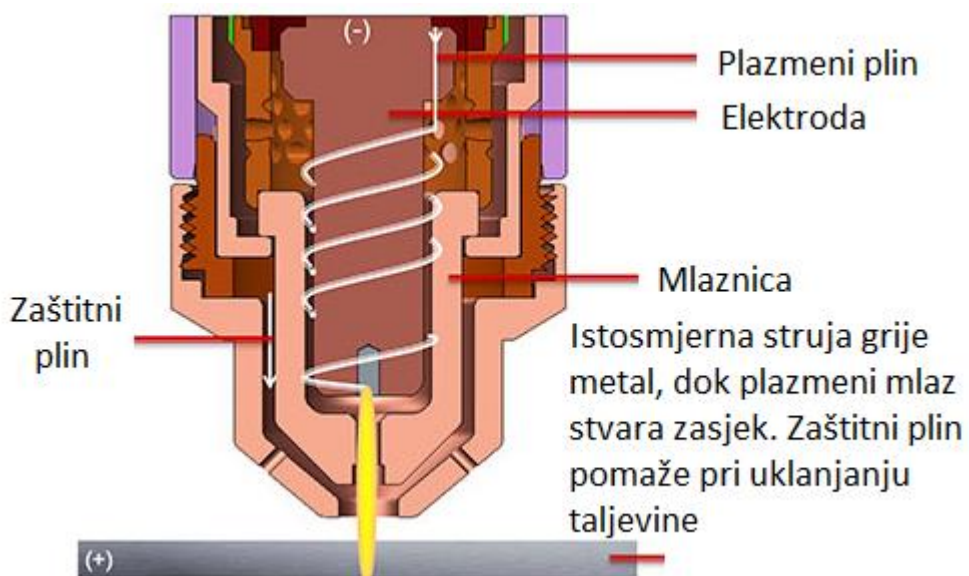
Slika 2.4. Stvaranje glavnog luka iz pilot luka [6]

Napajanje tada pojačava istosmjernu struju do amperaže rezanja koju je odabrao operater i zamjenjuje prethodni plin s optimalnim plazma plinom za materijal koji se reže. Također se koristi sekundarni zaštitni plin koji struji izvan kroz vanjsku sapnicu. (slika 2.5.).



Slika 2.5. Putanja plazmenog mlaza do radnog komada [6]

Oblik zaštitnog poklopca i promjer njegovog otvora prisiljavaju zaštitni plin da dodatno suzi plazma luk, što rezultira čistim rezom s vrlo niskim kutovima zakošenja i manjim zarezom. (slika 2.6.)



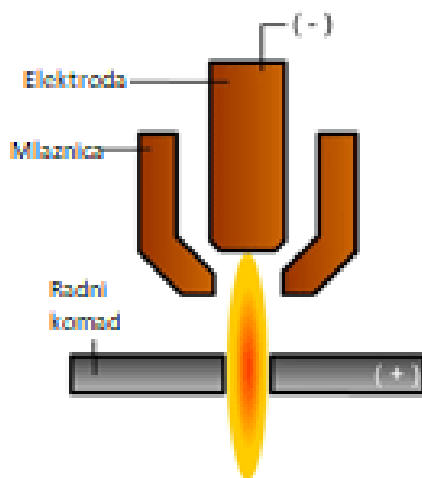
Slika 2.6. Plazma rezanje [6]

## 2.2. Postupci plazma rezanja

Svaki postupak plazma rezanja ima svoje specifične karakteristike i prednosti, koje ovise o materijalu koji se reže, debljini metala i drugim faktorima. Kao takvi, odabir odgovarajućeg postupka plazma rezanja ključan je za postizanje najboljih rezultata i osiguravanje sigurnosti pri radu s opremom. Postoje različiti postupci plazma rezanja.

### 2.2.1. Suhi postupak plazma rezanja

Početak rezanja plazmom datira iz 1950-ih godina, no suhi postupak se počeo primjenjivati od 1957. godine (slika 2.7.). Ovaj suhi postupak koristio je skupocjene mješavine argona i vodika, koje su prolazile pokraj volframove elektrode, a kroz sapnicu se sabijao plin. Negativna katoda bila je volframova elektroda, a pozitivna anoda bio je radni komad. Pištolj za rezanje trebao se postaviti što bliže radnom predmetu. Međutim, postojao je nedostatak u obliku skošenja i zaobljenja rubova reza, zbog rasipanja toplinske energije na vrhu električnog luka. Ovom metodom rezali su se obično limovi od 50 mm [7].



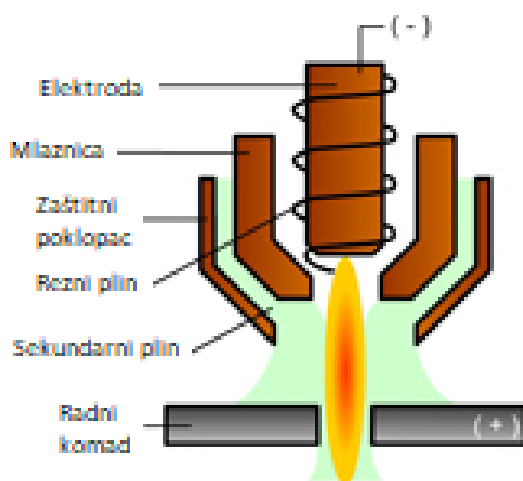
Slika 2.7. Suhi postupak rezanja plazmom [8]

### 2.2.2. Postupak plazma rezanja sa sekundarnim plinom ( dualni tok )

Pri rezanju plazmom koristi se kombinacija dva plina (slika 2.8.): jedan za stvaranje plazme i drugi kao zaštitni plin. Zaštitni plin se koristi kako bi se zaštitila zona rezanja od atmosfere, što rezultira čistim rubom reza. Ova varijanta rezanja je vrlo popularna jer omogućuje upotrebu različitih kombinacija plinova kako bi se postigla optimalna kvaliteta reza [8].

Godine 1962. počinje primjena postupka rezanja. Sekundarni plin pokriva područje rezanja i poboljšava kvalitetu i brzinu rezanja, dok istovremeno hladi sapnicu i keramičku zaštitu. Kao primarni plin za rezanje se koristi dušik, dok se sekundarni plin odabire ovisno o materijalu koji se reže (kisik, ugljični dioksid, argon/vodik). Za niskougljične čelike brzina rezanja je bolja od nehrđajućih čelika i aluminija [7].

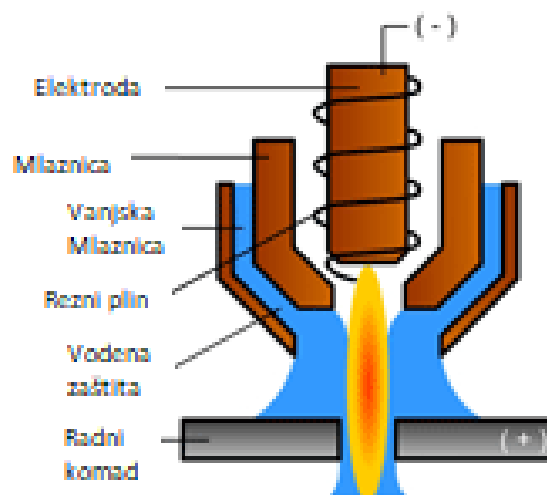
Pored sapnice plazma pištolja nalazi se dodatna sapnica koja služi za dovod rotirajućeg plina. Takav rotirajući plin ima ulogu zaštite plazmenog plina od vanjskog okruženja. Rotirajući plin i bez potencijalna sapnica osiguravaju zaštitu sapnice od rasprskavanja rastaljenog metala koje se javlja tijekom bušenja lima. Kod određenih debljina lima, bušenje se izvodi dok pištolj miruje, što omogućuje rezanje malih kontura bez potrebe za početnim rezom. Rotirajući plin sprječava ulazak okolnog zraka u interakciju između plazmenog mlaza i rastopljenog metala u zoni reza. To je posebno važno kod rezanja visokolegiranih čelika, jer inače dolazi do reakcije kisika prisutnog u zraku s površinom reza te rezultira oksidacijom i često zahtijeva dodatnu obradu uklanjanja nastalih oksida. Korištenje dušika kao rotirajućeg plina je neophodno za rezanje bez srha limove visokolegiranih čelika debljine do 20 mm [9].



Slika 2.8. Postupak plazma rezanja sekundarnim plinom [8]

### 2.2.3. Plazma rezanje s vodenom zaštitom

1965. godine je započelo primjenjivanje plazma rezanje s vodenom zaštitom (slika 2.9.). Plazma rezanje s vodenom zaštitom je varijanta dvojnog plinskog procesa gdje je zaštitni plin zamijenjen vodom. Hlađenje vodom poboljšalo je vijek sapnice zajedno s poboljšanom kvalitetom rezanja na nehrđajućem čeliku [8].

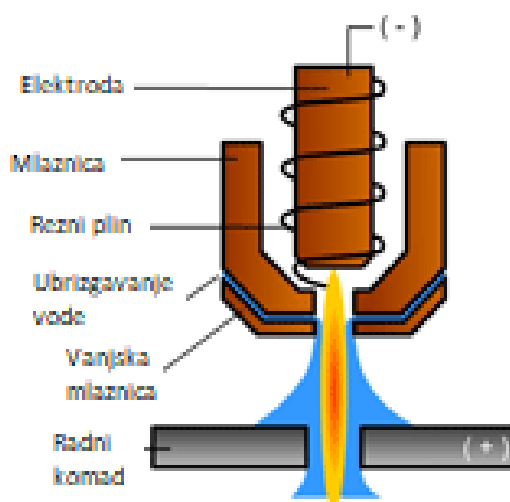


Slika 2.9. Plazma rezanje s vodenom zaštitom [8]

#### 2.2.4. Plazma rezanje ubrizgavanjem vode

Od 1968. započinje plazma rezanje ubrizgavanjem vode (slika 2.10.). Ovim postupkom za sve rezove metala koristi se plin dušik. Kvaliteta reza je za sve metale jednaka, što čini ovaj postupak isplativim i jednostavnijim za upotrebu. Ovaj postupak se izvodi isključivo s dualnim lukom zbog zaštitnih svojstava sloja vodene pare. Zahvaljujući tim svojstvima, moguće je koristiti keramički materijal za cijeli donji dio sapnice [7].

Postupak koristi 260-750 A za postizanje optimalne kvalitete rubova za mnoge materijale i debljine.



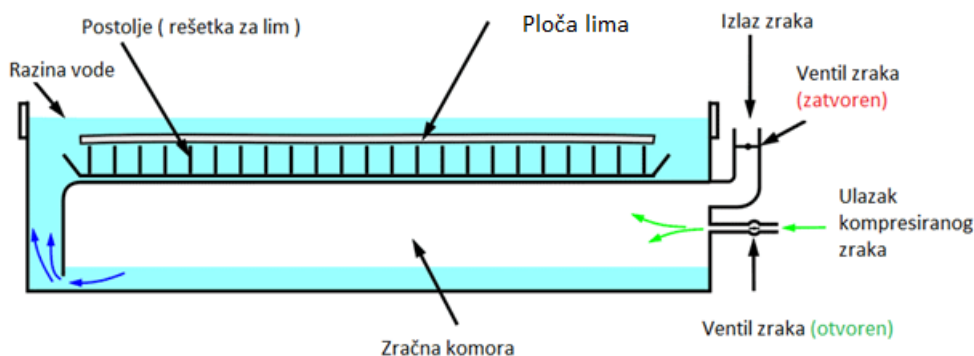
Slika 2.10. Plazma rezanje ubrizgavanjem vode [8]

## 2.2.5. Plazma rezanje ispod vode

Plazma rezanje ispod vode razvio se 1977. godine. Postalo je vrlo popularno jer koristi jakost struje iznad 100 A. Vodeni stol sastoji se od spremnika vode smještenog ispod površine za rezanje. Iznad spremnika nalazi se nekoliko okomitih metalnih šipki koje se nazivaju letvicama. Ove šipke podupiru materijal tijekom rezanja. Vodena podloga je jeftinija za kupnju i ne zahtijeva sakupljač prašine (u većini područja). Smanjuje buku, eliminira opasno bljeskanje luka, smanjuje toplinsko izobličenje i održava dijelove hladnima. Iako je to starija tehnologija, znatan broj velikih portalnih CNC plazma i strojeva za rezanje s kisikom još uvijek se prodaje s vodenim stolom.

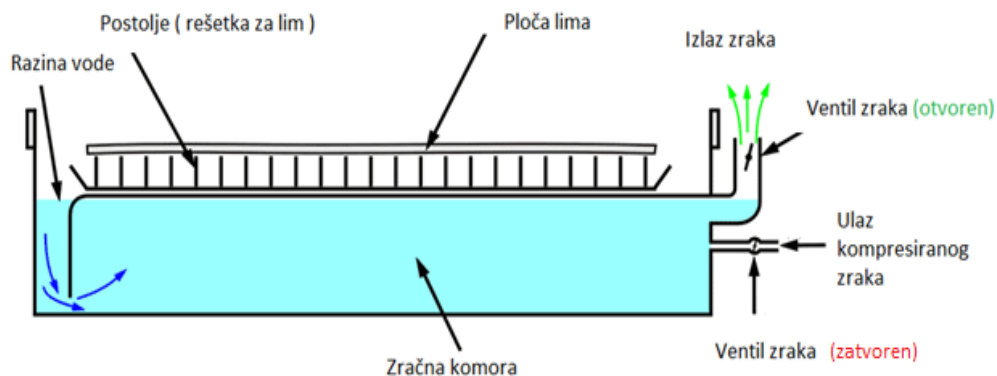
Konstrukcija stola je prilično jednostavna; velika komora ugrađena je u stol, ispod metalnih šipki i čeličnog pladnja. Komora ima samo otvore unutar vodenog stola uz donji rub, tako da zrak može biti zarobljen unutra (slika 2.11). Zatim se stavljanjem zraka u komoru ili ispuštanjem zraka iz komore voda u stolu potiskuje gore ili dolje.

Kontrola razine vode ima ventil za dovod zraka i ventil za ispuštanje zraka, koji kontroliraju komprimirani zrak koji ulazi u komoru i izlazi iz nje. Ovi ventili mogu biti jednostavni kuglasti ventili kojima se upravlja ručno ili mogu biti elektromagnetski ventili kojima upravlja CNC.



Slika 2.11. Zračna komora vodenog plazma stola ispunjena zrakom [10]

Za podizanje vode u stolu, ventil za otpuštanje se zatvara, a zatim se otvara dovodni ventil. Komprimirani zrak gura se u komoru, tjerajući vodu van kroz otvore duž dna komore, što rezultira podizanjem razine vode (slika 2.12.). Nakon što voda dosegne željenu razinu, ventil za dovod zraka se zatvara, a ventil za ispuštanje zraka ostaje zatvoren, zadržavajući zrak u komori tako da razina vode ostane visoka.

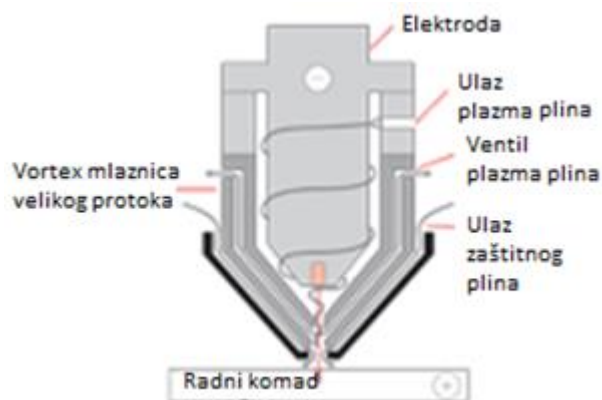


Slika 2.12. Zračna komora vodenog plazma stola ispunjena zrakom [10]

Za snižavanje razine vode, otpuštajući ventil se otvara dok dovodni ventil ostaje zatvoren, dopuštajući zraku da izađe iz komore. Težina vode uzrokuje da ona teče natrag u komoru, gurajući zrak van kroz ispušni otvor [10].

## 2.2.6. Plazma rezanje visoke tolerancije

Plazma rezanje s modernom opremom koristi sužen plazmeni luk za rezanje. Ovaj postupak rezanja rezultira gotovo okomitom površinom reza za materijale debljine od 0,8 mm do 8 mm, što znači da naknadna obrada nije potrebna. Precizno plazma rezanje (slika 2.13.) se ističe visokom kvalitetom reza, izuzetnom preciznošću i dugim vijekom trajanja potrošnih materijala poput sapnice. Isto tako, ovom metodom moguće je održavati toleranciju radnog komada unutar granica od  $\pm 0,2$  mm [7].



Slika 2.13. Plazma rezanje visoke tolerancije [8]

### 2.3. Odabir plina plazma rezanja

Plazma rezanje je tehnika koja se koristi za precizno rezanje različitih materijala poput čelika, aluminijsa, bakra, mesinga i drugih. U ovom procesu, plazma se generira stvaranjem električnog luka između elektrode i radnog komada. Ključni faktor za postizanje visokokvalitetnog reza i maksimalne učinkovitosti procesa je odabir odgovarajućeg plina za plazma rezanje. Izbor plina ovisi o vrsti materijala koji se reže, debljini materijala, brzini rezanja, željenom kvalitetu površine i drugim faktorima. Važno je pravilno odabrati plin ( tablica 1. ) kako bi se osigurali najbolje rezultate rezanja. Pravilan odabir plina za plazma rezanje je ključ za postizanje optimalnih rezultata, smanjenje troškova i povećanje produktivnosti.

Tablica 1. Odabir odgovarajućeg plina plazma rezanja za određeni materijal [11]

<b>Plazma plin i zaštitni plin</b>	<b>Ugljični čelik</b>	<b>Nehrđajući čelik</b>	<b>Aluminij</b>
<b>Zrak i zrak</b>	Dobra kvaliteta rezanja Veća brzina rezanja Ekonomičan	Dobra kvaliteta rezanja Veća brzina rezanja Ekonomičan	Dobra kvaliteta rezanja Veća brzina rezanja Ekonomičan
<b>Kisik i zrak</b>	Dobra kvaliteta rezanja Veća brzina rezanja Vrlo malo troske	Ne preporuča se	Ne preporuča se
<b>Dušik i zrak</b>	Malo troske Dobra kvaliteta rezanja Dugi vijek trajanja dijelova	Dugi vijek trajanja dijelova Dobra kvaliteta rezanja	Dugi vijek trajanja dijelova Odlična kvaliteta rezanja
<b>Dušik i CO<sub>2</sub></b>	Malo troske Dobra kvaliteta rezanja Dugi vijek trajanja dijelova	Dugi vijek trajanja dijelova Dobra kvaliteta rezanja	Dugi vijek trajanja dijelova Dobra kvaliteta rezanja
<b>Dušik i voda</b>	Dugi vijek trajanja dijelova Dobra kvaliteta rezanja	Odlična kvaliteta rezanja Dugi vijek trajanja dijelova	Odlična kvaliteta rezanja Dugi vijek trajanja dijelova
<b>Argon-vodik i voda</b>	Ne preporuča se	Najbolji za debljine >12 mm	Najbolji za debljine >12 mm



Kada je u pitanju rezanje plazmom, opća kvaliteta rezanja ne ovisi samo o stručnosti operatera, već i o vrsti plina koji se koristi. Ovo su četiri najčešća plina koji se koriste:

### 2.3.1. Komprimirani zrak

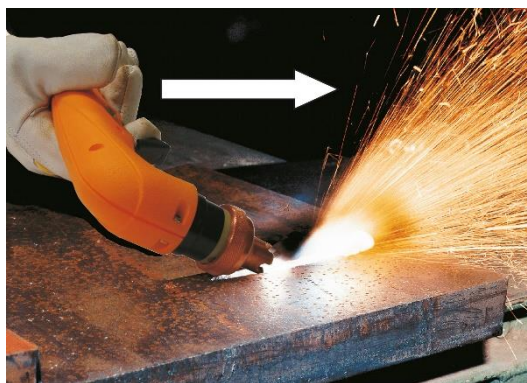
To je najsvestraniji od svih plazma plinova uobičajenih za rezanje slabom strujom, koji proizvodi rezove vrhunske kvalitete na niskougličnom i nehrđajućem čeliku, te aluminiju. Komprimirani zrak pokazao se kao ekonomičan izbor budući da je zrak slobodno dostupan. Potreban je zaseban zračni kompresor za pokretanje ovog sustava ili plazma rezač već s ugrađenim kompresorom. Međutim, i dalje je potrebno ukloniti sve čestice prašine ili vlage, što dovodi do povećanja troškova. Najčešće se koristi za rezanje metala debljine do 25 mm. Zrak je dobra opcija za mnoge tvrtke zbog svoje svestranosti, dobre brzine, niske razine troske i vijeka trajanja dijelova.

Prednosti:

- ekonomičnost
- mogućnost dubljenja (žlijebljenja) (slika 2.14.).

Nedostaci:

- ostavlja oksidirano područje reza što utječe na zavarljivost
- može doći do oksidacije i nitriranja površine reza, što uzrokuje poroznost u zavarima (isto možemo eliminirati korištenjem visokokvalitetne žice za zavarivanje s denitrifikatorima i deoksidansima)
- zahtjeva kompresor zraka [11].



*Slika 2.14. Plazma dubljenje (žlijebljenje) [12]*

### **2.3.2. Kisik**

Korištenje kisika nudi najveću brzinu rezanja u usporedbi s bilo kojim drugim plazma plinom, dok istovremeno nudi najbolju kvalitetu rezanja. Ovaj je plin prikladan za ugljični čelik debljine do 30 mm gdje su potrebni najkvalitetniji rezovi. Pri korištenju kisika, zrak djeluje kao zaštitni plin. Kisik se također može koristiti na nehrđajućem čeliku i aluminiju, ali daje grublju reznu površinu.

Prednosti:

- najveća brzina rezanja
- najbolja kvaliteta rezanja niskougljičnog čelika.

Nedostaci:

- kisik je skup
- ne djeluje na sjajnim površinama, što ga čini neučinkovitim na projektima od nehrđajućeg čelika i aluminija
- životni vijek potrošnih dijelova je kratak [11].

### **2.3.3. Dušik**

Dušik je najprikladniji za visoko-strujne plazma rezače. Nudi izvrsnu kvalitetu rezanja za niskougljični i nehrđajući čelik ili aluminij debljine do 75 mm. Dušik se obično koristi kao stabilizator s argonom kako bi se dodalo djelovanje vlaženja zavarenog spoja uz smanjenje troškova. Plazma s dušikom radi vrlo dobro s CO<sub>2</sub> kao sekundarnim plinom za bolju brzinu rezanja i produljeni vijek trajanja dijelova u usporedbi sa zrakom.

Prednosti:

- izvrsna kvaliteta rezanja aluminija i visokolegiranog čelika
- dugi životni vijek dijelova.

Nedostaci:

- lošija kvaliteta reza kod ugljičnih čelika jer dolazi do nitracije rezne površine
- dušik je skup [11].

#### **2.3.4. Argon - vodik**

Za rezanje nehrđajućeg čelika i aluminija često se koristi specifična mješavina plina. Argon-odik mješavina je popularan izbor jer proizvodi čist i ravnomjeran rez te vrlo glatku površinu na nehrđajućem čeliku. Optimalan omjer ovog plina za postizanje najboljih rezultata je 65% argona i 35% vodika. Ova dobro izbalansirana kombinacija osigurava optimalne uvjete za rezanje i visokokvalitetne rezultate. Postižu se gotovo savršeni i čisti rezovi. Iz tog razloga se ne preporučuje rezanje niskougljičnog čelika. Pogodan je za rezanje bilo kojeg materijala debljine većeg od 75 mm. Kao oblik protumjere, dušik se koristi kao zaštitni plin s argon-odikom.

Prednosti:

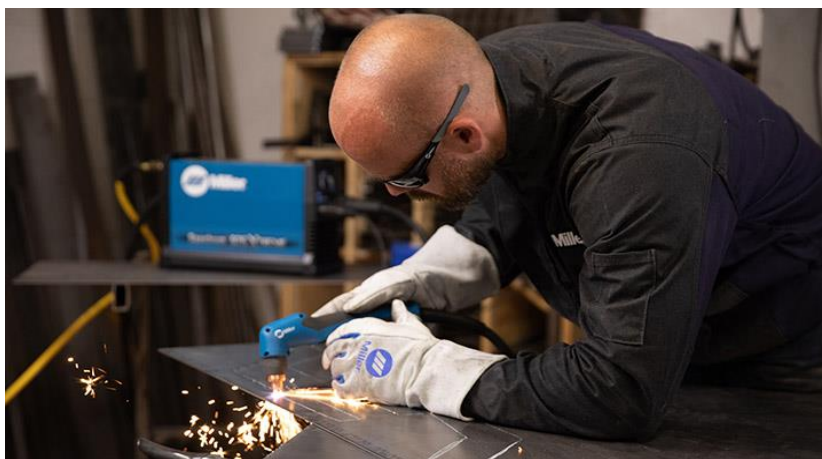
- proizvodi plazmu najveće temperature
- može se koristiti za žlijebljenje bilo kojeg materijala

Nedostaci:

- nije ekonomičan [11]

#### **2.4. Plazma rezač**

Plazma rezač je tehnološki napredni stroj koji se koristi za rezanje metala i drugih materijala pomoću plazme. Plazma rezači su vrlo popularni u metaloprerađivačkoj industriji zbog svoje brzine i preciznosti rezanja debelih metala. Ovaj uređaj koristi električni luk i plazmu za stvaranje visokih temperatura koje rastale i režu materijale. Postoje ručni (slika 2.15.) i CNC (slika 2.16.) plazma rezači.



*Slika 2.15. Ručno plazma rezanje [13]*



*Slika 2.16. CNC plazma rezanje [14]*

Plazma rezač sastoji se od:

1. Izvor plazme - uređaj koji generira visokofrekventni električni luk ili napon koji se koristi za formiranje plazme. Visoki napon omogućuje da se plinovi koji se nalaze u gorioniku ioniziraju i stvore plazmu. Postoje različite vrste izvora plazme, uključujući DC, AC i pulsirajuće izvore. Ovisno o vrsti plazma rezača koji se koristi, mogu se koristiti različiti izvori plazme. Izvori plazme su obično izrađeni od kvalitetnih komponenti kako bi se osigurala pouzdanost i dugotrajnost.

2. Plinska konzola – ključna je komponenta plazma rezača koja ima ulogu u dovedu plinova neophodnih za generiranje plazme. Vrsta plina koji se koristi u plinskoj konzoli ovisi o materijalu koji se reže. Protok plina se obično kontrolira regulatorom tlaka koji se nalazi na plinskoj konzoli. Kvalitetna plinska konzola treba osigurati dosljedan protok plina kako bi se postigao dosljedan i kvalitetan rez.
3. Plazma gorionik - je ključna komponenta plazma rezača (slika 2.17.). To je dio rezača koji stvara plazmu i usmjerava je prema materijalu koji se reže. Gorionik se sastoji od elektrode i sapnice koja omogućuje precizno usmjeravanje plazme. Kvalitetan gorionik mora biti izrađen od kvalitetnih materijala kako bi se osigurala dugotrajnost i preciznost. Ovisno o materijalu koji se reže, mogu se koristiti različite vrste elektroda i sapnica.



*Slika 2.17. Dijelovi gorionika ručnog plazma rezača koji radi pomoću komprimiranog zraka [15]*

4. CNC sustav - je računalni sustav koji se koristi za upravljanje plazma rezačem. CNC sustav omogućuje korisniku da precizno upravlja kretanjem rezača i izvede visokokvalitetan rez. CNC sustav se obično sastoji od računala s softverom koji kontrolira kretanje rezača. Softver omogućuje korisniku da postavi različite parametre reza i prilagodi brzinu rezača kako bi se postigla optimalna kvaliteta reza.

5. Stol za rezanje - platforma na kojoj se nalazi materijal koji se reže. Ovaj stol može biti ravnina ili može imati različite stupnjeve nagiba za rezanje pod kutom. Stol također može biti opremljen sustavom za usisavanje prašine kako bi se održao čist radni prostor.

## 2.5. Nepravilnosti kod rezanja plazmom

Rezanje plazmom je postupak koji se često koristi u industriji za precizno i efikasno rezanje metala. Međutim, kao i svaka tehnika, i rezanje plazmom može biti podložno određenim nepravilnostima i problemima. Nepravilnosti iz tablice 2. mogu utjecati na kvalitetu rezanja i konačni rezultat.

Tablica 2. Nepravilnosti kod rezanja plazmom [16]

<i>Nepravilnosti kod</i>			
	<i>Konstruktivski čelik</i>	<i>Nehrdajući čelik</i>	<i>Aluminij</i>
<i>Zaobljen gornji rub</i>	Prevelika brzina i razmak	Prevelika brzina i razmak	Rijetko
<i>Srh na gornjem rubu</i>	Preveliki razmak, Lako se otklanja	Preveliki razmak, lako se otklanja, koncentracija vodika pogrešna	Preveliki razmak Lako se otklanja
<i>Hrapavost na gornjem rubu</i>	Rijetko	Pogrešna koncentracija vodika, razmak i brzina	Premali protok vodika
<i>Nagib (pozitivan)</i>	Prevelika brzina i preveliki razmak	Prevelika brzina i razmak, premalo vodika	Prevelika brzina, premali protok vodika
<i>Nagib (negativan)</i>	Rijetko	Rijetko	Previše vodika
<i>Neravnine blizu donjem rubu</i>	Rijetko, ponekad kod prebrzog starta	Samo na granici optimalnih parametara	Rijetko
<i>Neravnine blizu gornjeg ruba</i>	Previše vodika	Previše vodika	Premala brzina, premalo vodika
<i>Konkavne stranice</i>	Rijetko	Previše vodika	Previše vodika, premala brzina
<i>Konveksne stranice</i>	Prevelika brzina	Prevelika brzina, premalo vodika	Rijetko
<i>Donji rub zaobljen</i>	Prevelika brzina	Rijetko	Rijetko
<i>Srh na donjem rubu</i>	Previše vodika, prevelika brzina	Previše vodika, premala brzina	Prevelika brzina
<i>Hrapavost na donjem rubu</i>	Premali razmak	Rijetko	Premalo vodika

## 2.6. Sigurnost kod plazma rezanja

Rezanje plazmom također zahtijeva usklađenost s osnovnim pravilima industrijske sigurnosti. Ovaj proces može biti izuzetno učinkovit i precizan, ali zahtijeva pažnju na sigurnost kako bi se izbjegle ozljede i nezgode. Kao takav, sigurnost kod plazma rezanja je od najveće važnosti i mora se strogo poštovati kako bi se osiguralo sigurno i učinkovito obavljanje ovog procesa.

Neke od sigurnosnih smjernica:

- upotreba zaštitne opreme (slika 2.18.) kao što su zaštitne naočale i rukavice je neophodna
- slijediti upute proizvođača opreme kako bi se osigurala sigurnost kod plazma rezanja
- ne izlagati se zraku koji se emitira tokom procesa plazma rezanja
- izbjegavati rad u blizini zapaljivih materijala ili plinova prilikom plazma rezanja
- uvijek paziti na kabel i elektrode kako ne bi došlo do kratkog spoja ili električnog udara
- redovito provjeravati stanje opreme kako bi se osiguralo da je sve u dobrom stanju prije nego što se počinje rezat
- obavezno isključiti opremu prije nego što se počinju mijenjati dijelovi
- provjeriti ako je radna površina stabilna i sigurna prije nego što se počinje s rezanjem
- držat dalje od opreme sve predmete koji bi mogli uzrokovati opasnost
- nikad ne ostavljati opremu bez nadzora kada je uključena
- pripravnost na najgore moguće scenarije kao što su požar i eksplozija
- ako se pojavi problem tijekom procesa rezanja, potrebno je isključiti svu opremu i riješiti problem prije nego što se oprema ponovno uključi
- uvijek koristiti zaštitnu masku i zatvorenu odjeću kako bi se zaštitilo od opasnosti
- uvijek raditi u dobro osvijetljenoj radnoj površini kako bi se osigurala vidljivost i smanjio rizik od nezgoda
- uvijek se pridržavati sigurnosnih mjera koje su propisane za radnu okolinu
- provjeriti da li je oprema dobro održavana i redovito provjeriti njezino stanje

- uvijek se educirati o novim sigurnosnim standardima i praksama kako bi se osiguralo da se radi na najsigurniji način
- držati dijelove tijela poput ruku, nogu i prstiju dalje od zone rezanja kako bi se izbjegle ozljede
- uvijek treba biti siguran da se pravilno pričvrstila rezna ploča koji se želi rezati kako bi se smanjio rizik od nezgoda.



*Slika 2.18. Sigurnosna odjeća, obuća i oprema kod plazma rezanja [17]*

## **2.7. Primjene plazma rezanja u različitim granama industrije**

Plazma rezanje je tehnika koja se često koristi u različitim granama industrije, uključujući automobilsku, avio, brodogradnju, vojnu industriju, umjetnost, građevinu.

U automobilskoj industriji, plazma rezanje se koristi za izradu različitih metalnih dijelova za automobile. Ovaj postupak se koristi za izradu karoserija, kao i za rezanje različitih dijelova motora i prijenosnika.



Avio industrija koristi plazma rezanje za izradu metalnih dijelova aviona, uključujući kritične dijelove poput krila, propelera i drugih dijelova koji moraju biti izuzetno precizni.

Kod brodogradnje plazma rezanje se koristi za izradu metalnih dijelova brodova, poput oplata, kobilica i drugih dijelova koji moraju izdržati visoki pritisak.

Vojna industrija koristi plazma rezanje za izradu oružja i opreme, uključujući tenkove, oklopna vozila, puške i druge vrste oružja gdje je bitna otpornost na udarce.

Plazma rezanje se koristi i kod bravarskih poslova. Kada bravar mora obaviti posebno težak posao, a moraju prorezati svoj put kroz metal poput nehrđajućeg čelika s kojim nije lako raditi, obično se za rezanje koristi plazma rezač.

Isto tako, plazma rezači se mogu koristiti u kreativnijem ruhu kada umjetnik želi raditi s različitim vrstama metala koje ne može lako prorezati (slika 2.19.). [18]



*Slika 2.19. Umjetničko djelo izrađeno plazma rezačem [19]*

### 3. Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka

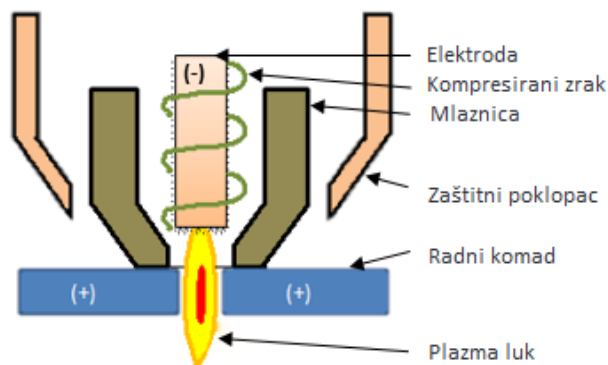
Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka (slika 3.1.) uvedeno je ranih 1960-ih za rezanje niskougličnog čelika. Iako se rezanje pomoću komprimiranog zraka nije nastavilo kasnih 1960-ih u Sjedinjenim Državama i zapadnom svijetu, u istočnoj je Europi ostvaren stalan napredak s uvođenjem "Feinstrahl Brennera" (gorionik koji proizvodi ograničeni luk), koji je razvio Manfred van Ardenne. Ova tehnologija je usvojena u Rusiji i na kraju u Japanu. Glavni dobavljač postao je Mansfeld iz Istočne Njemačke. Nekoliko brodogradilišta u Japanu rano je počelo koristiti opremu za plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka.

Kisik prisutan u zraku pružao je dodatnu energiju putem egzotermne reakcije s rastaljenim čelikom. Ova dodatna energija rezultirala je povećanjem brzine rezanja za otprilike 25% u usporedbi s plazma rezanjem korištenjem dušika. Unatoč mogućnosti primjene ovog procesa na rezanje nehrđajućeg čelika i aluminijskih materijala, površina reza na tim materijalima bila je podložna izraženoj oksidaciji i nije bila pogodna za brojne primjene. Najveći problem kod rezanja pomoću komprimiranog zraka uvijek je bila brza erozija elektrode plazma plamenika. Bile su potrebne posebne elektrode, izrađene od cirkonija, hafnija ili legure hafnija, budući da je volfram erodirao za nekoliko sekundi ako je plin za rezanje sadržavao kisik. Čak i s ovim posebnim materijalima, životni vijek elektrode upotrebom plazme rezača koji radi pomoću komprimiranog zraka bio je mnogo kraći od vijeka trajanja elektrode povezanog s konvencionalnom plazmom [20].

Plazma rezanje je proces koji uključuje korištenje visoko temperaturnog plazma luka za rezanje metala i drugih materijala. Proces uključuje nekoliko osnovnih koraka. Najprije se plazma plamenik postavlja iznad materijala koji se reže. Zatim se električna struja koristi za ionizaciju zraka ili drugog plina, stvarajući plazma luk visoke temperature. Ovaj luk je usmjeren prema materijalu, rastaleći ga i isparavajući dok prolazi preko površine. Rastaljeni metal se otpuhuje iz reza mlazom plina velike brzine, obično komprimiranim zrakom. Jedna od ključnih prednosti plazma rezanja pomoću komprimiranog zraka je njegova brzina. Proces je u mogućnosti brzo i učinkovito rezati debele materijale, što ga čini popularnim izborom u nizu industrijskih primjena. Također je relativno svestran, može rezati širok raspon materijala, uključujući aluminij, bakar, čelik i druge metale. Međutim, rezanje plazma rezačem koji radi pomoću komprimiranog zraka ima neka ograničenja. Na primjer, nije uvijek najbolji izbor za materijale koji su visoko reflektirajući ili vodljivi, jer oni mogu ometati plazma luk i dovesti do nejednakih rezova. Osim toga, proces može proizvesti značajne količine buke, dima i para, što može biti problem u nekim

okruženjima. Unatoč ovim ograničenjima, plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka ostaje široko korišten i učinkovit postupak za rezanje metala i drugih materijala.

Napredak tehnologije učinio je proces preciznijim, učinkovitijim i pristupačnijim nego ikad prije, te je i dalje važan alat u mnogim industrijskim primjenama.



Slika 3.1. Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka [21]

### 3.1. Odabir plazma rezača koji radi pomoću komprimiranog zraka

Postoje nekoliko pitanja koje se tvrtke ili osobe moraju pitati kako bi pravilno odabrali plazma rezač koji radi pomoću komprimiranog zraka koji im je potreban. Hoće li obavljati rezanje ručno, automatizirano (na CNC stroju) ili oboje. Mnogi plazma rezači koji rade pomoću komprimiranog zraka mogu obavljati rezanje ručno ili automatizirano, što pruža najviše mogućnosti, ali neki su ograničeni samo na jedan tip rezanja. Također, ako postoji šansa da će se u budućnosti obavljati automatizirano rezanje, tada je definitivno potrebno odabrati sustav koji ne koristi visokofrekventni početni krug. Visokofrekventni start koristi iskru visokog napona za pokretanje plazma luka, što može ometati drugu opremu i uzrokovati blokiranje. Nakon toga mora se znati koja debljina metala se želi rezati. Većina stručnjaka preporučuje pravilo 80/20, prema kojem treba odabrati sustav s preporučenom mogućnošću rezanja koja odgovara debljini materijala koji će se rezati 80% vremena. Na primjer, ako se planira rezati metal debljine do 12 mm, a povremeno rezati malo deblji metal (recimo 18 mm), tada će se sigurno odabrati sustav za rezanje 12 mm. Sljedeće pitanje je, gdje će se sustav nalaziti. Ako se ne planira puno mijenjati mjesto sustava, može se priuštiti veći sustav; međutim, ako se planira premještati sustav po radionici ili ga koristiti na terenu, tada bi se trebalo uzeti u obzir masu sustava. Potrebno se pitati kakve će se vrste električne energije imati na raspolaganju. Da li je dostupno 220 V ili samo 110 V? Ako je rad na terenu, koliko snažan generator je potreban? Ako se planira koristiti sustav u garaži kod kuće, a garaža ima samo utičnice od 110 V na raspolaganju, tada je potreban sustav koji može raditi na 110 V ili instalirati utičnicu od 220 V. Isto tako, potrebno se pitati kakav ciklus rada je najpotrebniji.

Najpouzdaniji sustavi su projektirani s manje dijelova, koriste softver umjesto hardvera kad je to moguće, pažljivo su proizvedeni prema strogim ISO standardima i temeljito ispitani. Idealno bi bilo imati konfiguraciju centraliziranog ventilatora koji dovodi hladni zrak kroz središte sustava, gdje se nalaze termički osjetljiviji dijelovi. To će rezultirati učinkovitijim i dosljednijim hlađenjem i omogućiti veći, industrijski ciklus rada [22].

### **3.2. Odabir kompresora plazma rezača**

Svi proizvođači plazma uređaja uključuju minimalne zahtjeve za protok zraka i tlak zraka za kompresor u vlasničkom priručniku. Važno je imati na umu da se radi o minimalnim zahtjevima. Ako se planira koristiti plazma rezač za projekte iz hobija ili povremeno rezanje čeličnih komada, tada će kompresor zraka za plazma rezač s ocjenom protoka malo većom od minimalnih zahtjeva navedenih u vlasničkom priručniku biti dovoljan. No, ako se često vrši rezanje ili se planiraju rezati ploče veće debljine, preporučljivo je korištenje kompresora koji je 1,5 do 2 puta veći od zahtjeva plazma sustava. Osim odabira odgovarajuće veličine kompresora zraka za plazma rezač, ključno je osigurati da zrak koji dolazi do plazma rezača bude visokokvalitetan. Bez toga, dijelovi neće izgledati dobro, a potrošni materijali neće dugo trajati [23]. Prijenosni sustavi (slika 3.2) imaju spremnike veličine od samo 4 L, dok su stacionarni sustavi opremljeni spremnicima od 380 L ili više. Kapacitet protoka rezultat je izlaznog tlaka i veličine spremnika za pohranu. Što je veći postavljeni izlazni tlak, to će biti niži kapacitet protoka. Važno je biti siguran da kompresor može zadovoljiti zahtjev za protokom koji zahtijeva sustav rezanja kada je postavljen na potrebni izlazni tlak. Za maleni ručni plazma rezač koji radi na 20-30 A, treba samo 5,5 bara. Veći automatizirani sustavi za rezanje plazmom u rasponu od 130 do 800 A mogu zahtijevati 8 bara ili više. Većina industrijskih zračnih kompresora za plazma rezanje bit će u mogućnosti generirati tlakove u ovom rasponu. Što se tiče protoka, poželjnije je koristiti bakrene nego čelične ili aluminijske cijevi. Linije kraće od 23 m trebaju koristiti crijevo ili cijev promjera 3/8 in, dok linije duže od 23 m trebaju koristiti crijevo ili cijev promjera 1/2 in. Ako se koristi fleksibilno crijevo, potrebno se pobrinuti da ga se ne steže ili gužva [24].



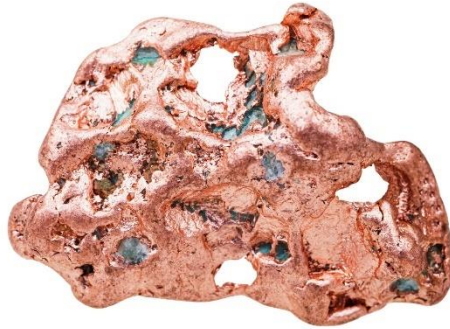
*Slika 3.2. Primjer prijenosnog sustava Plasma Cutter-Cut-60-H (Tank 50 L) [25]*

### **3.3. Prednosti i nedostaci plazma rezanja pomoću komprimiranog zraka**

Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka nudi brojne prednosti u usporedbi s drugim metodama rezanja, ali također ima i neke nedostatke koje treba uzeti u obzir prilikom odabira odgovarajućeg načina obrade metala. Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka omogućuje postizanje gotovo iste brzine rezanja kao i kod rezanja dušikom, što znači da se može ostvariti visoka produktivnost. Održavanje plazma sustava rezanja pomoću komprimiranog zraka također je relativno jeftino u usporedbi s drugim tehnikama. Nisu potrebni složeni sustavi filtriranja ili obrade plina, što smanjuje troškove održavanja. Također, nakon rezanja, postupci naknadne obrade su minimalni za većinu primjena u normalnoj proizvodnji, što štedi vrijeme i radnu snagu. Unatoč brojnim prednostima, plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka ima i neke nedostatke. Kod rezanja niskolegiranih čelika može se pojaviti mala količina ostataka, ali ta količina je obično vrlo mala i može se jednostavno ukloniti. Također, na površini reznog ruba čelika nerijetko se formira crni oksidni sloj. Kod rezanja nehrđajućeg čelika, površina reza može imati žutu ili crnu boju. Glavna mana je da kvaliteta rezanja komprimiranim zrakom ovisi o snazi stroja. Što je veća snaga stroja, brzina i kvaliteta rezanja mogu se poboljšati. Također, ograničenje debljine lima također ovisi o snazi stroja. Potrebno je ulaganje u sustav [26].

## 4. Bakar

Bakar (slika 4.1.) je metal s bogatom poviješću koja seže još u prapovijesno doba. Zahvaljujući svojim karakteristikama poput mekoće, visoke rastezljivosti i iznimne otpornosti na koroziju, bakar je imao široku primjenu u izradi oruđa, alata, nakita i oružja.



*Slika 4.1. Bakar [27]*

Bakar ima svojstva koja ga čine korisnim i raznovrsnim metalom u mnogim primjenama. Najznačajnija svojstva bakra i njegovih legura:

- vrlo visoka vodljivost koja utječe na zavarljivost
- dodavanje legirnih elemenata poboljšava osnovna svojstva čistog bakra, iako se istovremeno smanjuje njegova električna i toplinska vodljivost
- bakar nema magnetska svojstva i ne postoje alotropske modifikacije bakra
- legure bakra, kada su žarene, pokazuju izvrsnu duktilnost i mogu se lako kovati, deformirati u toplom stanju te duboko vući
- električna vodljivost je jedna od ključnih karakteristika bakra. Nakon srebra, čisti bakar posjeduje iznimno visoku električnu vodljivost, pri čemu ta vodljivost najviše ovisi o stupnju njegove čistoće. Prisutnost elemenata koji nisu topivi u bakru gotovo ne utječe na njegovu električnu vodljivost. Među tim elementima je kisik koji može ostati zadržan tijekom procesa dobivanja bakra, kao i dodani olovo koji se koristi kako bi se poboljšala njegova obradivost.

Međutim, važno je napomenuti neke nedostatke bakra:

- visoko talište i relativno visoka cijena
- bakar nije otporan na oksidirajuće kiseline
- treba izbjegavati upotrebu u preradi namirnica jer bakar može stvarati otrovnu zelenu prevlaku, poznatu kao bakrov acetat
- postoji opasnost od vodikove krhkosti pri visokim temperaturama i prisutnosti vodika i ugljikovog monoksida, što može dovesti do pucanja materijala [28].

Bakar se koristi u različitim industrijskim i kućanskim područjima zbog svojih jedinstvenih svojstava. Njegova primjena obuhvaća sljedeće:

- prehrambena i kemijska industrija: čisti bakar se često koristi za izradu cijevi i kotlova koji se koriste u prehrambenoj i kemijskoj industriji za transport tekućina poput vode i plina. Bakar je kemijski otporan i ne reagira s mnogim tvarima, što ga čini prikladnim za takvu uporabu
- kućanstvo: bakar se koristi u kućanstvu za izradu raznih predmeta. To uključuje izradu spremnika, grijača, hladnjaka i drugih uređaja. Bakar je dobar vodič topline, što ga čini pogodnim za primjenu u takvim kućanskim uređajima
- elektrotehnika: bakar je dobar vodič električne energije i topline, što ga čini nezamjenjivim u području elektrotehnike i elektronike. Više od polovice ukupne proizvodnje bakra danas se koristi u industriji kablova za prijenos električne energije. Osim toga, bakar se također široko koristi u izradi generatora, motora i transformatora, gdje je visoka provodljivost električne energije od ključne važnosti
- metalurgija: bakar se široko koristi u metalurgiji kao legirajući metal zbog svojih izvanrednih mehaničkih svojstava. Također, bakar se i dalje koristi za izradu novčića. Njegova raznolika primjena uključuje proizvodnju bakrenog praha, poluga, PVC-om omotane žice i folije.

U nastavku je prikazana tablica 3. s karakteristikama i vrijednostima za fizikalna i mehanička svojstva bakra, koje se mogu razlikovati ovisno o stanju materijala.

Tablica 3. Karakteristična svojstva bakra [29]

<b>Simbol</b>	<b>Cu</b>
<b>Atomski broj</b>	29
<b>Atomska masa</b>	$63,57 \cdot 10^{-27}$ kg
<b>Gustoća</b>	$8930 \text{ kg/m}^3$
<b>Talište</b>	1356 K
<b>Vrelište</b>	2573 K
<b>Električna vodljivost</b>	35-58 m/ $\Omega$ mm <sup>2</sup>
<b>Toplinska vodljivost</b>	240-386 W/mK
<b>Temperaturni koeficijent istežanja ( toplinska rastezljivost )</b>	$17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
<b>Modul elastičnosti</b>	125000 MPa
<b>Vlačna čvrstoća</b>	200-360 MPa

U ovom diplomskom radu ispitivao se ETP-bakar. ETP-bakar je visokokvalitetni elektrolitički bakar koji ima visoku provodljivost (sastoji se od 99,90% bakra i 0,4% kisika). Proces dobivanja bakra ETP uključuje elektrolitičko taloženje, pri čemu se bakar izdvaja iz otopine i deponira na elektrode. Ovaj postupak osigurava visoku čistoću bakra bez nečistoća koje bi mogle narušiti njegovu električnu provodljivost. Koristi se za proizvodnju električnih vodova, prekidača i sklopki, tiskarskih valjaka te kao materijal za krovne pokrove i bakrenu galanteriju u građevinskoj industriji.



## 5. Eksperimentalni dio – Plazma rezanje Cu-ETP bakar

Korišteni materijal ovog eksperimenta je bakar Cu-ETP, lim debljine 3 mm. Za provođenje eksperimenta korišten je plazma rezač Hypertherm Powermax30® AIR te je rezanje obavljeno pomoću uređaja za automatizirano pravocrtno pomicanje gorionika. U svrhu dobivanja različitih uzoraka, materijal je rezan pri različitim parametrima jakosti struje  $I$ , A i brzine  $v$ , cm/min. Izrađeno je deset uzoraka. Svi uzorci su zatim podvrgnuti strojnoj obradi glodanja kako bi se dobili određeni oblici i dimenzije za vlačno ispitivanje. Prije samog vlačnog ispitivanja, provedeno je mjerenje srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$  na uređaju Surtronic S-116. Vlačno ispitivanje provelo se na kidalici INSPEKT Blue 20. Cilj eksperimenta je istražiti kako plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka različitim parametrima brzine i jakost struje utječe na vlačnu čvrstoću materijala.

### 5.1. Materijal za ispitivanje

Materijal korišten u ovom eksperimentu je bakar Cu-ETP, lim debljine 3 mm. Cu-ETP je elektrolitički rafinirani bakar koji sadrži kisik. Zbog preostalog sadržaja kisika, legura nije prikladna za zavarivanje jer je podložna osjetljivosti na vodikovu lomljivost. Koristi se u izradi industrijskih radijatora, električnih vodova, krovova, odvoda, kućišta električnih perkolatora, itd.

Atest proizvođača garantira karakteristike korištenog materijala, bakra Cu-ETP, koji se može vidjeti u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristike bakra Cu-ETP korištenog za eksperiment

Karakteristike	Min.	Max.	Rezultat
% Cu	99,900	-	99,900 %
Vlačna čvrstoća $R_m$	240,0	300,0	248,9 MPa
Istezanje A50	15,0	-	39,8 %
Granica elastičnosti	180,00	-	216,8 MPa
Električna provodljivost	57,00	-	57,1 SIM

## 5.2. Priprema ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci izrađeni su iz dvije ploče lima dimenzija 315x150 mm, debljine 3 mm. Na ploče su nacrtane linije razmaka od približno 50 mm kako bi se dobili ispitni uzorci približno jednakih dimenzija. Razmaci su označeni brojevima od jedan do deset, koji će nakon rezanja postati ispitni uzorci tih brojeva. Označene linije (slika 5.1.) služe za što paralelnije rezove ispitnih uzoraka, odnosno, kao pravac kretanja plazma pištolja vođenog uređajem za pravocrtno pomicanje.



*Slika 5.1. Lim bakra Cu-ETP [36]*

## 5.3. Oprema korištena za provođenje eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Sva oprema korištena za provođenje eksperimenta nalazi se na Sveučilišta Sjever, osim tračne pile i glodalice.

### 5.3.1. Hypertherm Powermax30® AIR

Navedeni uređaj ima ugrađeni vlastiti zračni kompresor (slika 5.3.). Može rezati niskouglične čelike do 16 mm debljine, a nehrđajuće čelike i aluminij do 13 mm. Preporučena brzina rezanja za

debljinu 8 mm je 500 mm/min, za 10 mm je 250 mm/min i 16 mm je 125 mm/min. Maksimalna jakost struje je 30 A. Može raditi na 120 V ili na 240 V. S obzirom na mogućnost odabira napona, ovaj uređaj (slika 5.2.). Tablica 5. prikazuje karakteristike uređaja Hypertherm® Powermax 30 AIR [30].

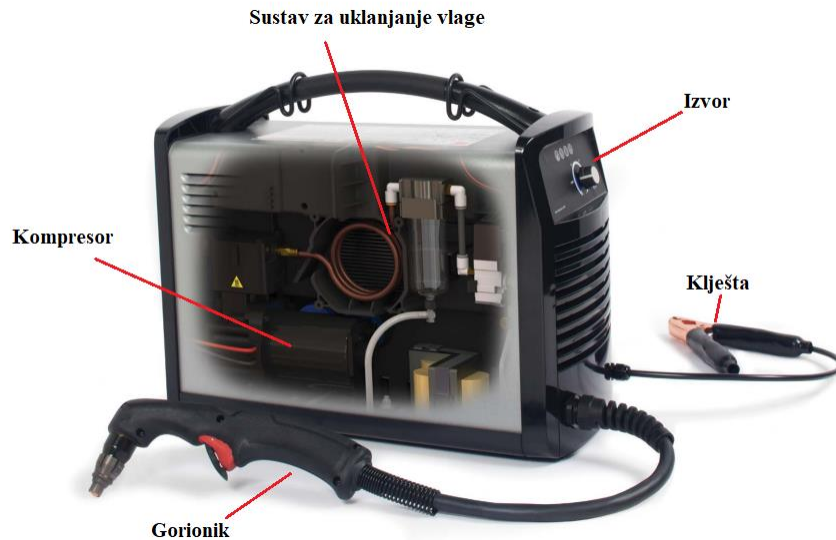
Tablica 5. Karakteristike Hypertherm® Powermax 30 AIR [30]

### Hypertherm® Powermax 30 AIR

<b>Ulazni napon</b>	120–240 V, 1-PH, 50/60 Hz
<b>Ulazna struja @ 2,5 kW</b>	120–240 V, 1-PH, 29–15 A
<b>Izlazna struja</b>	15–30 A
<b>Radni ciklus</b>	35%, 240 V
<b>@ Radni ciklus @ 40° C (104° F)</b>	20%, 120 V
<b>Napon praznog hoda</b>	256 VDC
<b>Dimenzije s drškama</b>	420 mm (16.5") D; 195 mm (7.7") Š; 333 mm (13.1") V
<b>Masa s 4,5 m (15') gorionikom</b>	13,5 kg (29.8 lbs)
<b>Dužina priključnog kabela</b>	3 m (10')
<b>Napajanje</b>	Inverter – IGBT
<b>Potrebna snaga motora</b>	5,5 kW za 30 A izlaz



Slika 5.2. Hypertherm® Powermax 30 AIR [36]



Slika 5.3. Dijelovi Hypertherm® Powermax 30 AIR [30]

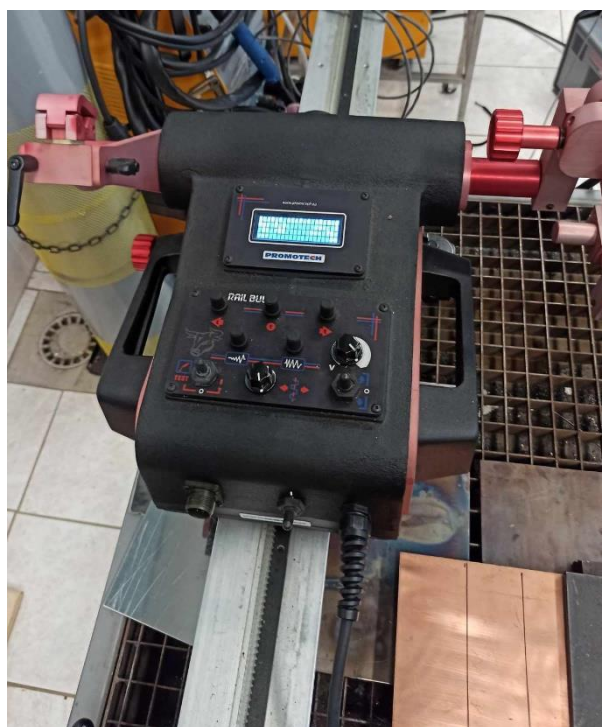
### 5.3.2. Uređaj za automatizirano pravocrtno pomicanje gorionika

Korišten uređaj za automatizirano pravocrtno pomicanje gorionika je PROMOTECH Rail Bull. Namijenjen za TIG-MIG-MAG zavarivanje ili plazma rezanje. Uređaj (slika 5.4.) može raditi u PA (ravno), PB (vodoravno okomito), PC (vodoravno), PD, PE (gore), PF (okomito gore) i PG (okomito dolje) položajima zavarivanja. Uređaj se kreće po feromagnetskim i neferomagnetskim materijalima pomoću pogona koji uključuje zupčastu letvu i tračnice. Tračnice su pričvršćene na različite površine, bilo ravne ili zakrivljene, koristeći magnetske ili vakuumske jedinice. Minimalni radijus zakrivljenosti potreban za polufleksibilnu stazu je 5 m. Tablica 6. prikazuje karakteristike uređaja [31].

Tablica 6. Karakteristike uređaja PROMOTECH Rail Bull [31]

**PROMOTECH Rail Bull**

<b>Napon</b>	115-230 V, 50-60 Hz
<b>Snaga</b>	100 W
<b>Položaj zavarivanja</b>	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
<b>Promjer pištolja</b>	16-22 mm; pa do 35mm (izborno)
<b>Horizontalna vučna sila</b>	350 N
<b>Vertikalna vučna sila</b>	150 N
<b>Težina</b>	20 kg
<b>Horizontalna brzina</b>	0-120 cm/min
<b>Vertikalna brzina</b>	0-110 cm/min
<b>Hod zupčaste letve</b>	0-190 mm
<b>Raspon podešavanja poprečnog klizača</b>	0-35 mm (gore/dolje, lijevo/desno)



*Slika 5.4. PROMOTECH Rail Bull [36]*

### 5.3.3. AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116

Surtronic S-116 (slika 5.5.) je ručni uređaj za mjerenje hrapavosti površine s rasponima mjerenja od 200  $\mu\text{m}$  / 100  $\mu\text{m}$  / 10  $\mu\text{m}$ . Idealan je za mjerenje hrapavosti površine u industriji preciznih ležajeva, automobilske industriji, teškoj industriji i zrakoplovnom inženjerstvu. Uključenim podizačem igle može mjeriti površine hrapavosti na različitim visinama. Protuklizne V-nogice osiguravaju sustavu korištenje na ravnim ili zakrivljenim površinama [32].



Slika 5.5. AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116 [36]

### 5.3.4. INSPEKT Blue 20

INSPEKT Blue 20 (slika 5.6.) je mjerni instrument za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala. Pogodna je za savijanje raznih materijala, rastezanje, kompresiju i guljenje (adheziju). Točna, brza i sigurna mjerenja zajamčena su kako u grubim industrijskim uvjetima, tako i u sterilnim laboratorijskim uvjetima. Tablica 7. prikazuje karakteristike kidalice [33].

Tablica 7. Karakteristike INSPEKT Blue 20 [33]

**INSPEKT Blue 20**

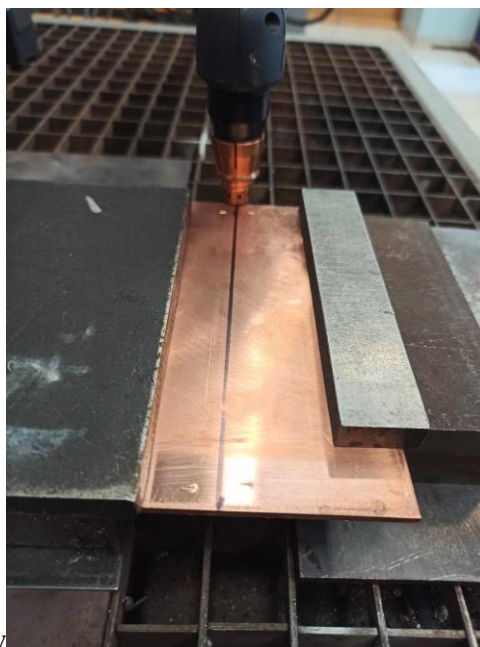
<b>Sila ispitivanja</b>	20 kN
<b>Visina ispitivanja</b>	1100 mm
<b>Širina ispitivanja</b>	420 mm
<b>Brzina ispitivanja</b>	0.0003 mm/min – 400 mm/min
<b>Max. rezolucija križne glave</b>	<0.005 μm
<b>Pomak</b>	
<b>Rezolucija mjerenja sile</b>	24 bit
<b>Težina</b>	140 kg
<b>Električni priključak</b>	230 VAC, 0.5 kVA, 50 Hz, 10- 30°C
<b>Prijenos podataka</b>	LAN ili USB
<b>Korištenje</b>	Ispitivanje metala, žice, polimera, opruga, folija, tekstila, elastomera, itd.



Slika 5.6. INSPEKT Blue 20 [36]

#### 5.4. Izrada ispitnih uzoraka

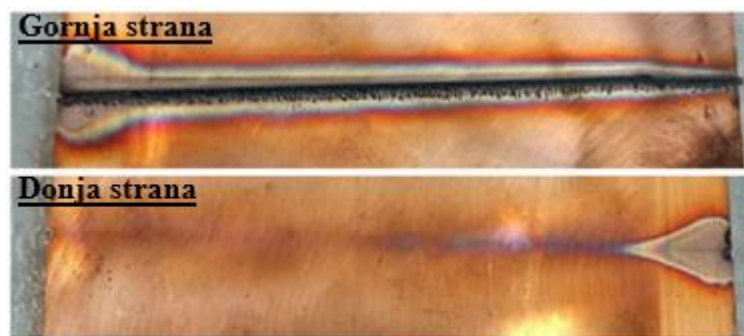
Ispitni uzorci rezani su plazma rezačem koji radi pomoću komprimiranog zraka s promjenjivim parametrima brzine rezanja  $v$ , cm/min i jakost struje  $I$ , A. Ploča je stavljena na radni stol i stegnuta ručnom stegom dok je pištolj plazma rezača pričvršćen za uređaj automatiziranog pravocrtnog pomicanja gorionika. Pištolj (slika 5.7.) se postavlja okomito na površinu lima s razmakom od približno 1 mm te mora biti pozicioniran tako da prati liniju nacrtanu na ploči. Prije svake izvedbe rezanja plazmom, potrebno je napraviti ispitivanje rezanje bez uključenja plazme. Time se osigurava da pištolj prati liniju rezanja i da gorionik ne grebe ili ne zastaje u ploči.



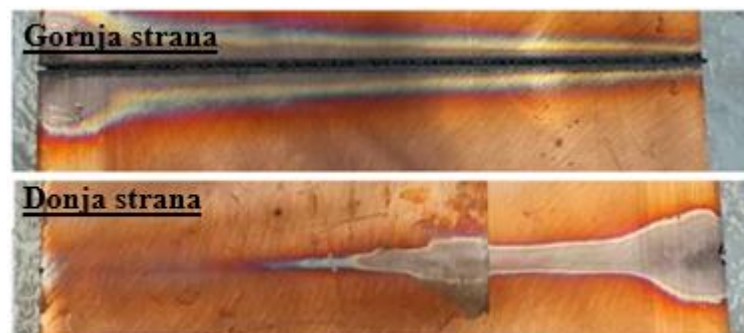
*Slika 5.7. Priprema opreme i ploče prije samog plazma rezanja [36]*

Ako je ispitivanje prošlo uspješno, može se rezati plazmom. Prvo se reže uzorak 1. Uzorak 1 rezan je brzinom 60 cm/min i jakosti struje 25 A. Rezultatom reza vidi se da rez nije probio materijal (slika 5.8.). Uzorak 2 je rezan istom jakosti struje, ali smanjenom brzinom na 40 cm/min. Rezultat rezanja (slika 5.9.) je isti kao i kod uzorka 1. Za uzorak 3 brzina se smanjila na 30 cm/min i povećala jakost struje, na maksimalnu vrijednost uređaja, od 30 A. Rezultat reza je isti kao i kod prethodna dva uzorka (slika 5.10.).

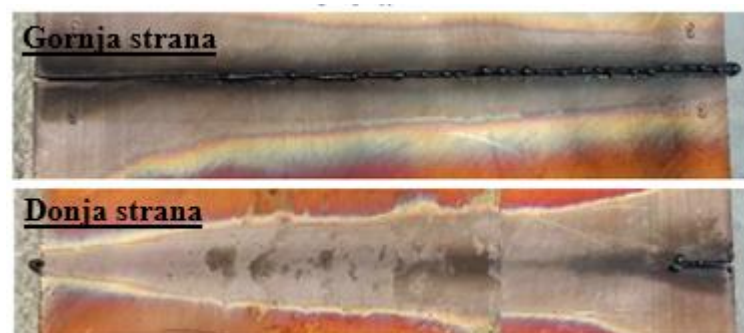




*Slika 5.8. Uzorak 1 [36]*

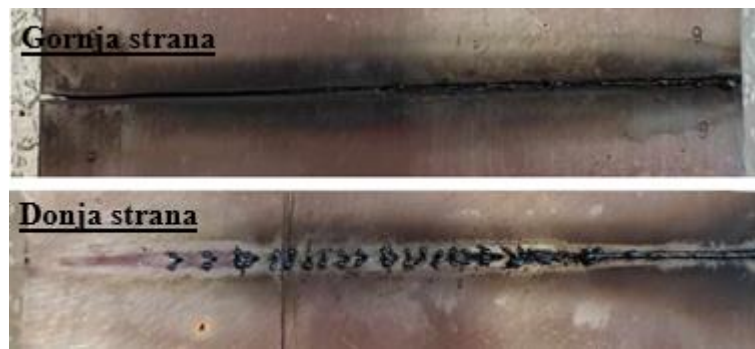


*Slika 5.9. Uzorak 2 [36]*

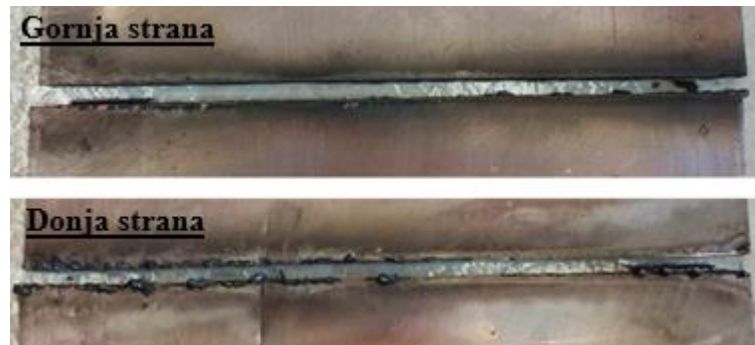


*Slika 5.10. Uzorak 3 [36]*

Sljedeći na redu je uzorak 6. Uzorak 6 nalazi se na drugoj ploči. Uzeta je druga ploča kako bi se prva ploča ohladila na sobnu temperaturu. Svaki uzorak rezao se u razmaku od pet do deset minuta. Svaki daljnji uzorak rezan je na 30 A. Uzorak 6 rezan je brzinom 17 cm/min. Rez je mjestimično prošao materijal (slika 5.11.). Prva ploča je ohlađena i rezanje se nastavlja na prvoj ploči. Odlučeno je rezati uzorak 4 i uzorak 5 na što nižoj brzini. Uzorak 4 (slika 5.12.) rezan je na 10 cm/min, a uzorak 5 (slika 5.13.) na 8 cm/min. Uzorci su uspješno izrezani.



*Slika 5.11. Uzorak 6 [36]*

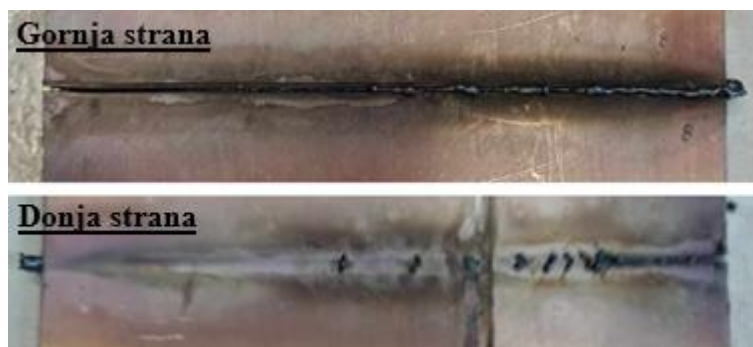


*Slika 5.12. Uzorak 4 [36]*

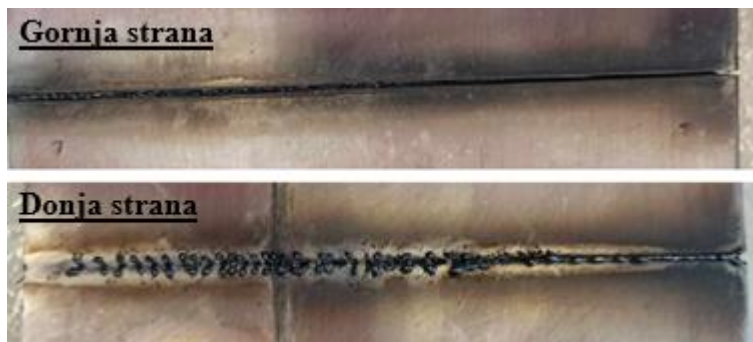


*Slika 5.13. Uzorak 5 [36]*

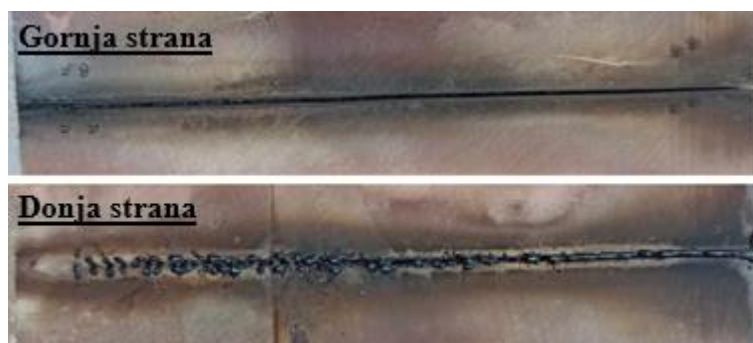
Daljnijim rezanjem preostalih uzoraka pokušala se naći gornja brzina kojom će se materijal potpuno izrezati. Uzorak 8 (slika 5.14.) rezaao se 20 cm/min te se materijal nije uspio prerezati. Uzorak 7 (slika 5.15.) rezaao se brzinom 16 cm/min i prerezaao se mjestimično. Brzina uzorka 9 (slika 5.16.) bila je 14 cm/min i rezultat je isti kao i kod uzorka 7. Uzorak je prerezan mjestimično. Uspješan rez bio je kod uzorka 10 (slika 5.17.) brzinom 12 cm/min te je materijal prerezan.



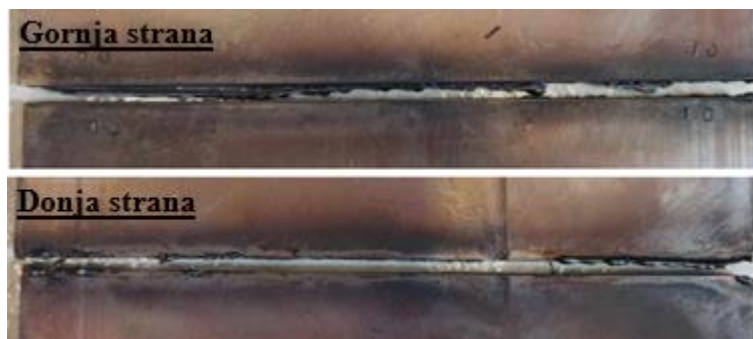
*Slika 5.14. Uzorak 8 [36]*



*Slika 5.15. Uzorak 7 [36]*



*Slika 5.16. Uzorak 9 [36]*



*Slika 5.17. Uzorak 10 [36]*

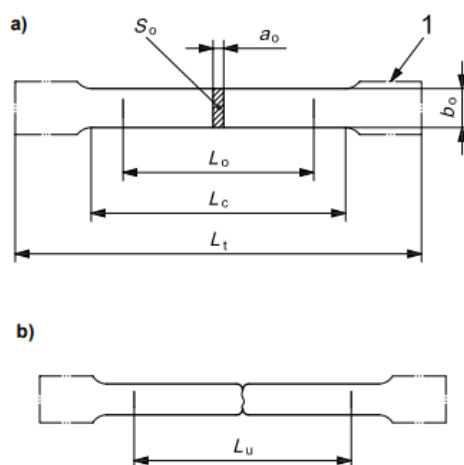
Uspješno prerezani uzorci su uzorci pod brojevima 4, 3 i 10. Svaki uzorak ima dvije površine reza koje se mogu ispitivati. U tablici 8. navedeni su rezultati rezanja uzoraka zajedno s korištenom brzinom i jakosti rezanja.

Tablica 8. Rezultati rezanja uzoraka plazma rezačem

Cu-ETP, lim 3mm	Brzina rezanja, $v$ , [cm/min]	Struja rezanja $I$ , [A]	Rezultat rezanja
<b>Uzorak 1</b>	60	25	Nije prerezan
<b>Uzorak 2</b>	40	25	Nije prerezan
<b>Uzorak 3</b>	30	30	Nije prerezan
<b>Uzorak 4</b>	10	30	Prerezan
<b>Uzorak 5</b>	8	30	Prerezan
<b>Uzorak 6</b>	17	30	Mjestimično prerezan
<b>Uzorak 7</b>	16	30	Mjestimično prerezan
<b>Uzorak 8</b>	20	30	Nije prerezan
<b>Uzorak 9</b>	14	30	Mjestimično prerezan
<b>Uzorak 10</b>	12	30	Prerezan

## 5.5. Priprema uzoraka za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala

Kako bi uzorci bili spremni na ispitivanje vlačne čvrstoće potrebno je da budu odgovarajućih oblika i dimenzija (slika 5.19.). Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje izrađeni su tako da približno zadovoljavaju uvjete za dimenzije norme ISO 6892-1:2009 (Slika 5.18.) [35].



Slika 5.18. a) Ispitni uzorak prije ispitivanja, b) Ispitni uzorak nakon ispitivanja [35]

Uzorci su odrezani tračnom pilom na 25 mm. Zadane su sve dimenzije uzorka osim početne duljine epruvete ( $L_0$ ). Tip ispitnog uzorka plosnati proporcionalni, kratki dobije se formulom  $L_0 = 5,65 * \sqrt{S_0}$ .

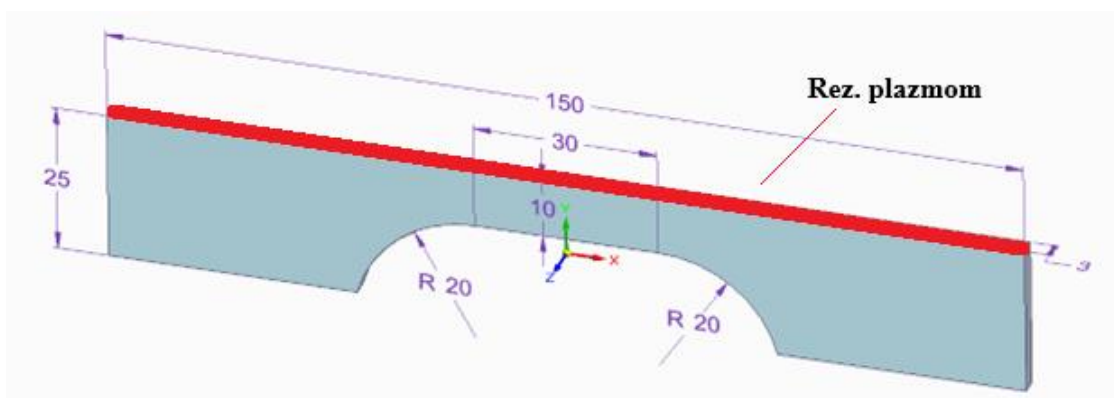
Izračun početne duljine epruvete  $L_0$ :

$$L_0 = 5,65 * \sqrt{S_0}$$

$$L_0 = 5,65 * \sqrt{10 * 3}$$

$$L_0 = 30,95 \text{ mm}$$

Za izradu uzorka uzeta je početna duljina 30 mm, te su svi uzorci obrađeni strojnom obradom glodanja (slika 5.20.). Dobiveno je šest uzoraka. To su uzorci 4A, 4B, 5A, 5B, 10A i 10B (slika 5.21.). Statičko vlačno ispitivanje provedeno je približno prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 za ispitivanja pri sobnoj temperaturi [34].



Slika 5.19. Uzorak izrađen u Solid Edge 2023 s odgovarajućim dimenzijama [36]



Slika 5.20. Uzorak spreman za strojnu obradu glodanjem [36]



Slika 5.21. Novi uzorci izrađeni strojnom obradom glodanja [36]

## 5.6. Mjerenje hrapavosti površine

U strojarskoj primjeni obično se koristi srednja vrijednost aritmetičkih odstupanja profila ( $R_a$ ) kako bi se procijenila hrapavost površine. Uzorcima se vrijednost ( $R_a$ ) mjerila uređajem AMETEK

Taylor Hobson Surtronic S – 116 (slika 5.22.). Za svaki uzorak izvršeno je pet mjerenja. Uređaj mjeri hrapavost pomoću ticala. Pomak ticala je 4 mm, a skala 100 µm. Tablica 9. prikazuje rezultate mjerenja hrapavosti.



Slika 5.22. Mjerenje hrapavosti uređajem AMETEK Taylor Hobson Surtronic S [36]

Tablica 9. Rezultati mjerenja srednje vrijednosti aritmetičkih odstupanja profila ( $R_a$ )

$R_a$	1	2	3	4	5
<b>Uzorak 4A</b>	3,44 µm	3,34 µm	4,08 µm	4,78 µm	4,96 µm
<b>Uzorak 4B</b>	2,48 µm	2,64 µm	2,72 µm	4,48 µm	4,58 µm
<b>Uzorak 5A</b>	5,60 µm	4,68 µm	5,14 µm	6,30 µm	4,90 µm
<b>Uzorak 5B</b>	4,40 µm	4,54 µm	3,60 µm	3,62 µm	3,40 µm
<b>Uzorak 10A</b>	3,32 µm	5,92 µm	4,42 µm	3,38 µm	5,30 µm
<b>Uzorak 10B</b>	4,68 µm	4,04 µm	4,88 µm	4,18 µm	4,32 µm

Izračun aritmetičke srednje vrijednosti rezultata srednjih vrijednosti aritmetičkih odstupanja profila ( $R_a$ ) za uzorak 4, uzorak 5 i uzorak 10:

$$R_{a\text{Uzorak 4}} = \frac{3,44 + 3,34 + 4,08 + 4,78 + 4,96 + 2,48 + 2,64 + 2,72 + 4,48 + 4,58}{10}$$

$$= 3,75 \text{ µm}$$

$$R_{a\text{Uzorak 5}} = \frac{5,60 + 4,68 + 5,14 + 6,30 + 4,90 + 4,40 + 4,54 + 3,60 + 3,62 + 3,40}{10}$$

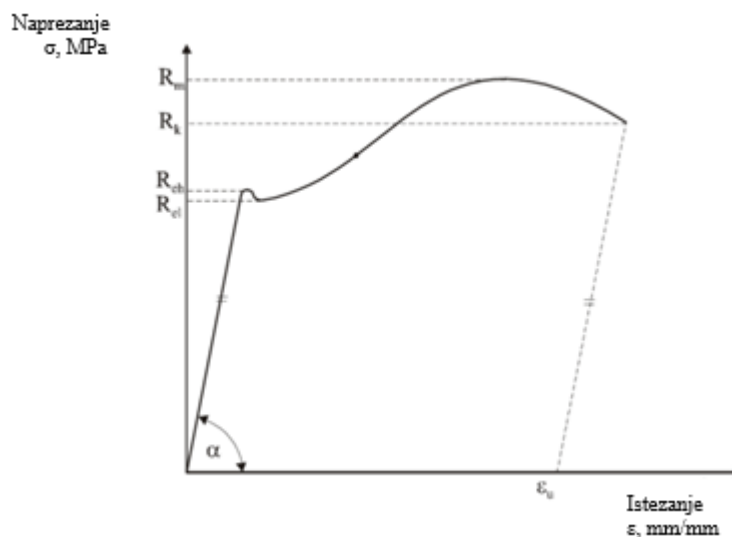
$$= 4,62 \text{ µm}$$

$$R_{a\text{Uzorak 10}} = \frac{3,32 + 5,92 + 4,42 + 3,38 + 5,30 + 4,68 + 4,04 + 4,88 + 4,18 + 4,32}{10}$$

$$= 4,47 \text{ µm}$$

## 5.7. Ispitivanje vlačne čvrstoće

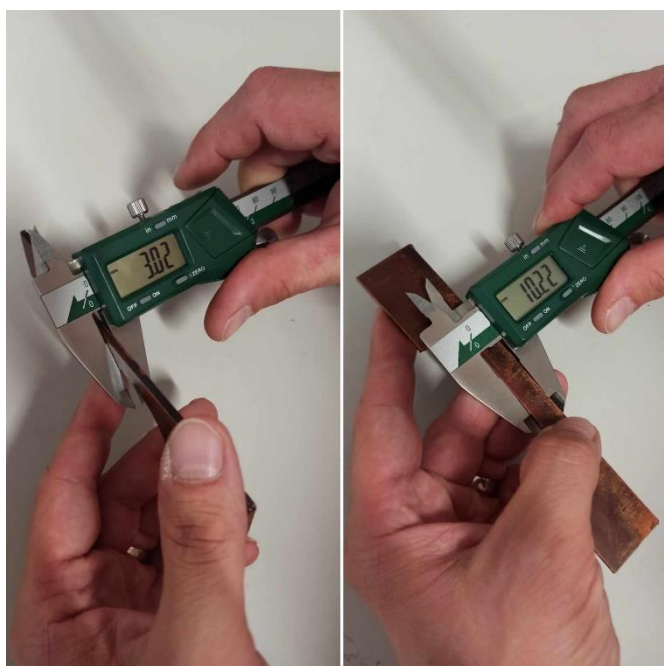
Vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) je omjer maksimalne sile ( $F_m$ ) i površine početnog presjeka ( $S_0$ ). Vlačna čvrstoća je naprezanje pri maksimalnoj sili, a ne maksimalno naprezanje. Nakon postizanja maksimalne sile, površina presjeka epruvete počinje se naglo smanjivati tako da stvarno naprezanje usprkos smanjenju sile raste. Vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Nakon dostignutog naprezanja ( $R_m$ ) deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj epruveti nego je lokalizirana na jednom mjestu. Konačno naprezanje ( $R_k$ ) je naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete. Dijagram naprezanja – istezanja prikazuje nam promjene na metalnoj epruveti tijekom statičkog vlačnog ispitivanja (slika 5.23.).



Slika 5.23. Dijagram naprezanje  $\sigma$  – istezanje  $\epsilon$

Svakom uzorku provjerile su se dimenzije potrebne za određivanje površine poprečnog presjeka (slika 5.24.). i time se potvrdilo da su uzorci skoro jednakih dimenzija.





Slika 5.24. Provjera dimenzija epruvete [36]

Ispitivanje vlačne čvrstoće izvodilo se na kidalici Hegewald & Peschke INSPEKT Blue 20. Brzina ispitivanja bila 3 MPa/s, a mjerno područje do 20 kN. Ispitalo se šest uzoraka. Tablica 10. prikazuje rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće. Slika 5.25. prikazuje dijagram naprezanja – istezanja dobivenih rezultata, dok slika 5.26. prikazuje uzorke nakon ispitivanja vlačne čvrstoće.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

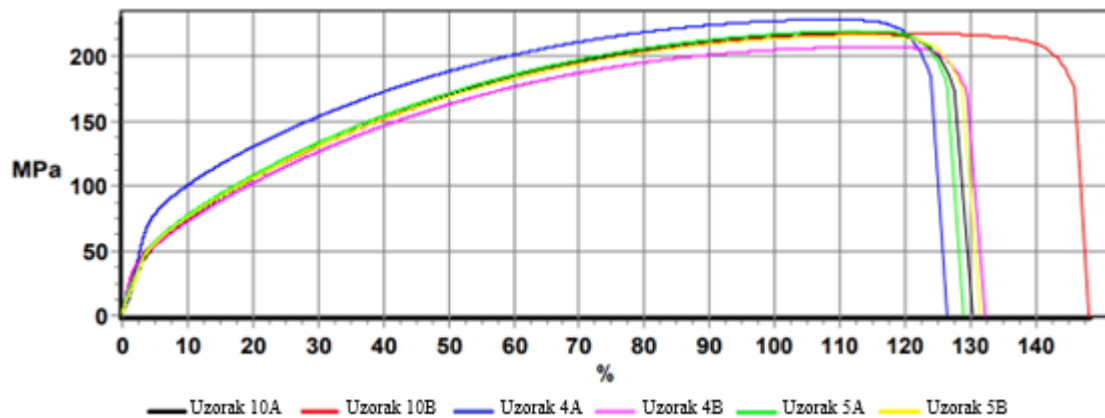
	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$R_m$ [MPa]
<b>Uzorak 10A</b>	30,66	6,70	<b>218,37</b>
<b>Uzorak 10B</b>	30,66	6,68	<b>217,93</b>
<b>Uzorak 4A</b>	30,66	7,00	<b>228,32</b>
<b>Uzorak 4B</b>	30,66	6,35	<b>207,17</b>
<b>Uzorak 5A</b>	30,66	6,73	<b>219,62</b>
<b>Uzorak 5B</b>	30,66	6,62	<b>215,82</b>

Izračun aritmetičke srednje vrijednosti rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) za uzorak 10, uzorak 4 i uzorak 5:

$$R_{m_{\text{Uzorak 10}}} = \frac{218,37 + 217,93}{2} = 218,15 \text{ MPa}$$

$$R_{m_{\text{Uzorak 4}}} = \frac{228,32 + 207,17}{2} = 217,75 \text{ MPa}$$

$$R_{m_{\text{Uzorak 5}}} = \frac{219,62 + 215,82}{2} = 217,72 \text{ MPa}$$



Slika 5.25. Dijagram naprezanje  $\sigma$  – pomak kidalice  $\varepsilon$  dobivenih rezultata ispitivanja [36]



Slika 5.26. Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće [36]

## 6. Zaključak

Plazma rezanje koristi plazmu visoke temperature kako bi precizno i brzo rezala različite materijale. Plazmom je moguće rezati širok spektar materijala, uključujući čelik, aluminij, nehrđajući čelik, bakar i druge legure. Omogućava visoku brzinu rezanja bez gubitka preciznosti. To je ključno kada je potrebno obraditi velike količine materijala u kratkom vremenskom periodu. Pogodna je za rezanje materijala velikih debljina. Može se koristiti kako za tanki lim, tako i za deblje ploče, pružajući dobre rezultate bez obzira na debljinu. Plazma rezanje rezultira usmjereni toplinski utjecaj, može se dobiti rezanje sa manjim deformacijama u usporedbi sa drugim postupcima toplinskih rezanja (plinsko prije svega) i smanjujući termička oštećenja okolnog materijala. Plazma rezanje se nameće kao nezamjenjiva tehnika rezanja koja kombinira brzinu i preciznost rezanja širokog spektra materijala. Njezina primjena je ključna u mnogim industrijama koje zahtijevaju visoku kvalitetu i efikasnost u procesu obrade materijala.

Dostupnom opremom Sveučilišta Sjever ispitivao se bakar Cu-ETP. Uzorci su izrađeni plazma rezanjem pomoću komprimiranog zraka. Maksimalna jakost struje uređaja je 30 A. Prvi uzorak rezan je strujom jakosti 25 A i brzinom 60 cm/min. Ubrzo je zaključeno kako se uzorci moraju rezati na maksimalnoj jakosti struje i na što nižoj brzini rezanja kako bi se ploča mogla pravilno izrezati. Rezultatima rezanja može se zaključiti kako se bakrena ploča 3 mm na sobnoj temperaturi može jedino prerezati s maksimalnom jakosti struje 30 A i maksimalnom brzinom rezanja 12 cm/min. Sve ostale brzine veće od 12 cm/min rezultirale su mjestimičnom prerezanošću ploče ili nije ni došlo do probijanja. Uspješno su izrezani uzorci pod brojevima 4, 5 i 10. Pregledom specifikacije uređaja Hypertherm Powermax30® AIR može se primijetiti kako proizvođač nije naveo parametre korištenja rezanja bakra. Isto tako možemo zaključiti kako je najbolje koristiti uređaj veće jakosti struje od 30 A. Kod drugih uređaja može se povećati brzina rezanja i time će se smanjiti vrijeme izrade gotovog proizvoda. Hrapavost površine mjerila se uzorcima koji su bili uspješno izrezani plazma rezanjem i kasnije strojno obrađeni glodanjem u oblik epruvete. Dobiveno je šest uzoraka (uzorak 4A, uzorak 4B, uzorak 5A, uzorak 5B, uzorak 10A i uzorak 10B). Svakom od navedenih uzoraka izmjereno je pet srednjih vrijednosti aritmetičkih odstupanja profila ( $R_a$ ). Aritmetičkim izračunom dobivenih rezultata dobiveno je da uzorak 4 ima najmanju vrijednost  $R_a$  od 3,75  $\mu\text{m}$ . Brzina rezanja može utjecati na to kako se materijal reže i kako se formira površina. Ako je brzina rezanja previsoka, to može rezultirati grubljom površinom zbog bržeg uklanjanja materijala, što može povećati vrijednost  $R_a$ . S druge strane, ako je brzina rezanja preniska, to može uzrokovati više vibracija ili neujednačeno uklanjanje materijala, također utječući na  $R_a$ . Uzorak 4 rezan je maksimalnom jakosti 30A i brzinom rezanja 10 cm/min. Ova brzina je i srednja brzina izrezanih uzoraka. Vlačna čvrstoća je također ispitivana na ovim uzorcima.

Izračunom aritmetičke srednje vrijednosti dobivenih rezultata dobiven je rezultat vlačne čvrstoće od 217 – 218 MPa. Najveća dobivena vlačna čvrstoća je 218,15 MPa uzorka 10. Uzorak 10 rezan je maksimalnom jakosti struje 30A i najvećom brzinom prerezanih uzorka 12 cm/min. Veća toplinska energija generirana bržim procesom rezanja može uzrokovati promjene u mikrostrukturi materijala i potencijalno smanjiti njegovu vlačnu čvrstoću. Također, veća jakost struje može uzrokovati dublju penetraciju plazme, što također može utjecati na mehanička svojstva. S druge strane, niža brzina rezanja i jakost struje može rezultirati sporijim procesom rezanja i manje efikasnim uklanjanjem materijala. Dobro je provesti više ispitivanja s različitim parametrima rezanja kako bi se pronašao optimalan balans. Rezultat atesta vlačne čvrstoće ploče bakra koja se ispitivala je 248,9 MPa. Zaključeno je kako nema razlike između vlačne čvrstoće rezane različitim brzinama, ali da postoji razlika od približno 30 MPa između početnog materijala i materijala toplinski obrađenog plazma rezanjem. Najbolje je uzeti što veću brzinu rezanja kako bi se smanjilo vrijeme izrade, a razlika vlačne čvrstoće je 2 MPa. Kod izračuna i inženjerskog projektiranja, uvijek je važno uzeti u obzir svojstva materijala kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost komponenata i konstrukcija. Ako se materijal obrađuje postupkom toplinskog rezanja kao što je plazma rezanje komprimiranim zrakom, tada bi se za izračune i analize trebala koristiti ažurirana i relevantna svojstva materijala nakon toplinske obrade. Ovo je važno kako bi se osigurala točna procjena izdržljivosti, opterećenja i performansi komponenata i konstrukcija. U konačnici, ključno je uzeti u obzir sve promjene koje se događaju u materijalu kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost.

## 7. Literatura

- [1] Larry Jeffus: Welding and Metal Fabrication, Boston, Massachusetts, 2011.
- [2] The Welding Institute ( TWI Global ), What is plasma cutting ?, <https://www.twi-global.com> , dostupno 23.03.2023.
- [3] GLW Engineering and Construction Ltd, plasma cutting advantages and disadvantages, <https://www.glwengineering.co.uk> , dostupno 27.03.2023.
- [4] Luka Božičević: Plazma Rezanje; Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski Fakultet, Rijeka, 2017.
- [5] Rapid Direct, What is plasma cutting, <https://www.rapidirect.com> , dostupno 03.04.2023.
- [6] Martina Radoš: Plazma rezanje; Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [7] Rezanje plazmom, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje\\_plazmom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje_plazmom) , dostupno 08.04.2023.
- [8] MultiCam Canada, Variations of the Plasma Cutting Process, <https://multicamcanada.wordpress.com> , dostupno 08.04.2023.
- [9] H. Simler, V. Krink, F. Laurisch: Suvremena tehnologija rezanja plazmom, Zavarivanje 48 (2005), 1/2, 5 – 12.
- [10] ESAB, Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget, Here is how a plasma water table works, [https://esab.com/us/nam\\_en/](https://esab.com/us/nam_en/) , dostupno 08.04.2023.
- [11] Weld Guru, 4 Gases Used in Plasma Cutting & How To Choose The Right One <https://weldguru.com> , dostupno 09.04.2023.
- [12] Kjellberg, <https://www.kjellberg.de/plasma-gouging.html> , dostupno 09.04.2023.
- [13] Miller Welds, <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/how-to-select-and-operate-a-hand-held-plasma-cutter>, dostupno 09.04.2023.
- [14] PCS Profile Cutting System, <https://www.profilecuttingsystems.com/> , dostupno 09.04.2023.
- [15] BWS Ltd, <https://www.basicwelding.co.uk/products/pt-100-plasma-torch-gas-distributor>, dostupno 21.05.2023.
- [16] Predavanje iz kolegija Suvremene proizvodne tehnologije: ZAVARIVANJE / REZANJE PLAZMOM; Doc.dr.sc. Matija Bušić ; Sveučilište Sjever; Varaždin 2020
- [17] CLEANPNG, <https://www.cleanpng.com/png-plasma-cutting-welding-visual-software-systems-ltd-5781022/> , dostupno 10.04.2023.
- [18] Kerf Developments Ltd, What is Plasma cuttig, <https://kerfdevelopments.com/> , dostupno 10.04.2023.

- [19] Fabrication Guy, <https://fabricationguy.com/plasma-cutter-for-metal-art/> , dostupno 10.04.2023.
- [20] AZO Materials, Plasma Cutting - The History of Plasma Cutting, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1061> , dostupno 28.03.2023.
- [21] Ask Forney, <https://askforney.com/comprehensive-guide-to-plasma-cutting/> , dostupno 10.04.2023.
- [22] Hypertherm Associates Brand, Choosing an air plasma cutter, <https://www.hypertherm.com/en-US/> , dostupno 23.05.2023.
- [23] Hypertherm Associates Brand, What size air compressor do I need for my air plasma cutter? <https://www.hypertherm.com/en-US/> , dostupno 23.05.2023.
- [24] American Torch Tip, How to select your plasma cutter air compressor <https://americantorchtip.com> , dostupno 23.05.2023.
- [25] Gas Tech Products, <https://www.gastechproducts.com/product/plasma-cutter-cut-60-h-with-portable-compressor/> , dostupno 23.05.2023.
- [26] Messer Cutting System, Compressed Air cutting Benefits and Limitations, <https://in.messer-cutting.com/> , 23.05.2023.
- [27] Live science, Bakar, <https://www.livescience.com/29377-copper.html> , dostupno 23.05.2023.
- [28] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković: MATERIJALI 1, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2014.
- [29] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2009
- [30] Eurotehnika , Hypertherm® Powermax 30 AIR, <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/hypertherm-powermax-30-air/> , dostupno 17.08.2023.
- [31] Promotech, Rail Bull | Welding & cutting track carriage, <https://www.promotech.eu/en/product/rail-bull-welding-cutting-track-carriage-2/> , dostupno 17.08.2023.
- [32] Amatek store, Surtronic S-116, <https://store.ametek.co.uk/surtronic-s116-handheld-roughness/> , dostupno 17.08.2023.
- [33] Topomatika, INSPEKT kidalice - Uređaji za ispitivanje materijala i komponenti, <https://topomatika.hr/proizvodi/mehanicka-ispitivanja/hegewald-peschke-kidalice/> , dostupno 17.08.2023.
- [34] Hrvatski zavod za norme, Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi (ISO 6892-1:2016; EN ISO 6892-1:2016), <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+6892-1%3A2016> , dostupno 28.08.2023.

[35] International standard, Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature ISO 6892-1:2009, <https://regbar.com/wp-content/uploads/2019/09/ISO-6892-1-2009.pdf> , dostupno 30.08.2023.

[36] Autor - Dino Makovec

## Popis slika

Slika 1.1. CNC Plazma rezanje [3] .....	1
Slika 2.1. Radnik s plazma opremom 1957. godine [5].....	4
Slika 2.2. Početak plazma rezanja [6] .....	5
Slika 2.3. Ionizacija plazmenog plina [6] .....	6
Slika 2.4. Stvaranje glavnog luka iz pilot luka [6].....	6
Slika 2.5. Putanja plazmenog mlaza do radnog komada [6].....	7
Slika 2.6. Plazma rezanje [6] .....	7
Slika 2.7. Suhi postupak rezanja plazmom [8] .....	8
Slika 2.8. Postupak plazma rezanja sekundarnim plinom [8].....	9
Slika 2.9. Plazma rezanje s vodenom zaštitom [8] .....	10
Slika 2.10. Plazma rezanje ubrizgavanjem vode [8].....	10
Slika 2.11. Zračna komora vodenog plazma stola ispunjena zrakom [10] .....	11
Slika 2.12. Zračna komora vodenog plazma stola ispunjena zrakom [10].....	12
Slika 2.13. Plazma rezanje visoke tolerancije [8] .....	12
Slika 2.14. Plazma dubljenje (žlijebljenje) [12].....	14
Slika 2.15. Ručno plazma rezanje [13] .....	17
Slika 2.16. CNC plazma rezanje [14] .....	17
Slika 2.17. Dijelovi gorionika ručnog plazma rezača koji radi pomoću kompri. zraka [15]...18	
Slika 2.18. Sigurnosna odjeća, obuća i oprema kod plazma rezanja [17] .....	21
Slika 2.19. Umjetničko djelo izrađeno plazma rezačem [19] .....	22
Slika 3.1. Plazma rezanje pomoću komprimiranog zraka [21].....	24
Slika 3.2. Primjer prijenosnog sustava Plasma Cutter-Cut-60-H (Tank 50 L) [25] .....	26
Slika 4.1. Bakar [27] .....	27
Slika 5.1. Lim bakra Cu-ETP [36] .....	31
Slika 5.2. Hypertherm® Powermax 30 AIR [36] .....	32



Slika 5.3. Dijelovi Hypertherm® Powermax 30 AIR [30] .....	33
Slika 5.4. PROMOTECH Rail Bull [36] .....	34
Slika 5.5. AMETEK Taylor Hobson Surtronic S – 116 [36].....	35
Slika 5.6. INSPEKT Blue 20 [36].....	36
Slika 5.7. Priprema opreme i ploče prije samog plazma rezanja [36] .....	37
Slika 5.8. Uzorak 1 [36].....	38
Slika 5.9. Uzorak 2 [36].....	38
Slika 5.10. Uzorak 3 [36].....	38
Slika 5.11. Uzorak 6 [36].....	39
Slika 5.12. Uzorak 4 [36].....	39
Slika 5.13. Uzorak 5 [36].....	39
Slika 5.14. Uzorak 8 [36].....	40
Slika 5.15. Uzorak 7 [36].....	40
Slika 5.16. Uzorak 9 [36].....	40
Slika 5.17. Uzorak 10 [36].....	40
Slika 5.18. a) Ispitni uzorak prije ispitivanja, b) Ispitni uzorak nakon ispitivanja [35].....	41
Slika 5.19. Uzorak izrađen u Solid Edge 2023 s odgovarajućim dimenzijama [36] .....	42
Slika 5.20. Uzorak spreman za strojnu obradu glodanjem [36].....	43
Slika 5.21. Novi uzorci izrađeni strojnom obradom glodanja [36].....	43
Slika 5.22. Mjerenje hrapavosti uređajem AMETEK Taylor Hobson Surtronic S [36].....	44
Slika 5.23. Dijagram naprezanje $\sigma$ – istezanje $\varepsilon$ .....	45
Slika 5.24. Provjera dimenzija epruvete [36].....	46
Slika 5.25. Dijagram naprezanje $\sigma$ – pomak kidalice $\varepsilon$ dobivenih rezultata ispitivanja [36] ..	47
Slika 5.26. Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće [36].....	47

## Popis tablica

Tablica 1. Odabir odgovarajućeg plina plazma rezanja za određeni materijal [11] .....	13
Tablica 2. Nepravilnosti kod rezanja plazmom [16].....	19
Tablica 3. Karakteristična svojstva bakra [29] .....	29
Tablica 4. Karakteristike bakra Cu-ETP korištenog za eksperiment .....	30
Tablica 5. Karakteristike Hypertherm® Powermax 30 AIR [30].....	32
Tablica 6. Karakteristike uređaja PROMOTECH Rail Bull [31] .....	34
Tablica 7. Karakteristike INSPEKT Blue 20 [33] .....	36
Tablica 8. Rezultati rezanja uzoraka plazma rezačem .....	41
Tablica 9. Rezultati mjerenja srednje vrijednosti aritmetičkih odstupanja profila ( $R_a$ ).....	44
Tablica 10. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.....	46



## IZJAVA O AUTORSTVU

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, Dino Makovec (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Automatizirano plazma rezanje lima bakra Cu-ETP pomoću komprimiranog zraka (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

Dino Makovec (*upisati ime i prezime*)

(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. 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.

Sukladno čl. 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 znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.