

# Utjecaj parametara plazma rezanja na kvalitetu rezne površine pri rezanju aluminijske legure EN AW 1050A

---

Ričko, Ante

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:122:358940>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-29**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 097/STR/2023**

**Utjecaj parametara plazma rezanja na kvalitetu rezne  
površine pri rezanju aluminijske legure EN AW 1050A**

**Ante Ričko, 0069080659**

Varaždin, rujan 2023. godine





# Sveučilište Sjever

Diplomski sveučilišni studij Strojtarstvo

Diplomski rad br. 097/STR/2023

## **Utjecaj parametara plazma rezanja na kvalitetu rezne površine pri rezanju aluminijeve legure EN AW 1050A**

**Student**

Ante Ričko, 0069080659

**Mentor**

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Ante Ričko

IMBAG

DATUM 15.09.2023.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Utjecaj parametara plazma rezanja na kvalitetu rezne površine pri rezanju aluminijeva legure EN AW 1050A

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU The influence of cutting parameters on the cut quality in cutting of aluminium alloy EN AW 1050A

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc dr. sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Jasna Leder Horina, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenski član
- 5.

## Zadatak diplomskog rada

BRZO 097/STR2023

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog 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. Potrebno je usporediti plinove koji se koriste pri plazma rezanju

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je plazma rezanjem pomoću komprimiranog zraka rezati lim aluminijeva legure EN AW 1050A uz promjenu utjecajnih parametara prema izrađenom planu eksperimenta. Dobljene rezne površine potrebno je snimiti digitalnom kamerom te korištenjem programskog paketa ImageJ obraditi fotografije. Korištenjem digitalnih fotografija potrebno je izmjeriti kut skošenja brazdi na reznim površinama. 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 USUŠEN

19.09.2023.



M. Bušić

## **Predgovor**

Izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj rad koristeći znanja dobivena tijekom studija. Iskreno se zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Matiji Bušiću koji mi je svojim stručnim savjetima i uputama pomogao kod provedbe eksperimenta i izrade rada. Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji za konstantnu podršku i potporu tijekom školovanja.

Ante Ričko

## Sažetak

U prvom dijelu diplomskog rada bit će opisan teorijski dio. U uvodu se govori generalno o toplinskim postupcima rezanja kao što su plazma rezanje, lasersko rezanje i plinsko rezanje, te njihovim prednostima, nedostacima itd. Nadalje će se obrazložiti plazma kao agregatno stanje te će detaljno biti opisan proces plazma rezanja pri korištenju različitih zaštitnih plinova. Nabrajaju se različiti načini izvođenja plazma rezanja te se opisuju najvažniji parametri da bi se dobila najveća kvaliteta plazma rezanja aluminijske. Uza sve to, govori se o automatizaciji plazma rezanja, kakvi CNC sustavi se koriste, kako je moguće robotizirati plazma rezanja uz različite senzore i softvere za programiranje. Na kraju teorijskog dijela opisuju se ručni plazma uređaji te plazma uređaj korišten u provođenju eksperimenta.

Eksperimentalni dio pokazat će kakav utjecaj imaju parametri na kvalitetu rezne površine aluminijske EN AW-1050A, debljine 3 mm, plazma rezanjem sa komprimiranim zrakom. Eksperiment se proveo na način da su se prvo izrezali uzorci različitim jakostima struje i brzinama rezanja, zatim su uzorci obrađeni te se vrši računalna analiza kako bi se ustanovio utjecaj različitih parametara prilikom plazma rezanja. Izrezano je devet uzoraka, jakostima struje 20 – 25 A te brzinama rezanja 50 – 90 cm/min. Analizom se mjeri kut nagiba brazdi i količina troske nastale tijekom rezanja.

Na kraju rada odabrani su optimalni parametri jakosti struje i brzine rezanja te je donesen zaključak prema dobivenim rezultatima eksperimenta.

**Ključne riječi:** plazma rezanje, plazma, jakost struje, brzina rezanja, zaštitni plin, aluminij, analiza, količina troske, kut nagiba brazdi, plazmeni mlaz

## Summary

The theoretical part will be described in the first part of the thesis. In the introduction, thermal cutting processes such as plasma cutting, laser cutting and autogenous cutting, their advantages, disadvantages, etc. are discussed in general. Furthermore, plasma as an aggregate state will be explained and the process of plasma cutting using different protective gases will be described in detail. Different ways of performing plasma cutting are listed and the most important parameters are described in order to obtain the highest quality plasma cutting of aluminum. In addition to all that, we will talk about the automation of plasma cutting, what kind of CNC systems are used, how it is possible to robotize plasma cutting with different sensors and programming software. At the end of the theoretical part, manual plasma devices are described and the plasma device is used in conducting experiment.

The experimental part will show what influence the parameters have on the quality of the cutting surface of aluminum EN AW-1050A, 3 mm thick, by plasma cutting with air. The experiment was conducted in such a way that the samples were first cut with different current strengths and cutting speeds, then the samples were processed and a computer analysis was performed to determine the influence of different parameters during plasma cutting. Nine samples were cut, with currents of 20-25 A and cutting speeds of 50-90 cm/min. The analysis measures the angle of inclination of the furrows and the amount of slag produced during cutting.

At the end, optimal parameters are taken for different current strengths and cutting speeds, and a conclusion is written according to the obtained results of the experiment.

**Key words:** plasma cutting, plasma, current strength, cutting speed, shielding gas, aluminum, analysis, amount of slag, groove angle, plasma jet



## **Popis korištenih kratica**

<b>CNC</b>	eng. Computer Numerical Control
<b>MIG</b>	eng. Metal Inert Gas
<b>TIG</b>	eng. Tungsten Intert Gas

## Popis oznaka

Oznaka	Veličina	Jedinica
$I$	Jakost struje	A
$v$	Brzina rezanja	cm/min
$\beta$	Kut nagiba brazdi	°
$(H - 3mm)$	Količina troske	mm

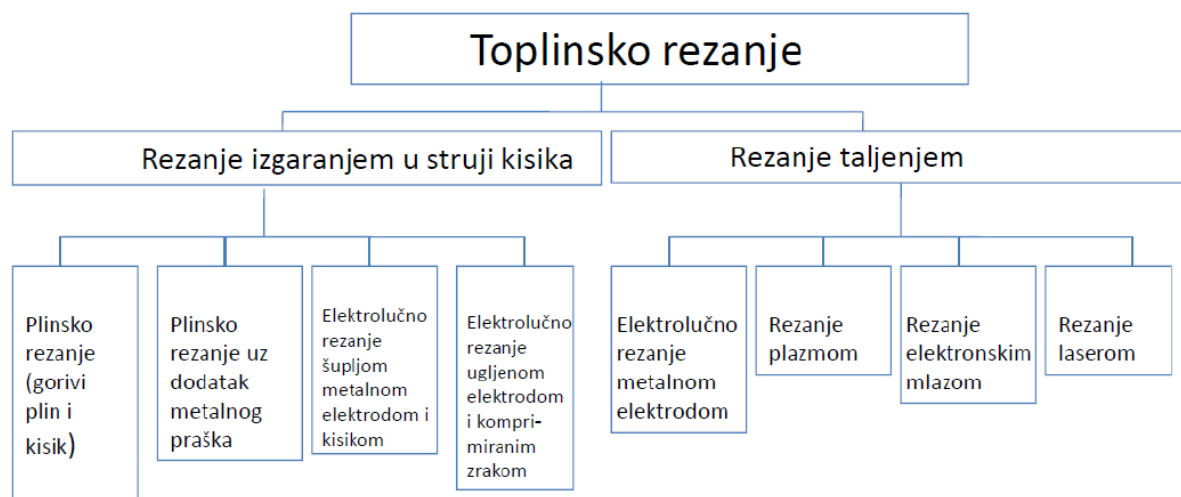
# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Plazma rezanje .....	3
2.1.	Plazma kao agregatno stanje .....	3
2.2.	Uvod u plazma rezanje .....	4
2.3.	Plazma rezanje prenesenim lukom .....	5
2.4.	Plazma rezanje neprenesenim lukom .....	6
2.5.	Parametri kod plazma rezanja .....	6
2.6.	Plinovi korišteni kod plazma rezanja .....	8
2.7.	Automatizacija plazma rezanja .....	9
2.7.1.	CNC sustavi .....	10
2.7.2.	Robotizirano plazma rezanje.....	10
2.7.3.	Senzori i softveri za programiranje.....	11
2.8.	Ručni plazma uređaji.....	11
3.	Eksperimentalni dio .....	13
3.1.	Karakteristike materijala EN AW-1050A .....	13
3.2.	Opis eksperimenta .....	14
3.3.	Priprema uzoraka.....	14
3.4.	Oprema za izvođenje eksperimenta.....	15
3.5.	Analiza rezne površine .....	16
4.	Analiza rezultata .....	23
5.	Zaključak.....	27
6.	Literatura.....	29
	Popis slika .....	31
	Popis tablica.....	32

# 1. Uvod

Toplinski postupci rezanja koriste toplinu za rezanje materijala. Postoje različite tehnike toplinskog rezanja, a neke od najčešćih su lasersko rezanje, plazma rezanje i plinsko rezanje. Na slici 1 prikazana je podjela toplinskih postupaka rezanja.

Kad govorimo o laserskom rezanju, ono koristi visoko koncentrirani snop svjetlosti kako bi se izvršila obrada materijala. Laser generira usmjereni snop svjetlosti koji ima dovoljno energije da rastali materijal. Ovisi koji laser se koristi ili koji materijal se obrađuje, lasersko rezanje može biti vrlo precizno čime se omogućuje rezanje različitih materijala kao što su metali, polimeri, tkanina i slično. U industriji, lasersko rezanje koristi se zbog visoke preciznosti i brzine rada.



Slika 1. Podjela toplinskih postupaka rezanja [1]

Plazma rezanje je postupak u kojem se koristi plazma, visokoenergetski ionizirani plin kako bi se izvršila obrada materijala. U gorioniku za plazma rezanje stvara se električna iskra između elektrode i radnog komada pritom stvarajući plazmeni mlaz. Plazmeni mlaz ima visoku temperaturu te je sposoban rastaliti metal i rezati ga. Plazma rezanje vrlo je efikasno kod rezanja metala kao što su čelik, nehrđajući čelik, aluminij itd.

Kod plinskog rezanja koristi se kombinacija kisika i gorivog plina, najčešće acetilen, kako bi se stvorio plazmeni mlaz visoke temperature za rezanje materijala. Kisik se dovodi u dodir s

gorivom gdje se stvara plazmeni mlaz visoke temperature koji može taliti metal. Često se koristi kod rezanja debljih materijala.

Svaka od navedenih metoda ima svoju primjenu i svoje prednosti u industriji. Odabir adekvatnog postupka rezanja ovisi o materijalu koji se reže, debljini materijala, preciznosti te brzini rada. Pravilno korištenje toplinskih postupaka rezanja zahtijeva visoku stručnost te poznavanje sigurnosnih mjera, zato što visoke temperature, plinovi i iskre predstavljaju visoku opasnost. Uz konstantan napredak tehnologije, toplinski postupci rezanja kontinuirano se razvijaju, primjerice, plazma rezanje koristi naprednije sustave kojima se postiže visoka preciznost te se omogućuje obrada različitih oblika. Navedeni postupci rezanja imaju široku primjenu. Tako primjerice, u auto industriji, plazma i lasersko rezanje koriste se za izradu karoserija i dijelova motora. U metalnoj industriji, toplinski postupci rezanja koriste se za rezanje i oblikovanje metala u različite oblike.

Iako su toplinski postupci rezanja visoko rašireni u industriji oni uz svoje prednosti imaju i nekoliko nedostataka. Primjerice, rezanjem se mogu ostaviti tragovi toplinske deformacije na materijalu, što uvelike može utjecati na strukturu i čvrstoću. Brzina rezanja može biti ograničena kod određenih materijala i debljina.

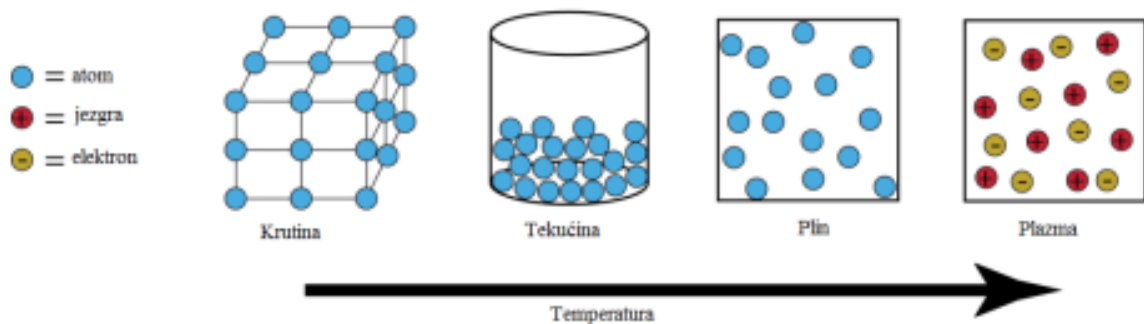
Uz navedene postupke rezanja, razvile su se i druge tehnike rezanja poput vodenog mlaza, ultrazvučnog rezanja i slično. Svaka tehnika ima svoje prednosti i nedostatke ovisno o njezinoj primjeni. Toplinski postupci su alat od velike važnosti u industriji za obradu materijala. Stalno se usavršavaju i prilagođavaju zahtjevima privrede, omogućujući precizno i učinkovito rezanje različitih materijala [2].

## 2. Plazma rezanje

### 2.1. Plazma kao agregatno stanje

Plazma je jedno od četiri agregatna stanja tvari (Slika 2), ionizirano stanje plina. Sadrži neutralne atome te jednak broj pozitivnih iona, čime je ona električki neutralna. Zagrijavanjem čvrste tvari molekule vibriraju gdje se snažno sudaraju do one faze kada krutina počinje s pretvorbom u tekuće stanje. Dodavanjem više energije sustavu, kretanje je sve brže gdje se molekule počinju sve jače sudarati pa se na kraju odvoje te stvaraju plin. Ukoliko se plinu doda još više energije, molekule se sudaraju još jače te putuju još brže gdje se naposljetku plin pretvara u plazmu.

Plazma se može stvarati u laboratorijskim uvjetima metodom plinskog pražnjenja koje je izazvano protjecanjem struje kroz djelomično ionizirani plin, između dvije elektrode. Proizvodnjom plazme u laboratorijskim uvjetima mogu se dobiti male količine [3].



Slika 2. Agregatna stanja [4]

## 2.2. Uvod u plazma rezanje

Temelj plazma rezanja jest metoda gdje plazmeni plin prolazi kroz električni luk pri čemu dolazi do disocijacije i ionizacije plina.

Plazma rezanje je toplinska tehnika rezanja koja koristi plazmu kako bi se vršilo rezanje. Proces plazma rezanja započinje stvaranjem električne iskre između volframove elektrode i radnog komada. Električni luk se uspostavlja između elektrode spojene na (-) pol istosmjerne struje i radnog komada ili savnice. Plazmeni plin prolazi kroz električni luk te se zagrijava, disocira i ionizira te izlazi iz električnog luka u obliku plazmenog mlaza. Plazmeni mlaz ima jako veliku temperaturu, obično oko 25 000°C što je i više nego dovoljno da rastali metal i omogući njegovo rezanje.

Kako bi uspostavili proces plazma rezanja, potrebno je izvršiti sljedeće postupke:

### 1. Priprema plazma rezača:

To uključuje provjeru opreme, osiguravanje elektrode u upotrebljivom stanju, provjeru napajanja i plinove, tj njihove kable.

### 2. Priključivanje izvora napajanja:

Nakon što je plazma rezač pripremljen, nadalje je potrebno priključiti izvor napajanja. Plazma rezač se napaja električnom energijom te može zahtijevati sustav napajanja koji mora pružiti potrebnu snagu za generiranje plazme. Potrebno je provesti sigurnosne korake kako ne bi došlo do zakazivanja sustava.

### 3. Odabir plinova:

Da bi se stvorila plazma, potrebno je odabrati odgovarajući plin ovisno o materijalu koji se reže. Za rezanje čelika ili aluminija najčešće se koristi komprimirani zrak dok se za rezanje nehrđajućeg čelika koristi argon.

### 4. Paljenje plazma rezača:

Nakon što se uspješno prođu prethodna tri koraka, upali se generator visokog napona pri čemu se razvije plazmeni mlaz.

### 5. Postavljanje parametara rezanja:

To uključuje odabir odgovarajuće brzine rezanja, struje, protoka plina te drugih parametara koji su specifični ovisno o materijalu i debljini koja se reže.

### 6. Provjera i podešavanje:

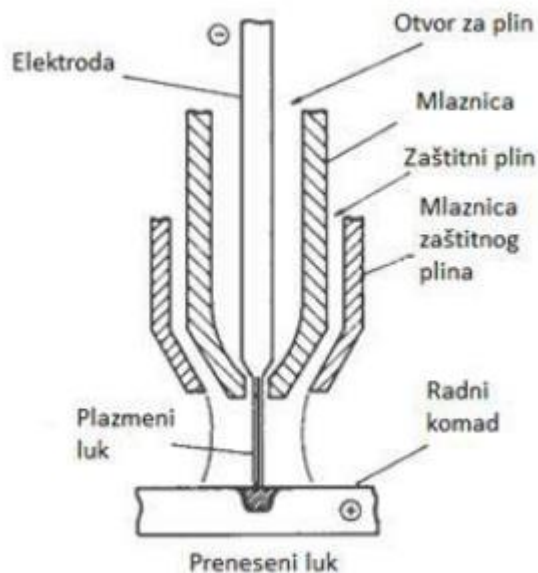
Prije početka rezanja, operater mora provjeriti je li plazma stabilna te da nema neželjenih oscilacija i smetnji. Također, potrebno je provjeriti ispravnost provođenja električne energije kroz plazmu i ostalih parametara rezanja, ukoliko je potrebno, vrše se

dotatne prilagodbe parametara rezanja kako bi se osigurala najviša kvaliteta i učinkovitost rezanja.

Plazma rezanje može se izvoditi koristeći preneseni luk (engl. transferred arc) ili nepreneseni luk (engl. non-transferred arc). Razlika između ove dvoje metode jest u načinu uspostavljanja i korištenju električnog luka u plazma rezaču [5] [6].

### 2.3. Plazma rezanje prenesenim lukom

U prenesenom luku kod plazma rezanja, električni luk se uspostavlja između netaljive elektrode (katode) i radnog komada (anode). Električni luk prelazi preko male udaljenosti između elektrode i radne površine materijala gdje elektroni u luku prelaze kroz zračni prostor te stvaraju plazmeni mlaz visoke temperature. Plazmeni mlaz zagrijava metal (radni komad) te ga tali, a protok plina plazme izbacuje rastaljene ostatke iz reznog područja. Plazma rezanje prenesenim lukom često se koristi kod rezanja debljih materijala te ima širok raspon primjene. Na slici 3 je prikazana shema plazma rezanja prenesenim lukom[7].

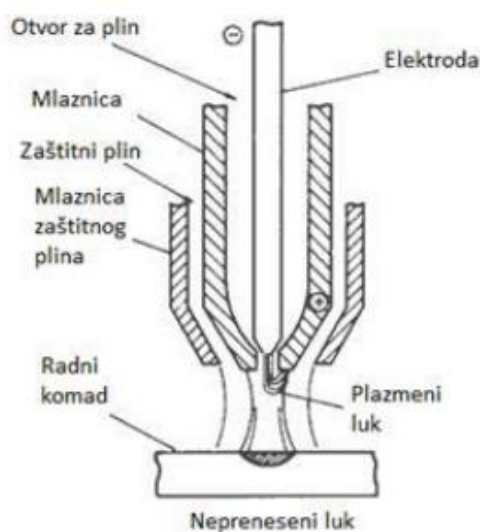


Slika 3. Shema plazma rezanja prenesenim lukom[7]



## 2.4. Plazma rezanje neprenesenim lukom

U neprenesenom luku kod plazma rezanja, električni luk se uspostavlja između elektrode (katoda) i mlaznice (anoda). Električni luk se drži unutar mlaznice plazma rezača, dok plazmeni mlaz visoke temperature izlazi kroz otvor mlaznice te se usmjerava prema radnom komadu. Nepreneseni luk se često koristi za manje debljine materijala te kod rezova koji moraju biti visoke kvalitete, tj za finije rezove. Kako se električni luk ne prenosi na radni komad, ova tehnika se može koristiti kod rezanja materijala koji su električno izolirani ili kada je teže ostvariti fizički kontakt s radnim komadom. Na slici 4 prikazana je shema plazma rezanja neprenesenim lukom [7].



Slika 4. Shema plazma rezanja neprenesenim lukom [7]

## 2.5. Parametri kod plazma rezanja

Kod plazma rezanja postoji puno parametara koje treba pravilno postaviti da bi osigurali uravnotežen i stabilan proces, uz to su također i zahtijevani kvalificirani operateri. Najbitniji parametri su:

1. Promjer unutarnje sapnice ( od 0,6 mm do 4 mm )

Ovisi o količini energije kojoj se teži te o širini reza. Tanjim materijalom, manji je i promjer sapnice.

2. Promjer vanjske sapnice

Ona usmjerava zaštitni plin. Najčešće se vrši prilagodba prema obliku proizvoda da bi se zaštitilo zagrijano područje u potpunosti.

### 3. Jakost struje

Što je debljina materijala veća tada se i javlja potreba za većom penetracijom što znači da se povećava jakost struje rezanja. Područje primjene je od 0,1 A do 300 A, u nekim slučajevima i do 500 A.

### 4. Jakost struje pilot luka

Vrlo česta primjena do 10 A. Kod starijih uređaja fiksna vrijednost, dok je kod novih uređaja ona varijabilna.

### 5. Promjer volframove elektrode

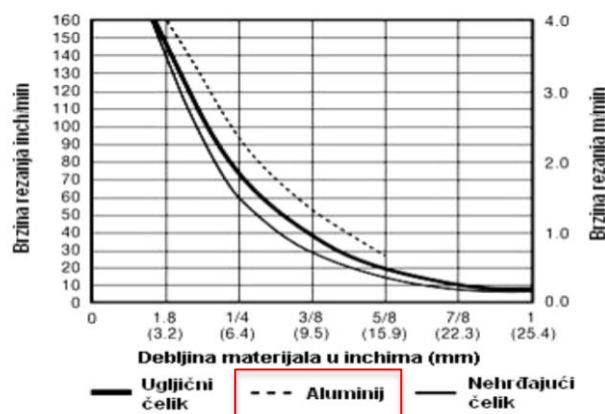
Kod manjih struja koristi se manji promjer elektrode, dok se kod većih struja koristi veći promjer elektroda.

### 6. Protok plazmenog plina

Što je protok plazmenog plina veći, raste i kinetička energija plazme koja uvelike utječe na penetraciju. U praksi ti protoci ovise o jačini struje, debljini materijala i o promjeru sapnice.

### 7. Brzina rezanja

Brzina rezanja je bitan faktor koji ima veliki utjecaj na kvalitetu reza te na pojavu srha na materijalu. Ukoliko je brzina rezanja prevelika, tada nastaju stepeničaste brazde s velikim nagibom reza gdje se uz to pojavljuje srh na donjoj strani materijala, što rezultira naknadnom obradom brušenja da bi se uklonio srh. Ako je brzina rezanja premala tada je širina reza veća. Rastaljeni materijal se ne može otpuhati pa se on nakuplja na donjoj strani materijala, što je lako uklonjiv srh. Kako bi se odredila optimalna brzina rezanja, potrebno je promatrati nagib luka u odnosu na radni materijal. Nagib luka bi morao biti vertikalnan u odnosu na radni komad, tj nagib na izlaznom bridu mora biti otprilike jednak nuli. Na slici 2.4 prikazan je dijagram koji pokazuje ovisnost brzine rezanja o debljini materijala. Za potrebe ovog eksperimenta korišten je aluminij EN AW-1050A.



Slika 5. Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [1]

## 8. Nagib i udaljenost pištolja

Primjenom lijevog i desnog nagiba može se utjecati na oblik reza. Udaljenost od radnog komada je 1 do 5 mm koja ovisi o jačini struje, količini taline itd. Ako se sapnica previše približi radnom komadu, dolazi do kratkog spoja što rezultira prekidom plazmenog mlaza [8].

## 2.6. Plinovi korišteni kod plazma rezanja

Izbor plazma plinova odnosi se na sve dostupne plinove ili plinske mješavine koji se koriste za stvaranje plazme i sam proces rezanja. Različiti materijali različitih debljina zahtijevaju rezanje plazmom s odgovarajućim medijem. Korišteni medij (npr. plin) može biti element ili mješavina. Da bi izbjegli naknadnu obradu nakon plazma rezanja, potrebno je odabrati odgovarajući plazma plin. Kao takav, plin može utjecati na elemente kvalitete kao što su hrapavost reza, pravokutnost reza itd.

Najčešće korišteni plinovi su:

**DUŠIK** – Da bi dušik prešao u plazmu, zahtijeva se korištenje većeg napona električne struje zbog čega ima veću energiju. Na 7 500°C plazmeni mlaz ima više energije nego neki drugi plinovi pri istoj temperaturi. Kod rezanja nehrđajućeg čelika i aluminijske kvaliteta reza je visoka, dok je kod rezanja ugljičnih čelika kvaliteta reza irelevantna.

**ARGON** – To je plin koji ima manju količinu energije u odnosu na neke plinove. Česta upotreba mješavine Argon/Kisik koristi se za postizanje bolje kvalitete reza na aluminiju ili nehrđajućim čelicima. Ukoliko u mješavini ima previše vodika, gornja strana radnog komada bit će glatka, a na donjoj strani reza pojaviti će se troska. Argon omogućuje nešto lakše uspostavljanje stabilnog električnog luka ali se rijetko koristi zbog povišene cijene.

**ZRAK** – To je najčešće korišteni plazmeni plin koji je lako dostupan. Kvaliteta reza je solidna kod većine materijala, dok kod ugljičnih čelika može doći do pojave oksidacije. Moguća je pojava poroznosti pri rezanju zbog nakupljanja na rubovima reza.

**KISIK** – Korištenjem kisika postiže se najviša kvaliteta reza kod rezanja ugljičnih čelika koji imaju relativno dobru zavarljivost i deformabilnost. Kisik smanjuje viskoznost taline, stoga se postiže i bolje ispuhivanje. Kod plazma rezanja, kisik se koristi sam ili u mješavini s dušikom.

VODIK – Plin koji se koristi u kombinaciji s drugim plinovima jer se kod gušćih plinova zahtijeva veći napon ionizacije. Ima visoku toplinsku vodljivost i dobar prijenos topline. Vodik se dodaje argonu za povećanje brzine rezanja i dobivanje dobre kvalitete reza.

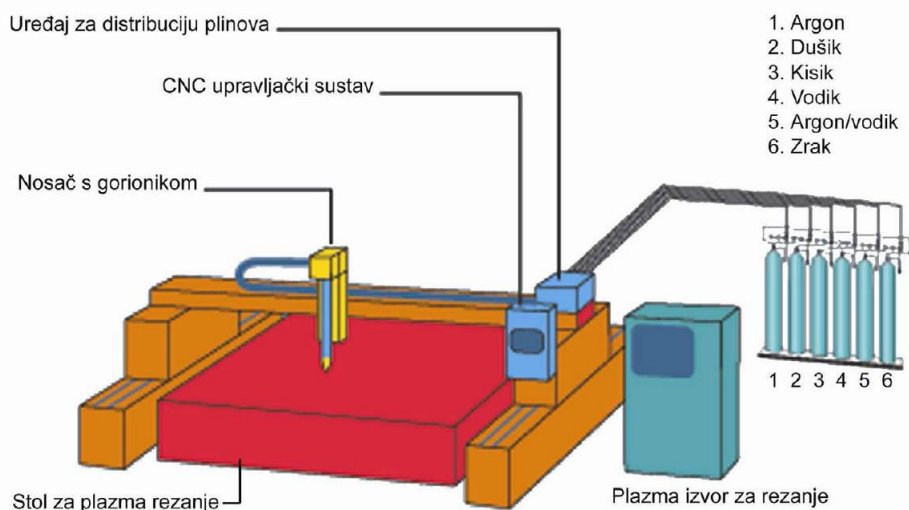
Plinovi i plinske mješavine kod plazma rezanja aluminijskih i aluminijevih legura sa sekundarnim/zaštitnim plinovima su prikazani u tablici 1 i oni su u skladu s normom EN ISO 14175:2008. Sekundarni/zaštitni plinovi nisu obavezni ali mogu uvelike uvećati kvalitetu i ekonomičnost reza [9].

Tablica 1. Plinovi i njihove mješavine kao plazmeni plinovi [10]

Materijal	Plazmeni plin	Sekundarni/zaštitni plin
Aluminij i aluminijeve legure	zrak	zrak
	zrak	dušik + vodik
	argon + vodik	zrak
		dušik

## 2.7. Automatizacija plazma rezanja

Automatizacija rezanja je postupak u kojem se koriste automatizirani sustavi i tehnologije kako bi se izvršilo rezanje materijala s minimalnim ljudskim intervencijama. Ova metoda donosi brojne prednosti u smislu povećane produktivnosti, točnosti i učinkovitosti procesa rezanja. Često se koristi u industriji, a najviše u metalurškom sektoru. Na slici 6 prikazan je pojednostavljeni prikaz automatiziranog vođenja plazma rezača.



Slika 6. Automatizirano plazma rezanje [11]

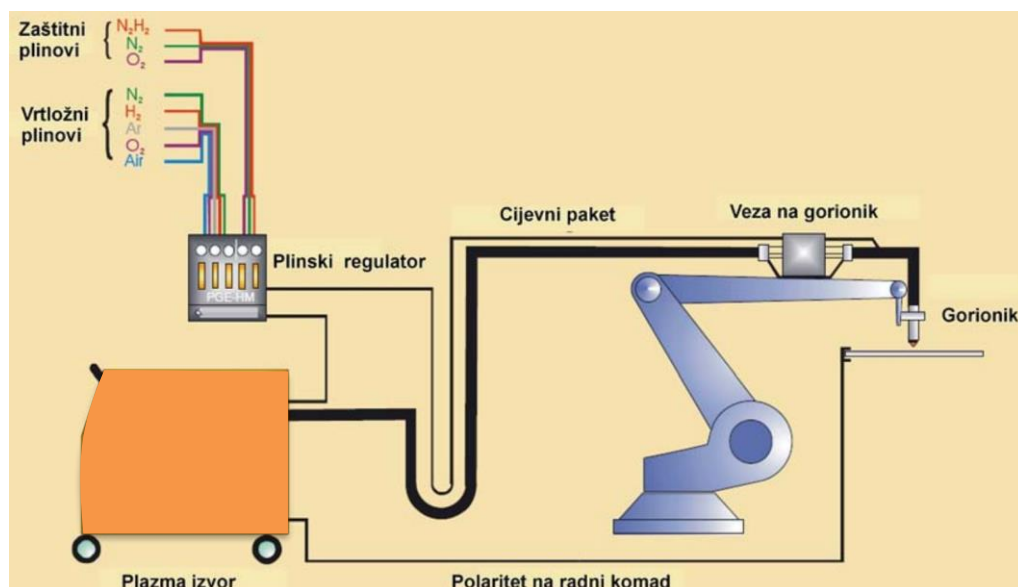
Neki od ključnih čimbenika automatizacije su: CNC (engl. Computer Numerical Control) sustavi, robotizirano plazma rezanje, programski paketi za programiranje, senzori i slično [12].

### 2.7.1. CNC sustavi

CNC sustavi su temelj automatizacije rezanja. CNC strojevi koriste računalne programe i numeričke podatke kako bi se upravljalo pokretima plazma rezača te da bi se izvršili precizni rezovi prema definiranim parametrima. Tim sustavima se omogućuje visoka ponovljivost, brzo podešavanje i programiranje različitih oblika [12].

### 2.7.2. Robotizirano plazma rezanje

Umjesto upotrebe statičkog plazma rezača, automatizacija uključuje korištenje industrijskih robota za izvođenje plazma rezanja. Oni pružaju fleksibilnost u smislu mogućnosti izvođenja složenih rezova, rad na različitim geometrijama materijala i obavljanje preciznih operacija. Robotski rezači se integriraju u automatizirane proizvodne linije za kontinuirano i učinkovito rezanje te se time smanjuje vjerojatnost ljudske pogreške. Na slici 7 prikazan je sustav koji koristi robot kod plazma rezanja [12].



Slika 7. Plazma rezanje korištenjem robota [13]

### **2.7.3. Senzori i softveri za programiranje**

Automatizacija plazma rezanja koristi različite senzore kako bi se postigla preciznost i pouzdanost rezanja. Senzori mogu detektirati položaj i orijentaciju materijala, pratiti visinu plazmenog mlaza tijekom rezanja i nadzirati brzinu i kvalitetu rezanja.

Kod automatizacije plazma rezanja zahtijevana je upotreba odgovarajućeg softvera za programiranje. Ovaj softver omogućuje korisniku definiranje parametara rezanja, crtanje ili uvoz skica i generiranje G-koda koji upravlja CNC strojem ili robotom. Također, ovi softveri omogućuju optimizaciju rezanja, raspoređivanje dijelova na limu radi smanjenja otpada materijala [12].

### **2.8. Ručni plazma uređaji**

Ručni plazma uređaji su prijenosni plazma rezači koji se koriste za ručno rezanje materijala. Ovim uređajima otvara se mogućnost operaterima da izvode rezanje na terenu ili na lokacijama gdje nisu dostupni konvencionalni plazma uređaji.

Ručni plazma uređaji su kompaktni i lagani, što omogućuje jednostavno nošenje i korištenje na različitim mjestima, idealni za rad na terenu gdje je mobilnost vrlo važna. Oni su relativno jednostavni za korištenje, a operateri se vrlo brzo mogu naučiti osnovama rezanja. Imaju jednostavne kontrole te sučelje koje omogućuje podešavanje parametara rezanja. Visokoenergetski plazmeni mlaz omogućuje efikasno i precizno rezanje materijala, čime se smanjuje vrijeme potrebno za rezanje. Kod plazma rezanja ručnim uređajem kao plazmeni plin se koristi komprimirani zrak bez zaštitnog plina. Ručni plazma uređaji mogu rezati različite materijale kao što su nehrđajući čelik, aluminij, čelik te različite legure. Ovisno o snazi i kapacitetu uređaja može se rezati i različita debljina materijala. Na slici 8 prikazan je klasičan primjer ručnog plazma uređaja.

Trošak ovih uređaja jest relativno nizak te se oni obično mogu koristiti za različite svrhe, primjerice, rezanje, označavanje itd.



Slika 8. Primjer ručnog plazma uređaja [14]

Za potrebe eksperimenta korišten je profesionalni plazma sustav Hypertherm Powermax 30 AIR. Uređaj dolazi s integriranim kompresorom zraka koji pročišćava i uklanja vlagu iz zraka. Ručni sustav za plazma rezanje koji se može koristiti gdje god je dostupan jednofazni priključak. Sa plazma sustavom Hypertherm Powermax 30 AIR moguće je rezati limove ugljičnog čelika do 16 mm te limove nehrđajućeg čelika i aluminija do 13 mm. Najveća jakost struje uređaja jest do 30 A, ostale karakteristike prikazane su u tablici 2. Uređaj je opremljen tehnologijom automatskog napona koja pruža mogućnost struji da automatski prilagodi napon ulaznoj snazi kada je za to potrebno [15] [16].

Tablica 2. Karakteristike uređaja Hypertherm Powermax 30 AIR [16]

Ulazni napon	<b>120 – 240 V, 50/60Hz</b>
Ulazna struja (2,5 kW)	<b>120 – 240 V, 29 – 15 A</b>
Izlazna struja	<b>15 – 30 A</b>
Radni ciklus (40°C)	<b>35%, 240 V</b>
	<b>20%, 120 V</b>
Dimenzije s drškama	<b>420 mm (D) x 195 mm (Š) x 333 mm (V)</b>
Masa (s gorionikom od 4,5m)	<b>13,5 kg</b>
Potrebna snaga motora	<b>5,5 kW (30 A izlaz)</b>

### 3. Eksperimentalni dio

#### 3.1. Karakteristike materijala EN AW-1050A

Za potrebe eksperimenta korišten je materijal pod nazivom EN AW-1050A, debljine 3 mm, nelegirani valjani aluminijski lim koji se ne može toplinski obrađivati. Materijal se sastoji od 99,5% aluminija uz dodatke željeza, bakra, magnezija itd. Točni sastav materijala prikazan je u tablici 3 [17].

Tablica 3. Kemijski sastav materijala EN AW-1050A [17]

Al (%)	Si (%)	Fe(%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg(%)	Zn (%)	Ti (%)	Ostalo (%)
99,5	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,03

Što se tiče korozijske otpornosti, 1050A pruža vrlo dobru otpornost na koroziju u normalnom, industrijskom ili morskom okruženju. Zavarivanje 1050A se može lako izvoditi koristeći MIG (engl. Metal Inert Gas) ili TIG (engl. Tungsten Intert Gas) postupcima zavarivanja uz korištenje dodatnih materijala koji su sličnih karakteristika. Kvaliteta zavara će biti velika, ali sve ovisi o tipu zavara i debljini materijala. Iz tablice 4. je vidljivo da su mehanička svojstva materijala niska, ali se može koristiti tamo gdje nisu zahtjevana visoka mehanička svojstva.

Tipična primjena materijala:

- kemijska industrija,
- farmaceutska industrija,
- tlačne posude,
- arhitektura,
- kuhinjsko posuđe,
- automobilska industrija itd [17].

Tablica 4. Mehanička svojstva materijala EN AW-1050A [17]

Svojstvo	Mjerna jedinica	Vrijednost
Vlačna čvrstoća	MPa	100-135
Granica razvlačenja	MPa	min. 75
Smična čvrstoća	MPa	70
Tvrdoća po Brinell-u	HB	35
Toplinska vodljivost	W/mK	229
Modul elastičnosti	MPa	69000



## 3.2. Opis eksperimenta

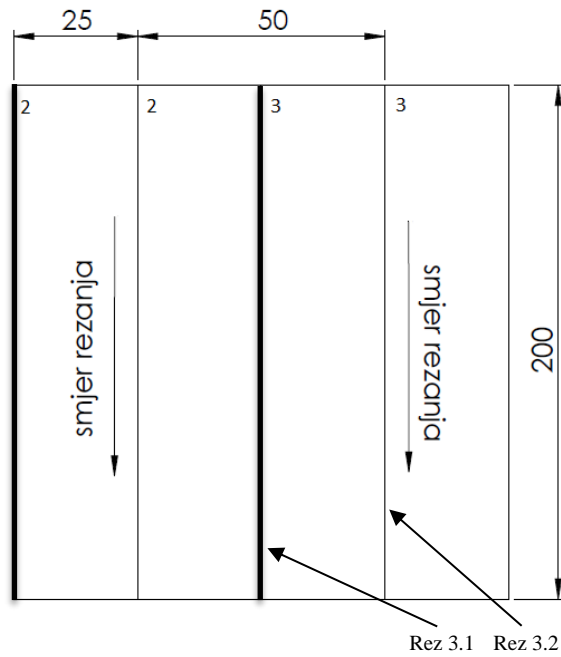
Eksperiment je proveden u laboratoriju na Sveučilištu Sjever, konvencionalnim plazma rezanjem u atomosferskim uvjetima. Materijal korišten za potrebe eksperimenta opisan je u poglavlju 3.1, EN AW-1050A, debljine 3 mm. Ispitivanje je provedeno plazma rezanjem devet uzoraka s promjenjivim parametrima, to su *brzina rezanja v* i *jakost struje I*. Po završetku rezanja, uzorci su slikani te je na njima provedena računalna analiza kako bi se vidio utjecaj parametara koji su smanjivani ili povećavani. Cilj eksperimenta bio je da se provede analiza kako promjena parametara utječe na kut nagiba brazdi na površini reza te pri kojim parametrima se pojavljuje najveća količina troske.

Koraci kod provedbe eksperimenta:

1. Priprema ispitnih uzoraka
2. Rezanje uzoraka
3. Računalna analiza – mjerenje kuta nagiba brazdi
4. Računalna analiza – mjerenje količine troske materijala
5. Sumiranje i obrada rezultata
6. Zaključak na temelju rezultata

## 3.3. Priprema uzoraka

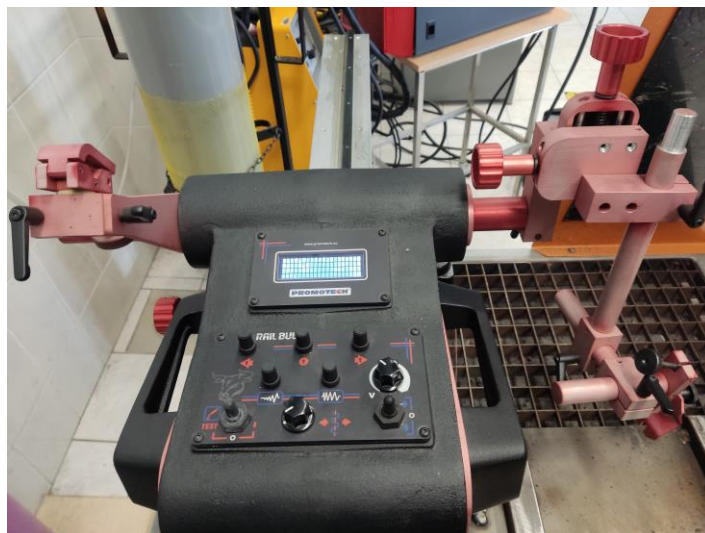
Uzorci korišteni u eksperimentu su dimenzija 50 mm x 200 mm, rezani plazma rezačem, prikazani na slici 3.1. Oni su označeni brojevima i ravnim linijama u razmaku od 50 mm. Linije na uzorcima kasnije su i korištene za pozicioniranje plazma pištolja, tj. za smjer kretanja pištolja koji se kreće linearno. Za svaku odabranu *brzinu rezanja v* i *jakost struje I* režu se dva uzorka koji će naknadno biti obrađeni.



Slika 9. Ispitni uzorak

### 3.4. Oprema za izvođenje eksperimenta

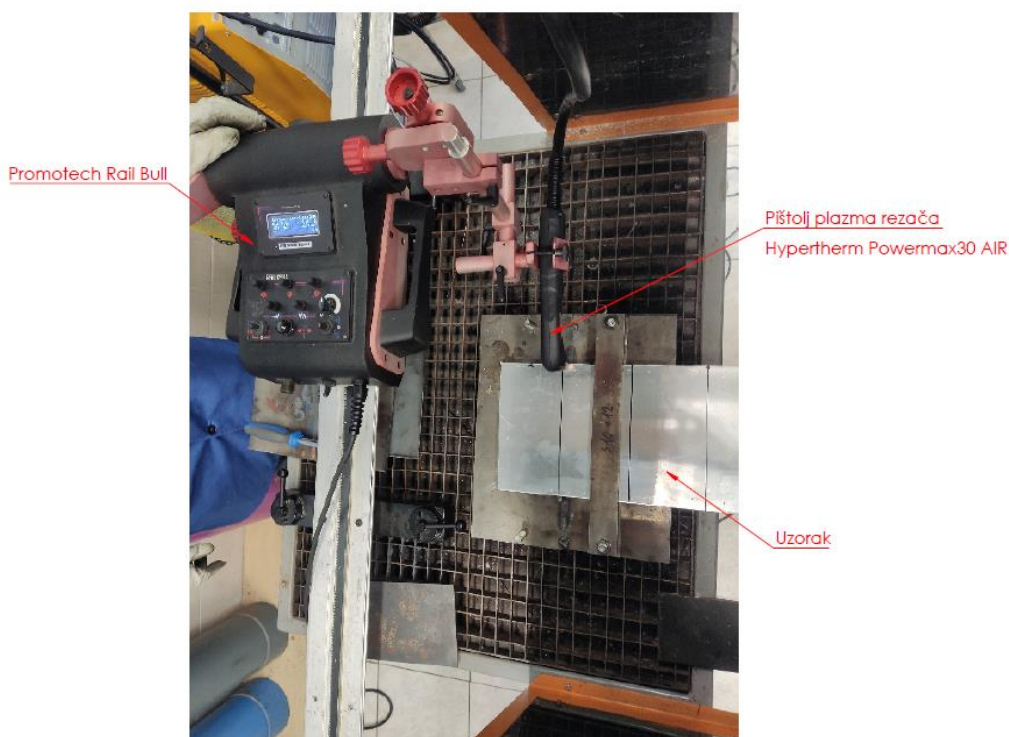
Plazma rezanje uzoraka provedeno je Hyperthem Powermax30 AIR, ručnim plazma rezačem na zrak koji je detaljnije opisan u poglavlju 2.8. Pištolj ručnog plazma rezača bio je pričvršćen u uređaj *Promotech Rail Bull* (slika 10), koji je poslužio za ravno kretanje plazma pištolja po površini uzoraka.



Slika 10. Promotech Rail bull

Rail Bull je uređaj koji se može koristiti kod rezanja ili zavarivanja. Može se koristiti u vertikalnom ili horizontalnom položaju, kod zavarivanja u položajima PA (ravno), PB

(horizontalno-vertikalno), PC (horizontalno), PD (iznad glave horizontalno-vertikalno), PE (iznad glave), PF (vertikalno-gore), i PG (vertikalno-dolje). Rail bull se kreće duž krute ili polufleksibilne tračnice pomoću zupčaste letve i tračnicama pričvršćenim na ravne ili zakrivljene površine pomoću magnetskih ili vakuumskih jedinica. Udaljenost između pištolja i uzoraka bio je 1 mm i ona je konstantna za svih devet uzoraka. Na slici 11 prikazan je sustav korišten za rezanje uzoraka [18]



Slika 11. Sustav korišten za rezanje uzoraka

Provođenje eksperimenta se provodilo prema promjenjivim parametrima, *brzine rezanja*  $v$  i *jakosti struje*  $I$ . Po završetku rezanja uzoraka radi se analiza reznih površina u računalnom softveru *ImageJ*.

### 3.5. Analiza rezne površine

Analiza reznih površina provedena je na osobnom računalu u softveru *ImageJ*. Softver ima mnogo opcija, kao što su crtanje različitih oblika za označavanje određenih stvari na slici, mjerenje udaljenosti, kutova, izoštravanje slika i tome slično. Uzorci su slikani na Sveučilištu Sjever fotoaparatom visoke rezulucije, gdje je svakom uzorku dodana milimetarska skala na površini reza. Slike su prebačene u crnu-bijelu boju da bi se jasnije vidjele brazde na uzorcima. Podešene su još neke postavke kao što su kontrast, oštrina i slično da bi se brazde što jasnije vidjele te kako

bi se lakše odredio kut nagiba brazdi. Analiza se radila isto na svih devet uzoraka prikazanih u tablici 5 sa promjenjivim parametrima [19].

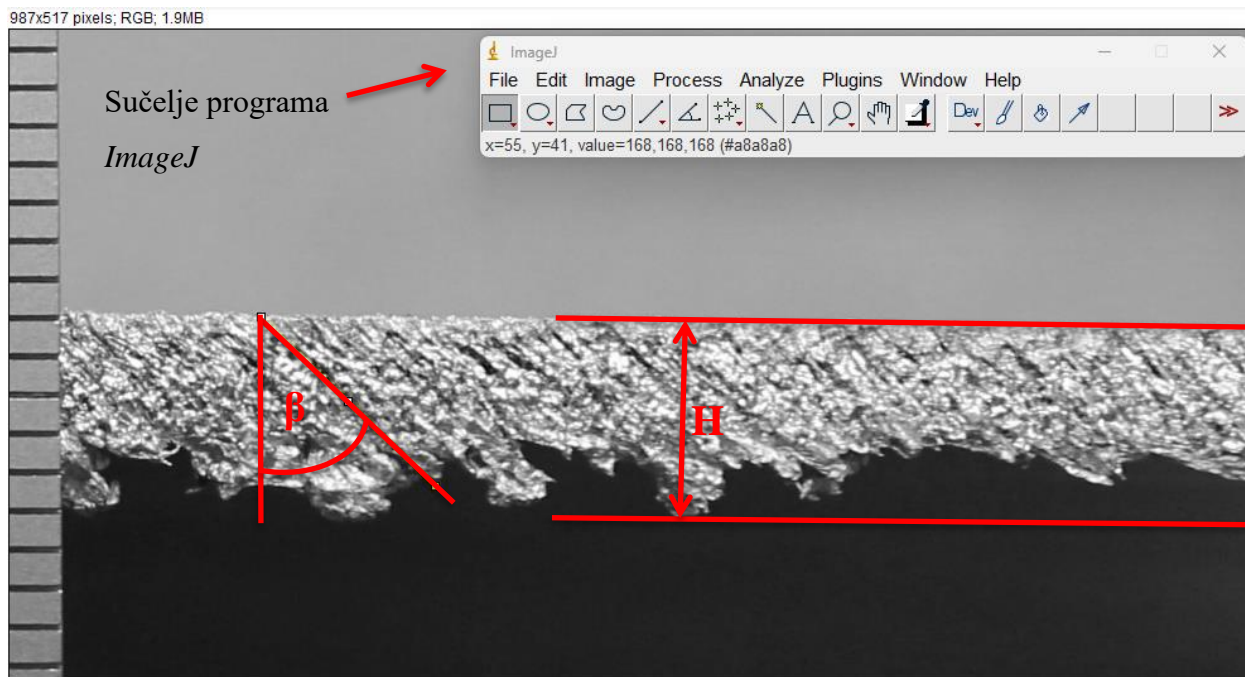
Tablica 5. Parametri rezanja devet uzoraka

1050A – lim 3 mm	Plin	Brzina rezanja v, cm/min	Udaljenost pištolja od uzorka	Jakost struje I, A	Uzorak prerezan DA/NE
Uzorak 1	Komprimirani zrak	50	1 mm	20	DA
Uzorak 2		60		25	DA
Uzorak 3		80		25	DA
Uzorak 4		80		20	NE
Uzorak 5		60		20	DA
Uzorak 6		50		25	DA
Uzorak 7		70		25	DA
Uzorak 8		90		25	DA
Uzorak 9		70		20	DA

Za potrebe eksperimenta bilo je predviđeno mjerenje hrapavosti reznih površina, ali kako je hrapavost reznih površina aluminija bila velika što se moglo osjetiti i na dodir, nije ju moguće bilo mjeriti zbog ograničenja uređaja za mjerenje hrapavosti. Po završetku rezanja, uočljivo je da uzorci imaju izraženiji kut nagiba brazdi i veliku količinu troske na donjoj strani reza. Na slici 12 prikazan je način kojim se određuje kut  $\beta$ , tj kut nagiba brazdi. Na svakom uzorku mjere se tri različita kuta nagiba brazdi te se uzima srednja vrijednost kao rezultat.

Slika 12 također prikazuje princip određivanja količine troske. Troska je šljaka koja nastaje kada se tali metal te se on ponovno stvrdne i ne izbacuje se iz reza. Veća količina troske može uzrokovati manju kvalitetu kod plazma rezanja, ali ukoliko se koriste dobri parametri rezanja može se povećati kvaliteta reza te samim time smanjiti troškove.

Okomica s gornje površine uzorka poteže se sa najvišom točkom troske te se mjeri visina H. Od dobivene visine oduzimamo debljinu materijala koja iznosi 3 mm te tako dobivamo količinu troske. Mjerenje količine troske vrši se na dva različita mjesta te se srednja vrijednost uzima kao rezultat.



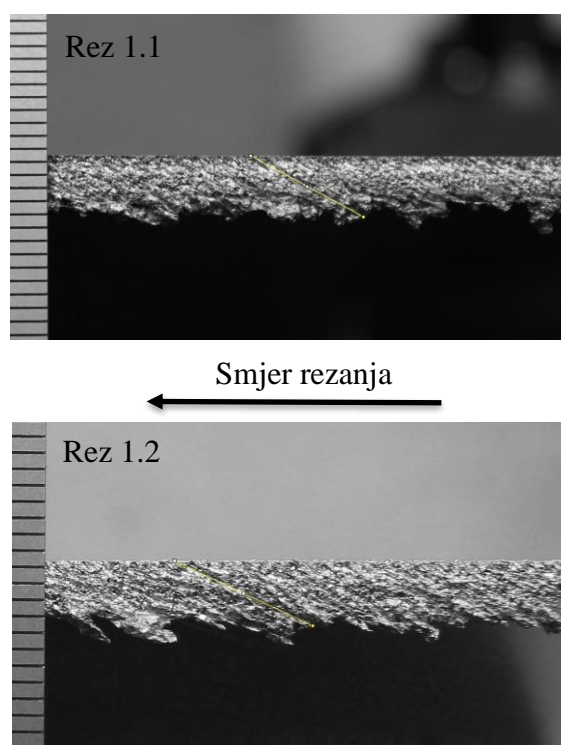
Slika 12. ImageJ

Zbog različitih brzina rezanja  $v$  i jakosti struja  $I$ , ni na jednom uzorku nismo dobili iste rezultate. U nastavku će biti prikazani tablični rezultati i slike površina za svaki uzorak, gdje će se prvo prikazati rezultati za jakost struje  $I$  od 20 A i brzine rezanja  $v$  50 – 80 cm/min, a zatim rezultati za jakost struje  $I$  od 25 A i brzine rezanja  $v$  50 – 90 cm/min.

### Rezultati rezanja – Jakost struje 20 A i brzina rezanja 50 – 80 cm/min

Tablica 6. Uzorak 1

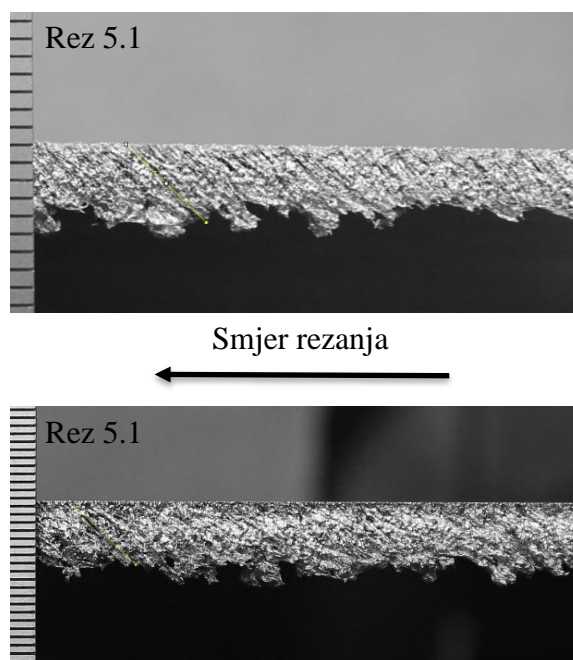
Brzina rezanja – 50 cm/min		
Jakost struje – 20 A		
Mjerenje kuta nagiba brazdi		
	Rez 1.1	Rez 1.2
1.	60,01°	61,81°
2.	59,94°	61,54°
3.	60,12°	61,93°
Srednja vrijednost	60,02°	61,76°
Mjerenje količine troske ( H – 3mm )		
	Rez 1.1	Rez 1.2
1.	3,16 mm	2,61 mm
2.	2,78 mm	2,43 mm
Srednja vrijednost	2,97 mm	2,52 mm



Slika 13. Uzorak 1

Tablica 7. Uzorak 5

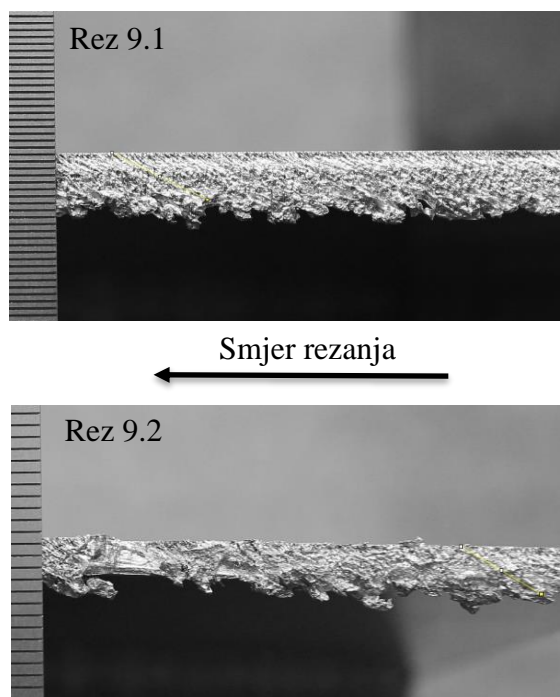
<b>Brzina rezanja – 60 cm/min</b>		
<b>Jakost struje – 20 A</b>		
<b>Mjerenje kuta nagiba brazdi</b>		
	Rez 5.1	Rez 5.2
1.	62,81°	63,92°
2.	62,46°	63,01°
3.	62,12°	63,57°
Srednja vrijednost	62,46°	63,50°
<b>Mjerenje količine troske ( H – 3mm )</b>		
	Rez 5.1	Rez 5.2
1.	2,74 mm	2,61 mm
2.	2,62 mm	2,55 mm
Srednja vrijednost	2,68 mm	2,58 mm



Slika 14. Uzorak 5

Tablica 8. Uzorak 9

<b>Brzina rezanja – 70 cm/min</b>		
<b>Jakost struje – 20 A</b>		
<b>Mjerenje kuta nagiba brazdi</b>		
	Rez 9.1	Rez 9.2
1.	63,96°	64,27°
2.	63,67°	64,36°
3.	63,77°	64,87°
Srednja vrijednost	63,80°	64,50°
<b>Mjerenje količine troske ( H – 3mm )</b>		
	Rez 9.1	Rez 9.2
1.	2,51 mm	2,18 mm
2.	2,27 mm	1,87 mm
Srednja vrijednost	2,39 mm	2,03 mm

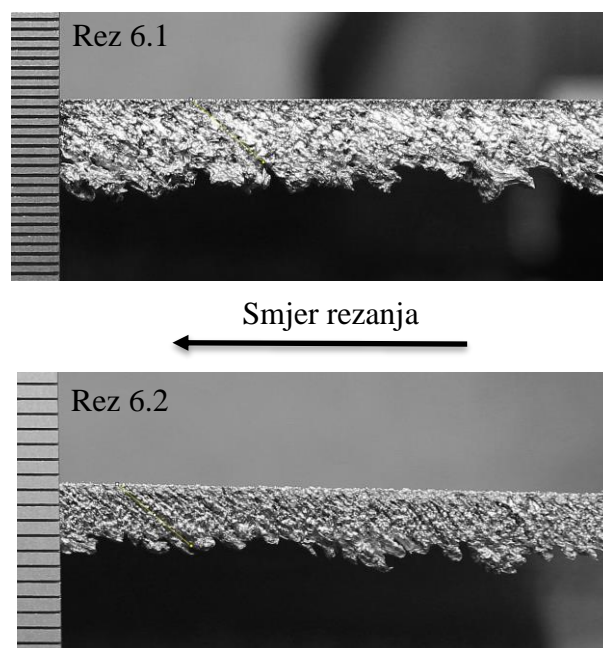


Slika 15. Uzorak 9

## Rezultati rezanja – Jakost struje 25 A i brzina rezanja 50 – 90 cm/min

Tablica 9. Uzorak 6

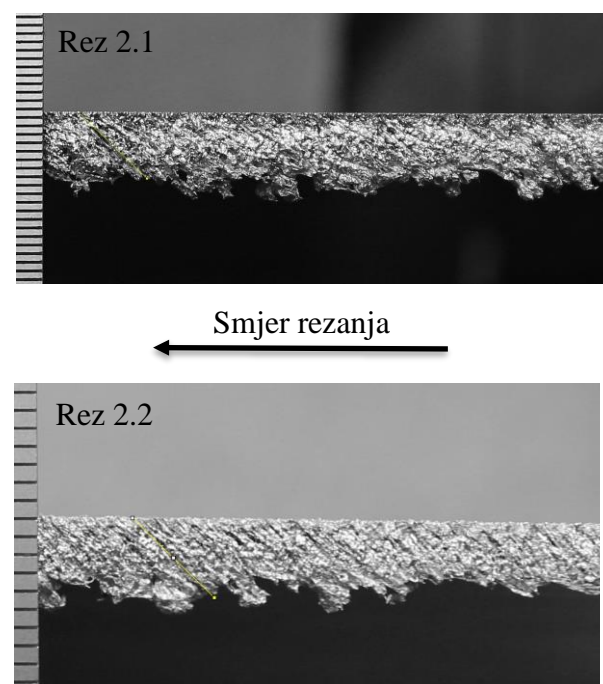
Brzina rezanja – 50 cm/min		
Jakost struje – 25 A		
Mjerenje kuta nagiba brazdi		
	Rez 6.1	Rez 6.2
1.	46,09°	45,79°
2.	45,97°	45,88°
3.	46,24°	45,92°
Srednja vrijednost	46,10°	45,86°
Mjerenje količine troske ( H – 3mm )		
	Rez 6.1	Rez 6.2
1.	8,14 mm	6,87 mm
2.	4,56 mm	4,84 mm
Srednja vrijednost	6,35 mm	5,86 mm



Slika 16. Uzorak 6

Tablica 10. Uzorak 2

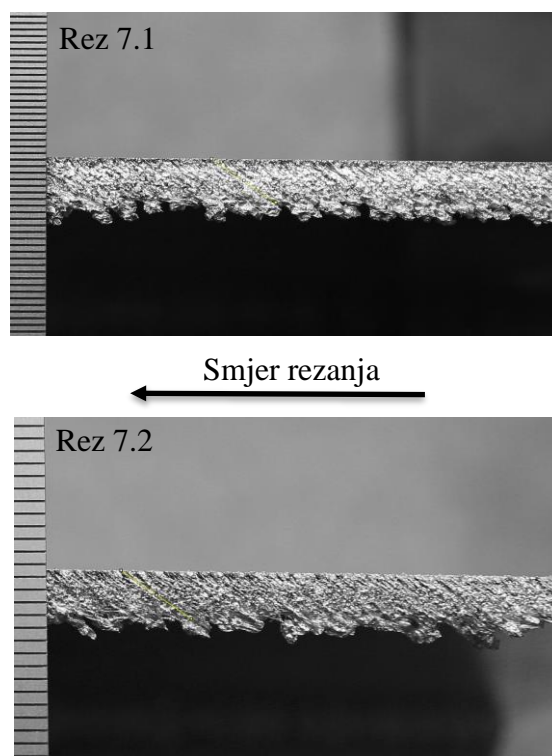
Brzina rezanja – 60 cm/min		
Jakost struje – 25 A		
Mjerenje kuta nagiba brazdi		
	Rez 2.1	Rez 2.2
1.	50,12°	50,25°
2.	50,36°	51,02°
3.	50,77°	50,82°
Srednja vrijednost	50,42°	50,69°
Mjerenje količine troske ( H – 3mm )		
	Rez 2.1	Rez 2.2
1.	6,60 mm	7,11 mm
2.	6,14 mm	4,44 mm
Srednja vrijednost	6,37 mm	5,78 mm



Slika 17. Uzorak 2

Tablica 11. Uzorak 7

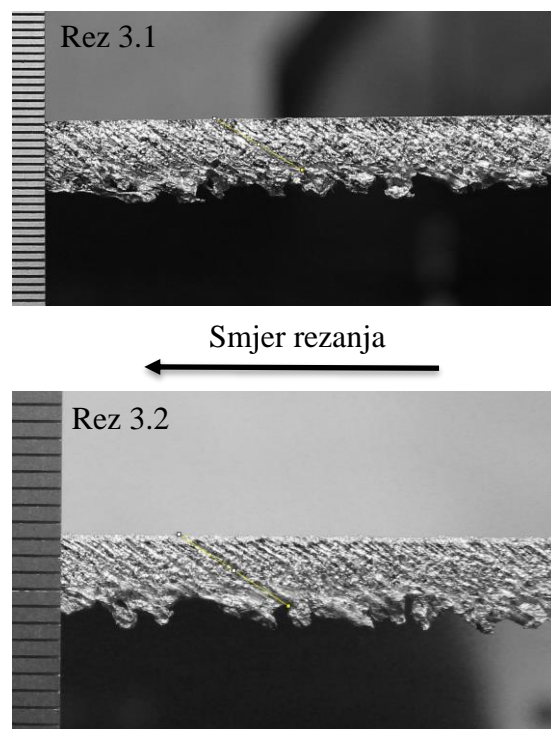
<b>Brzina rezanja – 70 cm/min</b>		
<b>Jakost struje – 25 A</b>		
<b>Mjerenje kuta nagiba brazdi</b>		
	Rez 7.1	Rez 7.2
1.	55,79°	55,61°
2.	55,36°	55,92°
3.	55,72°	55,74°
Srednja vrijednost	55,62°	55,76°
<b>Mjerenje količine troske ( H – 3mm )</b>		
	Rez 7.1	Rez 7.2
1.	7,36 mm	6,62 mm
2.	3,98 mm	4,56 mm
Srednja vrijednost	5,67 mm	5,59 mm



Slika 18. Uzorak 7

Tablica 12. Uzorak 3

<b>Brzina rezanja – 80 cm/min</b>		
<b>Jakost struje – 25 A</b>		
<b>Mjerenje kuta nagiba brazdi</b>		
	Rez 3.1	Rez 3.2
1.	60,11°	61,61°
2.	60,57°	61,12°
3.	60,37°	60,96°
Srednja vrijednost	60,35°	61,40°
<b>Mjerenje količine troske ( H – 3mm )</b>		
	Rez 3.1	Rez 3.2
1.	7,16 mm	6,12 mm
2.	3,87 mm	4,36 mm
Srednja vrijednost	5,52 mm	5,24 mm

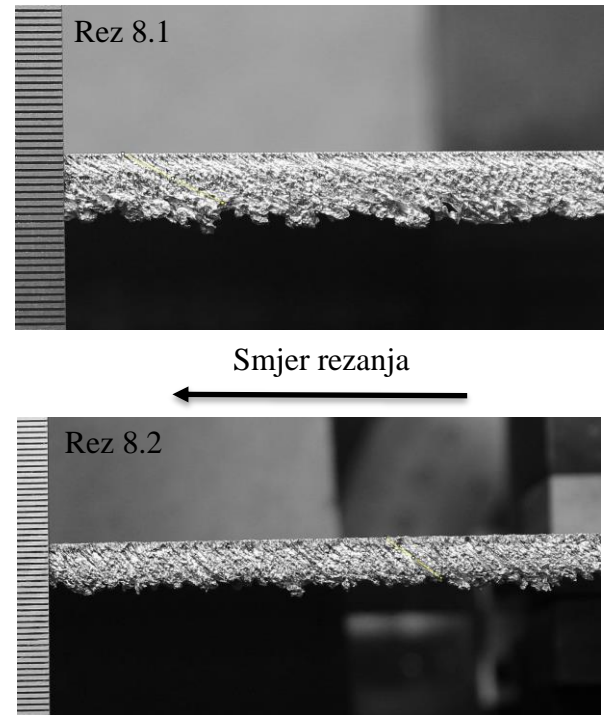


Slika 19. Uzorak 3



Tablica 13. Uzorak 8

<b>Brzina rezanja – 90 cm/min</b>		
<b>Jakost struje – 25 A</b>		
<b>Mjerenje kuta nagiba brazdi</b>		
	Rez 8.1	Rez 8.2
1.	63,67°	62,98°
2.	63,92°	63,24°
3.	63,88°	63,29°
Srednja vrijednost	63,82°	63,17°
<b>Mjerenje količine troske ( H – 3mm )</b>		
	Rez 8.1	Rez 8.2
1.	6,84 mm	5,56 mm
2.	3,12 mm	2,43 mm
Srednja vrijednost	4,98 mm	4 mm



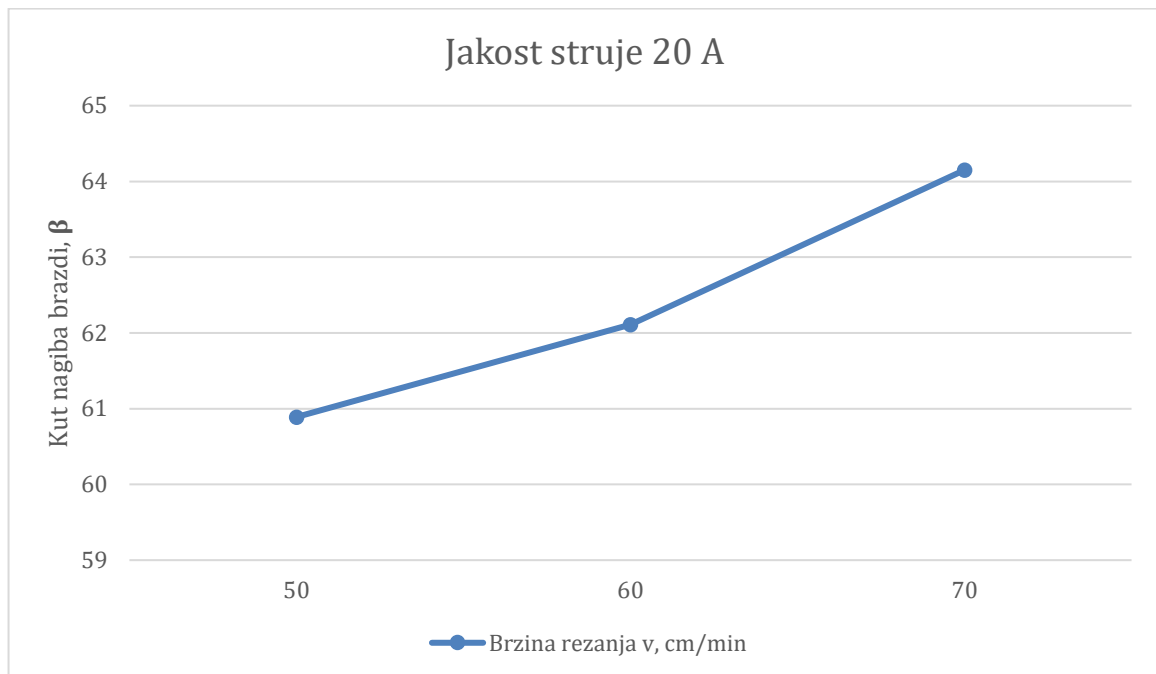
Slika 20. Uzorak 8

## 4. Analiza rezultata

U nastavku će biti tablično prikazani svi dobiveni rezultati za svih devet uzoraka. Prvo će se gledati rezultati kutevi nagiba brazdi za *jakosti struje* 20 i 25 A. Rezultate za uzorak 4 nije bilo moguće razmatrati jer uzorak nije bio izrezan.

Tablica 14. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 20 A – kut nagiba brazdi

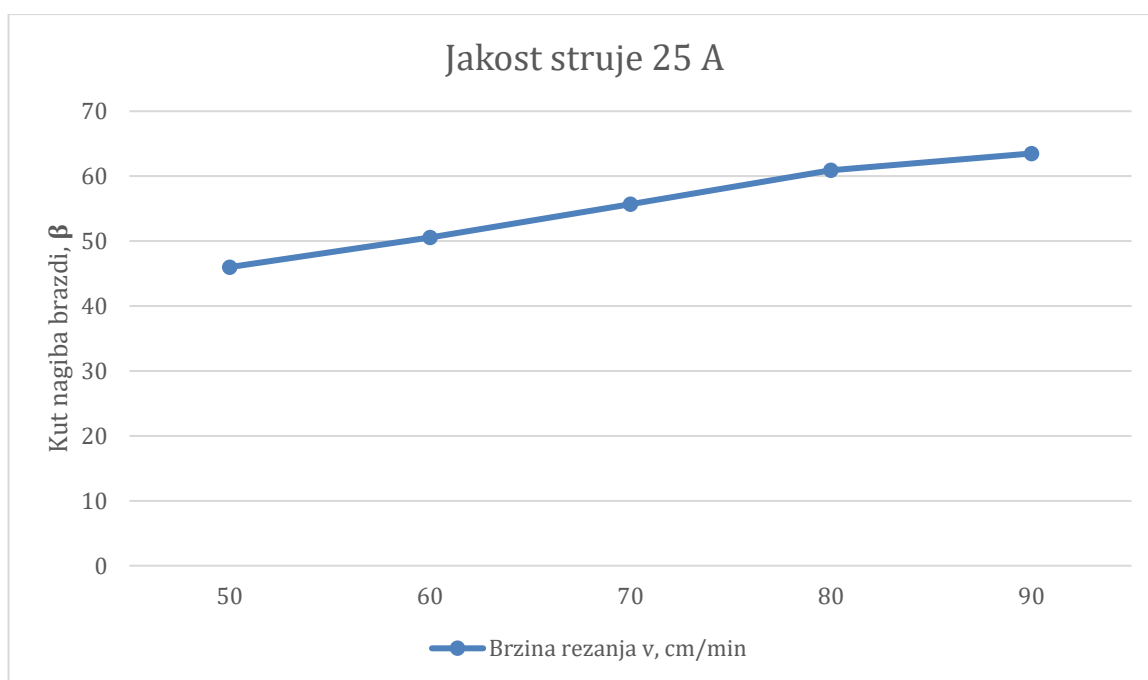
1050A – lim 3 mm	Jakost struje I, A	Brzina rezanja v, cm/min	Kut nagiba brazdi, $\beta$
Uzorak 1	20	50	60,89°
Uzorak 5		60	62,11°
Uzorak 9		70	64,15°



Slika 21. Ovisnost kuta nagiba brazdi o brzini rezanja kod jakost struje 20 A

Tablica 15. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 25 A - kut nagiba brazdi

1050A – lim 3 mm	Jakost struje I, A	Brzina rezanja v, cm/min	Kut nagiba brazdi, $\beta$
Uzorak 6	25	50	45,99°
Uzorak 2		60	50,55°
Uzorak 7		70	55,69°
Uzorak 3		80	60,88°
Uzorak 8		90	63,49°

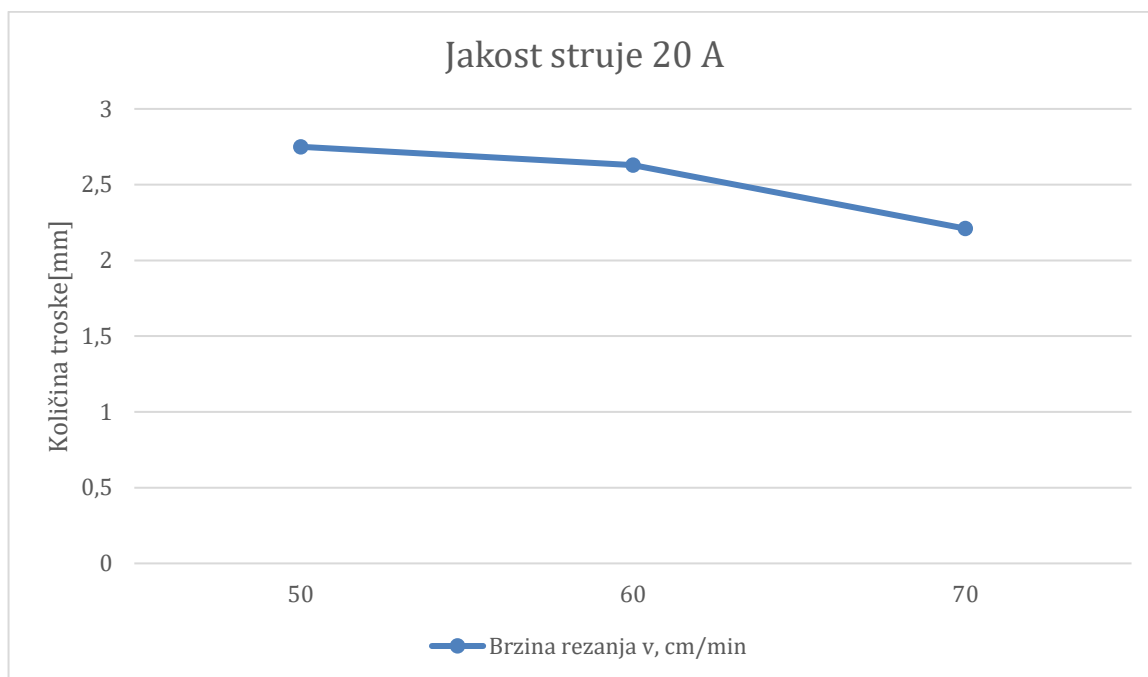


Slika 22. Ovisnost kuta nagiba brazdi o brzini rezanja kod jakost struje 25 A

Nadalje će biti tablično prikazani svi dobiveni rezultati za svih devet uzoraka, sljedeće što se promatra su rezultati količine troske za *jakost struje* 20 i 25 A.

Tablica 16. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 20 A – količina troske

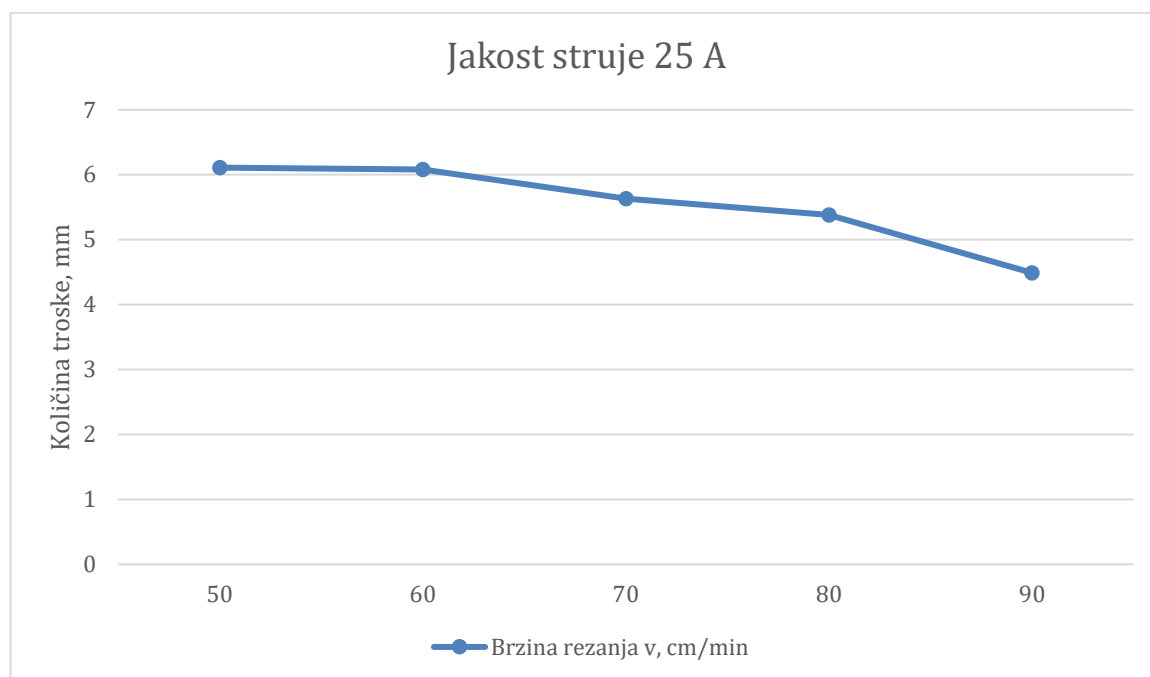
1050A – lim 3 mm	Jakost struje I, A	Brzina rezanja v, cm/min	Količina troske, mm
Uzorak 1	20	50	2,75
Uzorak 5		60	2,63
Uzorak 9		70	2,21



Slika 23. Ovisnost količine troske materijala o brzini rezanja kod jakost struje 20 A

Tablica 17. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 25 A – količina troske

1050A – lim 3 mm	Jakost struje I, A	Brzina rezanja v, cm/min	Količina troske, mm
Uzorak 6	25	50	6,11
Uzorak 2		60	6,08
Uzorak 7		70	5,63
Uzorak 3		80	5,38
Uzorak 8		90	4,49



Slika 24. Ovisnost količine troske materijala o brzini rezanja kod jakost struje 25 A

## 5. Zaključak

Toplinski postupci rezanja koriste toplinu za rezanje materijala, a neki od najčešćih postupaka su plinsko rezanje, lasersko rezanje, plazma rezanje, itd. Plazma rezanje je postupak koji koristi visokoenergetski ionizirani plin, tj. plazmu kako bi se izvršilo rezanje materijala i vrlo je efikasno kod rezanja čelika, nehrđajućeg čelika, aluminijska itd. Svaka navedena metoda ima svoje prednosti i nedostatke u industriji te odabir adekvatnog postupka rezanja ovisi o materijalu koji se reže, debljini materijala, brzini rada itd. Uz stalno napredovanje tehnologije, toplinski postupci se kontinuirano razvijaju pa tako primjerice, plazma rezanje koristi naprednije sustave kojima se postiže visoka preciznost uz veliku mogućnost obrade različitih oblika. Kako bi se uspostavio proces plazma rezanja te da bi dobili visoku kvalitetu potrebno je izvršiti neke postupke kao što su: odabir plinova, postavljanje parametara rezanja, itd.

Nakon što je proveden eksperiment u laboratoriju Sveučilišta Sjever vrši se analiza rezultata, gdje se prvo analiziraju kutevi nagiba brazdi pa količina troske za različite *brzine rezanja* i *jakosti struja*. Na kraju odabrani su optimalni parametri rezanja na temelju svih rezultata eksperimenta. Očekivanje je bilo da će kod *jakosti struje* 20 A najveći kut brazdi biti kod najviše *brzine rezanja* od 70 cm/min što se i provedbom eksperimenta dokazalo. Razlog tome je što tijekom plazma rezanja, plazma luk nije bio okomit na uzorak pa je zaostajao te je to uzrokovalo veći nagib reza. Kod rezanja uzorka 4, nije došlo do kompletnog rezanja kao što je navedeno u tablici 5, a razlog tome je preveliki kut rezanja i premala *jakost struje*. Vizualno je vidljivo da pri većim *brzinama rezanja* dolazi do pojave većeg kuta nagiba brazdi i manje količine troske na donjoj strani uzorka.

Što se tiče rezanja *strujom jakosti* od 25 A, bilo je očekivano da će se povećanjem *jakosti struje* kut nagiba brazdi smanjiti. Iako se kut nagiba brazdi smanjuje, količina troske na donjoj površini se povećala zbog povećanja *jakosti struje*, tj. oslobodila se veća količina energija koja brže tali materijal na manjim *brzinama rezanja* što je i vidljivo nakon vizualnog pregleda.

Tablica 18. Kutevi nagiba brazdi kod jakosti struja 20 i 25 A

1050A – lim 3 mm	Jakost struje I, A	Brzina rezanja v, cm/min	Kut nagiba brazdi $\beta$
Uzorak 1	20	50	60,89°
Uzorak 5		60	62,11°
Uzorak 9		70	64,15°
Uzorak 6	25	50	45,99°
Uzorak 2		60	50,55°
Uzorak 7		70	55,69°
Uzorak 3		80	60,88°
Uzorak 8		90	63,49°

Najmanja količina troske kod *jakosti struje* od 20 A bila je kod najveće *brzine rezanja* od 70 cm/min. Povećanjem *brzine rezanja* smanjila se količina troske na donjoj površini uzorka, a razlog tome je što se pri manjim brzinama luk zadržava na određenom mjestu duže, odnosno veći je unos topline. Stoga je materijal zagrijaniji, rastaljeniji i slijeva se niz stranice reza, niz rezne površine. Pri bržem rezanju manji je unos topline i manje je tog slijevanja materijala oko mjesta rezanja niz stranice. Manje slijevanje znači da su parametri bolji, dobro odabrani. Dobro odabrani parametri omogućuju dovoljno topline za rezanje, a nema prekomjerne topline za stvaranje taline. Kod *jakosti struje* od 25 A slučaj je bio isti, količina troske je najmanja kod najveće *brzine rezanja* od 90 cm/min.

Tablica 19. Količine troske kod *jakosti struja* 20 i 25 A

1050A – lim 3 mm	Jakost struje I, A	Brzina rezanja v, cm/min	Količina troske, mm
Uzorak 1	20	50	2,75
Uzorak 5		60	2,63
Uzorak 9		70	2,21
Uzorak 6	25	50	6,11
Uzorak 2		60	6,08
Uzorak 7		70	5,63
Uzorak 3		80	5,38
Uzorak 8		90	4,49

Po završetku analize rezultata odabrani su optimalni parametri. Za najveću kvalitetu reza, *jakost struje* od 25 A pokazala se najboljom. Područje *brzina rezanja* između 50 i 60 cm/min pokazalo je najbolje rezultate. U navednim parametrima javlja se najmanji kut nagiba brazdi što je vidljivo prikazanim slikama, tablicama i dijagramima. Iako se kod korištenja manje *jakosti struje* od 20 A u području *brzina rezanja* od 50 – 70 cm/min javila manja količina troske, kut nagiba brazdi bio je znatno veći negoli kod *jakosti struje* 25 A, stoga se *jakost struje* od 20 A ne uzima kao optimalni parametar. Veća količina troske ne predstavlja problem jer se može ukloniti naknadnom obradom, primjerice brušenjem, dok se na kut nagiba brazdi nakon plazma rezanja ne može utjecati.

Da bi u proizvodnji imali što veću produktivnost, preporučljivo je da se materijal obrađuje pri što većoj brzini, ali je potrebno voditi računa o količini troske odnosno, da se ne poveća u područje gdje brušenje više neće biti ekonomski isplativo.

## 6. Literatura

- [1] N. Jelić: Klasifikacija nepravilnosti pri toplinskom rezanju, Završni rad, FSB, Zagreb, 2017.
- [2] <https://servus.hr/strucni-clanci/plazma-rezanje-nehrdajucih-celika-dio-1/>, dostupno 31.08.2023
- [3] Aleksandra Milošević: Matematičko-fizički list, **LXVIII** 1 (2017. – 2018.), dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/325278>, 31.08.2023.
- [4] P. Mišković: Primjena visokonaponskog električnog pražnjenja pri inaktivaciji kvasca *Rhodotorula* spp.74, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Zagreb, 2016.
- [5] <https://www.laser-ing.hr/blog/sve-sto-morate-znati-o-rezanju-metala-plazmom/>, dostupno 31.08.2023.
- [6] <https://proinstal.hr/rezanje-plamenom-vs-plazma-rezanja-koji-aparat-izabrati/>, dostupno 31.08.2023.
- [7] L. Božičević: Plazma rezanje, završni rad, Filozofski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2017.
- [8] I. Garašić, Z. Kožuh, S. Kralj: Specifičnosti i primjena plazma zavarivanja, 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, Slavonski Brod, 2011.
- [9] E. Grginčić: Rezanje plazmom, Specijalistički diplomski stručni, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [10] M. Pintarić: Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2023.
- [11] M. Navijalić: Kvaliteta obrade pri rezanju plazmom, Završni rad, FSB, Zagreb, 2018.
- [12] <https://www.laser-ing.hr>, dostupno 31.08.2023.
- [13] V. Panić: 3D robotizirano rezanje plazma postupkom, 4. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, Slavonski Brod, 2007.
- [14] <https://www.varez-zagreb.hr/varilni-aparati/Rocni-plazemski-rezalnici>, dostupno 31.08.2023.
- [15] <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/hypertherm-powermax-30-air>, dostupno 31.08.2023.
- [16] <https://treatrade.hr/distribucija/hypertherm-powermax-30-air>, dostupno 31.08.2023.



- [17] <https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/1xxx/1050a.pdf>, dostupno 31.08.2023.
- [18] <https://www.promotech.eu/en/product/rail-bull-welding-cutting-track-carriage-2/>, dostupno 31.08.2023.
  
- [19] <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>, dostupno 31.08.2023.

## Popis slika

Slika 1. Podjela toplinskih postupaka rezanja [1].....	1
Slika 2. Agregatna stanja [4] .....	3
Slika 3. Shema plazma rezanja prenesenim lukom[7].....	5
Slika 4. Shema plazma rezanja neprenesenim lukom [7].....	6
Slika 5. Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [1] .....	7
Slika 6. Automatizirano plazma rezanje [11] .....	9
Slika 7. Plazma rezanje korištenjem robota [13].....	10
Slika 8. Primjer ručnog plazma uređaja [14].....	12
Slika 9. Ispitni uzorak.....	15
Slika 10. Promotech Rail bull.....	15
Slika 11. Sustav korišten za rezanje uzoraka.....	16
Slika 12. ImageJ .....	18
Slika 13. Uzorak 1 .....	18
Slika 14. Uzorak 5 .....	19
Slika 15. Uzorak 9 .....	19
Slika 16. Uzorak 6 .....	20
Slika 17. Uzorak 2 .....	20
Slika 18. Uzorak 7 .....	21
Slika 19. Uzorak 3 .....	21
Slika 20. Uzorak 8 .....	22
Slika 21. Ovisnost kuta nagiba brazdi o brzini rezanja kod jakost struje 20 A .....	23
Slika 22. Ovisnost kuta nagiba brazdi o brzini rezanja kod jakost struje 25 A .....	24
Slika 23. Ovisnost količine troske materijala o brzini rezanja kod jakost struje 20 A.....	25
Slika 24. Ovisnost količine troske materijala o brzini rezanja kod jakost struje 25 A.....	26

## Popis tablica

Tablica 1. Plinovi i njihove mješavine kao plazmeni plinovi [10].....	9
Tablica 2. Karakteristike uređaja Hypertherm Powermax 30 AIR [16].....	12
Tablica 3. Kemijski sastav materijala EN AW-1050A [17].....	13
Tablica 4. Mehanička svojstva materijala EN AW-1050A [17] .....	13
Tablica 5. Parametri rezanja devet uzoraka.....	17
Tablica 6. Uzorak 1 .....	18
Tablica 7. Uzorak 5 .....	19
Tablica 8. Uzorak 9 .....	19
Tablica 9. Uzorak 6 .....	20
Tablica 10. Uzorak 2 .....	20
Tablica 11. Uzorak 7 .....	21
Tablica 12. Uzorak 3 .....	21
Tablica 13. Uzorak 8 .....	22
Tablica 14. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 20 A – kut nagiba brazdi .....	23
Tablica 15. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 25 A - kut nagiba brazdi .....	24
Tablica 16. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 20 A – količina troske.....	25
Tablica 17. Vrijednost veličina uzoraka za jakost struje 25 A – količina troske.....	26
Tablica 18. Kutevi nagiba brazdi kod jakosti struja 20 i 25 A .....	27
Tablica 19. Količine troske kod jakosti struja 20 i 25 A .....	28

SVEUČILIŠTE  
SIEVER

## 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, Ante Ričko (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica diplomskog rada pod naslovom Utjecaj parametara plazma rezanja na kvalitetu rezne površine pri rezanju aluminijske legure EN AW 1050A (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

Ante Ričko

(*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.