

# Učinak plazmenih plinova na kvalitetu rezanja mlazom plazme

---

Rožić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:935975>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**Učinak plazmenih plinova na kvalitetu rezanja mlazom plazme**

Rijeka, studeni 2023.

Ivan Rožić

0069072751

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**Učinak plazmenih plinova na kvalitetu rezanja mlazom plazme**

Mentor: prof. dr. sc. Goran Cukor, dipl. ing.

Rijeka, studeni 2023.

Ivan Rožić

0069072751

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
**POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE**

Rijeka, 10. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za industrijsko inženjerstvo i menadžment**  
Predmet: **Napredni proizvodni postupci**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Ivan Rožić (0069072751)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Učinak plazmenih plinova na kvalitetu rezanja mlazom plazmom / The effect of plasma gases on the quality of plasma beam cutting**

### Opis zadatka:

Rezanje mlazom plazme je vrlo rašireno zbog jednostavnosti primjene i učinkovitosti, pri čemu se može postići odgovarajuća kvaliteta površine odreza. U uvodnom dijelu treba opisati postupak rezanja plazmom i čimbenike koji utječu na kvalitetu reza. U razradi diplomskog rada treba pripremiti plan pokusa za proučavanje procesa taljenja u prorezu tijekom rezanja plazmom i utvrditi učinak plazmenih plinova na kvalitetu reza.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



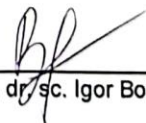
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Goran Cukor

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## IZJAVA

Sukladno članku 11. Pravilnika o završnom radu i završnom ispitu na diplomskom sveučilišnom studiju strojarstva Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad u razdoblju od 21. srpnja do 12. studenog 2023.

Završni rad s naslovom *Učinak plazmenih plinova na kvalitetu rezanja mlazom plazme* (engl. *The effect of plasma gases on quality of plasma beam cutting*) izrađen je primjenjujući stečena znanja tijekom studija te nastavne materijale i literaturu iz kolegija Nekonvencionalni i aditivni proizvodni postupci pod mentorstvom prof. dr. sc. Gorana Cukora, dipl. ing. prema zadatku Povjerenstva za diplomske ispite diplomskog sveučilišnog studija strojarstva Tehničkog fakulteta u Rijeci.

Rijeka, studeni 2023.

Ivan Rožić

---

0069072751

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Goranu Cukoru, dipl. ing. na ustupljenom vremenu, susretljivosti, strpljivosti, smjernicama, potrebnim uputama i stručnim savjetima koji su mi pomogli pri izradi završnog rada.

Svojoj obitelji, posebice roditeljima Ivanu i Zlati želim zahvaliti na financijskoj potpori i razumijevanju tijekom cijelog školovanja i na svom odricanju koje su podnosili kako bi ja mogao imati više prilika i mogućnosti u životu nego što su oni imali. Hvala im na vjeri koju su polagali u svoga sina.

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	REZANJE PLAZMENIM LUKOM I STVARANJE ZAREZA .....	2
2.1	Fizika toplinske plazme .....	2
2.2	Karakteristike čestica u plazmi .....	2
2.2.1	Svojstva plazme .....	4
2.2.2	Kinetička energija i temperatura u plazmi .....	6
2.2.3	Uvjeti toplinske plazme .....	8
2.2.4	Generiranje toplinske plazme .....	9
2.3	Formiranje zasjeke .....	10
2.3.1	Obradni sustav .....	10
2.3.2	Izvor struje, crijeva i plazmeni gorionik .....	12
2.3.3	Plazmeni gorionik .....	12
2.3.4	Kinetička energija strujanja plina .....	15
2.3.5	Raspodjela toplinske energije u procesu rezanja .....	17
2.3.6	Energija potrebna za topljenje metala .....	19
2.4	Procesi na granici plazma – metal .....	22
2.4.1	Topljivost plinova u tekućim metalima do točke vrelišta .....	22
2.4.2	Difuzija plina u talini metala .....	26
2.4.3	Rubni slojevi na granici faza tekućeg metala i plina .....	28
2.4.4	Granični slojevi između plazme, plina i tekućeg metala .....	30
2.4.5	Adsorpcija plina u tekućem i čvrstom metalu .....	30
2.4.6	Adsorpcija unutar temperaturnog gradijenta između tekućeg metala i plazme .....	34
2.5	Procjena preciznosti rezanja u skladu s normom EN ISO 9013 .....	35
2.5.1	Uvjeti mjerenja .....	41

3.	ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA POSTIGNUTU KVALITETU REZA .....	44
3.1	Pregled postojećeg stanja rezanja plazma lukom .....	44
3.2	Glavni cilj .....	45
3.3	Metoda rješavanja eksperimentalnog problema .....	45
3.4	Postavke eksperimenta .....	48
3.5	Postupak optimizacije rezanja plazmom pomoću softvera Minitab .....	49
3.5.1	Analiza varijance (ANOVA).....	58
4.	ZAKLJUČAK .....	64
	Literatura .....	65
	Popis slika .....	68
	Popis tablica .....	70
	Sažetak .....	71
	Summary .....	72



## 1. UVOD

Toplinska plazma je stanje materije koje se javlja pri ekstremno visokim temperaturama. Sastoji se od visoko energiziranih čestica, kao što su elektroni i pozitivno nabijeni ioni, koji su odvojeni i slobodno se kreću. U toplinskoj plazmi, atomi gube elektrone, stvarajući tako nabijene čestice.

Ovo stanje materije može se pronaći u prirodi, kao što su unutrašnjost zvijezda, kao što je Sunce, i u ekstremnim događajima poput munja i vulkanskih erupcija. Također se može stvoriti u kontroliranim uvjetima u laboratorijima kroz različite metode zagrijavanja.

Toplinska plazma ima mnoge važne primjene u znanosti i tehnologiji. Jedna od najpoznatijih primjena je u području nuklearne fuzije, gdje se pokušava reproducirati proces koji se događa u zvijezdama kako bi se proizvela čista i obnovljiva energija. U fuzijskim reaktorima, toplinska plazma se zagrijava na ekstremno visoke temperature kako bi se postigla visoka gustoća i tlak potreban za spajanje atomskih jezgri.

Toplinska plazma također ima primjene u različitim industrijama. Koristi se u izradi poluvodičkih čipova, obradi materijala, proizvodnji tankih filmova, plazma rezanjima, kao i u medicini za sterilizaciju medicinskih instrumenata.

Istraživanje toplinske plazme igra ključnu ulogu u razumijevanju osnovnih fizikalnih procesa i interakcija na atomskoj i subatomskoj razini. Pravilno razumijevanje i kontrola toplinske plazme od izuzetne su važnosti za napredak u mnogim znanstvenim i tehničkim područjima.

## 2. REZANJE PLAZMENIM LUKOM I STVARANJE ZAREZA

### 2.1 Fizika toplinske plazme

Plazma je klasificirana kao četvrto agregatno stanje sljedećim redoslijedom: čvrsto, tekuće, plinovito i plazma. To četvrto agregatno stanje javlja se u poznatom svemiru u udjelu većem od 99 %. Sunce je tipičan primjer čija unutarnja temperatura prelazi  $10^7$  K. Naredna definicija stanja plazme je ograničena na plinovitu plazmu [1].

Plinovita plazma sastoji se od mješavine slobodnih elektrona, iona i neutralnih čestica poput atoma, molekula, radikala, koje imaju veću kinetičku energiju od elektrona. Ova mješavina čestica je kvalificirana kao plazma u električnom stanju neutralnosti plazme i naziva se kvazi neutralnost plazme. To znači da su pozitivne i negativne čestice u ravnoteži. Plazma ima visoku energiju u usporedbi s čvrstim tvarima, tekućinama ili plinovima. Postoji mnogo načina za stvaranje plazme, a zatim se plazma može kategorizirati kao prirodna ili umjetno stvorena plazma [1].

### 2.2 Karakteristike čestica u plazmi

Primarna razlika među česticama plazme leži u njihovoj masi. Masa iona i neutralnih čestica posjeduju značajno veću masu u usporedbi s masom elektrona ( $mH / me = 1840$ , gdje  $mH$  označava masu atoma, a  $me$  masu elektrona). Neutralne čestice i ioni se nazivaju "teškim česticama" ili "glavnim komponentama" u plazmi. Ove veće čestice mogu biti u "uzbuđenom stanju" što se događa zbog visoke energije u plazmi. Čestice koje su uzbuđene mogu se vratiti u "osnovno stanje" uz stvaranje svjetlosnih čestica koje se nazivaju "fotonima". Ovaj proces stvara svjetlucanje u plazmi. Fenomen omogućuje mjerenje svojstava plazme (kao što su temperatura i gustoća) pomoću tehnike zvane "optička emisijska spektroskopija (OES)" [1].

Plazma postaje provodljiva zbog prisutnosti slobodnih čestica. U području fizike plazme istraživači koriste Debyeovu duljinu, označenu kao  $\lambda_D$ , kako bi definirali karakteristike plazme. Ta Debyeova duljina zapravo označava područje gdje se kretanje težih čestica usmjerava elektronima koji reagiraju na električno polje plazme. Za vrstu plazme koja se koristi u rezanju, duljina Debyea od oko  $\lambda_D \approx 10^{-6}$  je uobičajena. Zanimljivo je da u određenim scenarijima plazma zapravo može nadmašiti električnu provodljivost metala pri sobnoj temperaturi. Na primjer, kada se vodikova

plazma zagrije na ogromnih  $10^6$  K, pokazuje električnu provodljivost usporedivu s bakrom pri sobnoj temperaturi [1].

Kompozicija plazme opisana je Eggert-Saha jednadžbom, Daltonovim zakonom i uvjetom za kvazi neutralnost plazme:

$$\frac{n_e n_i}{n} = \frac{2Q_i}{Q} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (2.1)$$

$$p = (n_e + n_i + n)kT, \quad (2.2)$$

$$n_e = n_i, \quad (2.3)$$

gdje je

$k$  – Boltzmannova konstanta ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K),

$h$  – Planckova konstanta ( $6,6 \times 10^{-34}$  Js),

$n_e$  – gustoća broja elektrona [ $\text{m}^{-3}$ ],

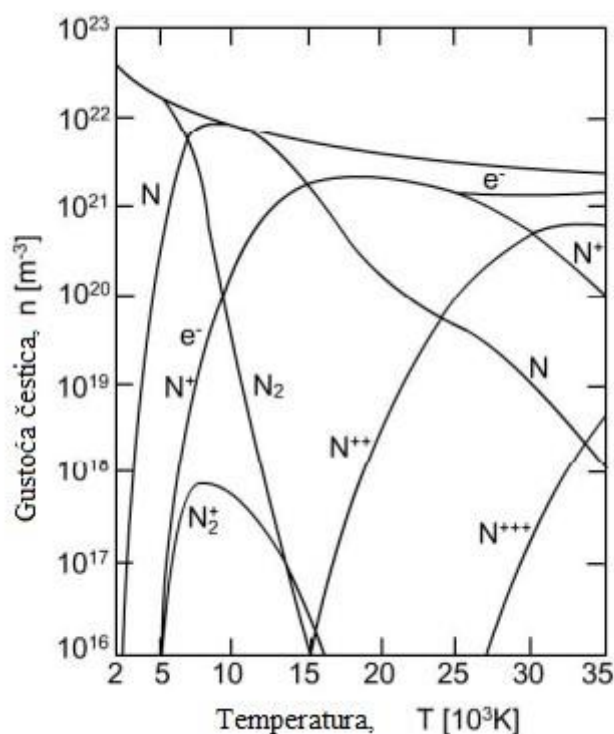
$Q_i, Q$  – patricijske funkcije iona i neutrala,

$E_i$  – energija ionizacije [eV].

Komponente unutar Eggert-Saha jednadžbe (2.1) predstavljaju različite čimbenike:  $n_e$  označava broj elektrona,  $n_i$  i  $n$  označavaju količinu iona i broj neutralnih čestica, bez obzira jesu li u uzbuđenom stanju ili ne.  $Q_i$  i  $Q$  su funkcije povezane s ionima i neutralnim česticama, dok  $h$  označava Planckovu konstantu. Na kraju,  $E_i$  predstavlja energiju ionizacije [1].

Kada se plazma generira iz dvoatomskih plinova poput  $\text{N}_2$ , broj čestica u plazmi povećava se zbog prisutnosti molekularnih čestica. Fizički procesi koji se događaju u plazmi uključuju disocijaciju molekula u atome i ionizaciju atoma. Stvaranje molekularnih iona ostaje zanemarivo. Proces toplinske disocijacije u plazmi dušika odvija se prema nizu  $\text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N}$ , što poprilično podsjeća na Eggert-Saha jednadžbu. Uzimajući u obzir disocijaciju, ionizaciju i prisutnost dodatnih vrsta čestica, moguće je odrediti sastav plazme dušika. Rezultat sastava plazme dušika pri konstantnom tlaku  $p = 100$  kPa prikazan je na slici 2.1. Zanimljivo je primijetiti da molekule dušika nestaju pri temperaturama  $T > 10^4$  K zbog potpune disocijacije i ionizacije atoma dušika, dosežući maksimum

oko  $T = 1,5 \times 10^4$  K. Kada temperatura premaši  $T > 2 \times 10^4$  K, plazma postaje potpuno ionizirana, što znači da broj dušikovih atoma postaje gotovo irelevantan [1].



Slika 2.1 Kompozicija dušikove plazme pri konstantnom tlaku 100 kPa

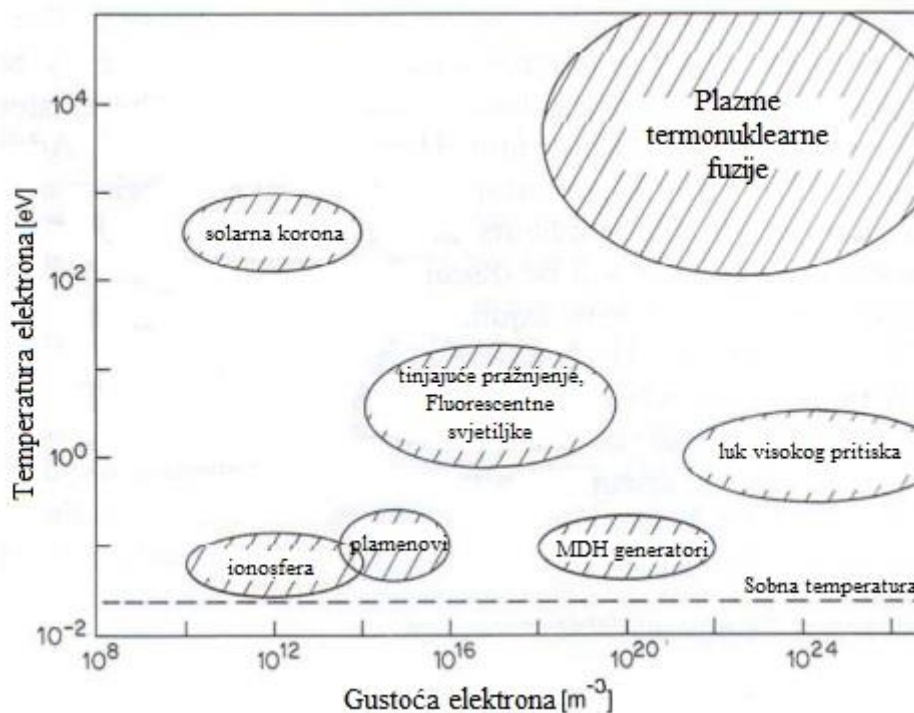
Jednadžbe 2.1 – 2.3 mogu se primijeniti i kod plazme koja sadrži mješovite plinove.

### 2.2.1 Svojstva plazme

Plazma se pojavljuje na širokom spektru tlakova i temperatura, što joj daje prilično svestranu prirodu. Kao rezultat toga, znanstvenici plazmu klasificiraju na temelju temperatura i gustoća elektrona. Ovaj sustav klasifikacije, prikazan na slici 2.2, pomaže razlikovati različite vrste plazme koje se pojavljuju prirodno i one koje stvaramo sami. Ključni čimbenici koji određuju vrstu plazme su gustoće elektrona [ $\text{m}^{-3}$ ] i njihova temperatura [eV] (gdje je  $1 \text{ eV} \approx 7740 \text{ K}$ ), kako je prikazano na slici 2.1. Na primjer, kada se govori o razrijeđenoj plazmi, kao što se događa u sunčevoj koroni, govori se o temperaturama znatno većim od  $10^6 \text{ K}$ . S druge strane, plazme sa sličnim gustoćama, kao one u ionosferi, obično imaju temperature oko  $10^3 \text{ K}$  ili čak niže. Zanimljivo je da čak i plamen

može biti klasificiran kao plazma, a obično se kreće u temperaturnom rasponu od  $10^3$  K, s gustoćama elektrona od oko  $10^{15} \text{ m}^{-3}$  [1].

Sjajna pražnjenja mogu nastati u rasponu tlakova od  $10^{-4}$  do 1 kPa. U takvim uvjetima, temperature elektrona dosežu oko  $10^4$  K, dok se temperature težih čestica približavaju sobnoj temperaturi. Primjerice, ako se razmatra fluorescentna lampa, u njoj temperature elektrona mogu doseći oko  $2.5 \times 10^4$  K, dok se temperature težih čestica približavaju približno oko 300 K [1].



Slika 2.2 Klasifikacija plazme

U ekstremnim uvjetima razmatraju se termonuklearne fuzijske plazme. Ove plazme djeluju uz elektronske gustoće i ione na razinama od otprilike  $10^{26} \text{ m}^{-3}$  i temperaturama koje se kreću od  $10^6$  K do  $10^8$  K [1].

S druge strane, visokotlačni luk je uobičajen slučaj u procesima rezanja. Tu su prisutne elektronske gustoće između  $10^{22}$  i  $10^{25} \text{ m}^{-3}$ , uz temperature koje prelaze  $10^4$  K.

### 2.2.2 Kinetička energija i temperatura u plazmi

Temperatura u plazmi može se odrediti pomoću jednadžbe kinetičke energije, odnosno prosječne kinetičke energije različitih vrsta čestica poput molekula, atoma, iona ili elektrona:

$$1/2mv^2 = 3/2kT, \quad (2.4)$$

gdje je

$m$  – masa čestice [kg],

$(v^2)^{1/2}$  – efektivna brzina [m/s],

$k$  – Boltzmannova konstanta ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K),

$T$  – apsolutna temperatura [K].

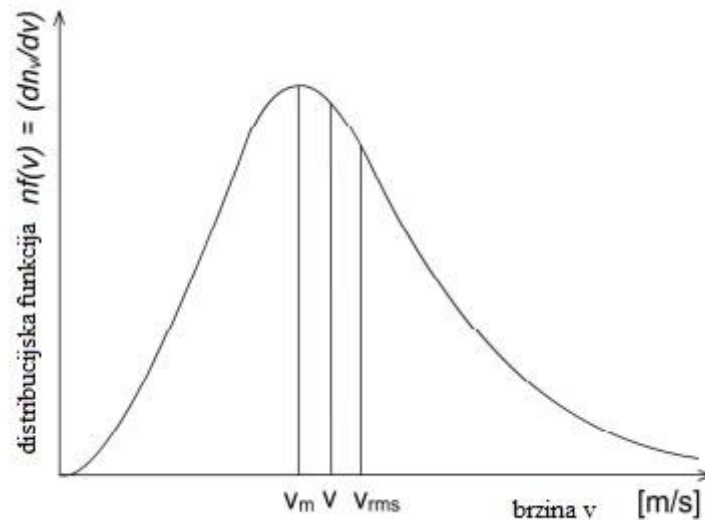
Jednadžba 2.4 prikazuje da čestice prate Maxwell – Boltzmannovu distribuciju, koja može biti izražena sljedećim izrazom:

$$Dn_v = n f(v) dv, \quad (2.5)$$

gdje funkcija od  $f(v)$  iznosi

$$f(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2kT}{m} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left( -\frac{mv^2}{2kT} \right). \quad (2.6)$$

Jednadžba  $Dn_v$  određuje srednju brzinu  $v$ . Kao posljedica toga, distribucijska funkcija  $f(v)$  prikazana na slici 2.3 prikazuje vjerojatnu brzinu  $v_m = (2kT/m)^{1/2}$ , koja se ističe kao gornja vrijednost [1, 2].



Slika 2.3 Maxwell-Boltzmannova distribucija brzina čestica u plazmi

Način na koji čestice međusobno djeluju, što se naziva kolizijskom frekvencijom, ima značajan utjecaj na oblik Maxwell-Boltzmannove distribucije unutar plazme. Najčešći način generiranja i održavanja plazme odvija se putem električnog pražnjenja. To pražnjenje koje nastaje zbog električnog polja donosi snažan energetske udarac, potičući brzo gibanje elektrona. Taj ubrzani pokret elektrona zatim omogućuje prijenos energije s elektrona na teže čestice kao što su ioni, atomi i molekule. Taj fenomen prijenosa energije često se naziva elastičnom kolizijom i ne zaobilazi česte interakcije zbog svoje visoke učestalosti sudara. Uzimajući u obzir različite temperaturne raspona elektrona i tih masivnijih čestica, moguće je matematički prikazati prenesenu energiju pomoću sljedeće jednadžbe:

$$E_{tran} = \frac{3}{2}k(T_e - T_h)\frac{2m_e}{m_h}, \quad (2.7)$$

gdje je

$T_e$  – temperatura elektrona [K],

$T_h$  – temperature teških čestica [K],

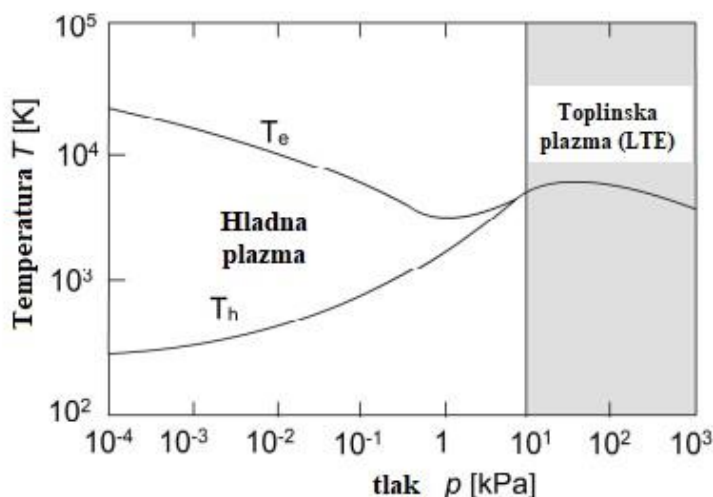
$M_e$  – masa elektrona [kg],

$M_h$  – masa teških čestica [kg].

Energija koju elektroni steknu od električnog polja označena je kao  $E$ . Tlak  $p$  ima utjecaj na kinetičku energiju u plazmi. Omjer  $E/p$  kontrolira brzinu postizanja kinetičke ravnoteže između različitih vrsta čestica u plazmi. Niska vrijednost tog parametra znači da se temperature elektrona približavaju temperaturama težih čestica. Kada se to dogodi, govori se o lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži (LTE) u plazmi, što znači da su stvari prilično uravnotežene. Ovo ravnotežno stanje prilično je često prisutno u toplinskoj plazmi, koja je upravo tip plazme koji se koristi za zanimljive zadatke poput rezanja i zavarivanja plazmom [1].

### 2.2.3 Uvjeti toplinske plazme

U posljednjem poglavlju spomenut je parametar  $E/p$ , a on je taj koji određuje brzinu kojom različite vrste čestica u plazmi pronalaze svoj kinetički ritam. Ono što je zanimljivo je da kada tlak premaši 10 kPa ili kada energija elektrona padne, počinje se igrati s vrijednošću parametra  $E/p$ . To je interakcija između tlaka i energije elektrona koji stvara idealno okruženje za termalnu plazmu. Ali ako tlak padne ispod 10 kPa, zapravo pojačava parametar  $E/p$ , i tada se počinje primjećivati da temperature kreću svaka svojim putem između elektrona i masivnijih čestica. To je ono što se naziva hladnom plazmom ( $T_e > T_h$ ), a to se može vidjeti na slici 2.4.



Slika 2.4 Vrsta plazme ovisi o temperaturi elektrona  $T_e$  i težih čestica  $T_h$ .

Jačina električnog polja utječe na električnu vodljivost  $\bar{\sigma}_e$  [ohm $^{-1}$ m $^{-1}$ ]) plazme, a ova veza može se izraziti Ohmovim zakonom [1]:

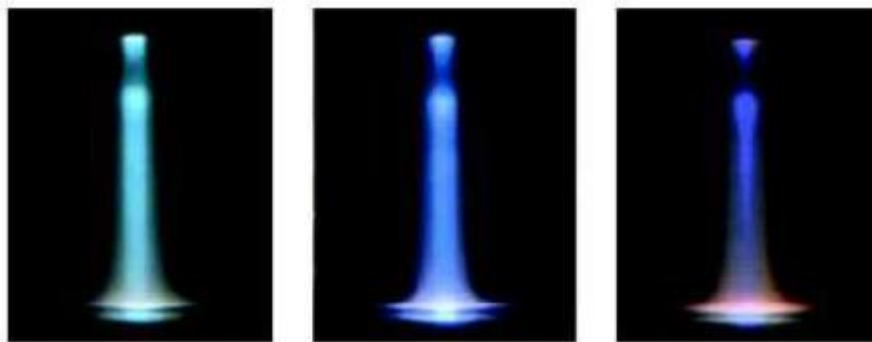
$$E_e = J/\sigma_e \text{ [A}\Omega\text{/m]}. \quad (2.8)$$



## 2.2.4 Generiranje toplinske plazme

Plazma se može generirati na različite načine u različitim uvjetima. U kontekstu zavarivanja i rezanja materijala, plazmeni luk nastaje kada električna struja prolazi kroz plin. Ta električna struja pokreće električno probijanje između katode i anode, koje su izolirane unutar plina. Iako se plin obično smatra električkim izolatorom, postoje okolnosti u kojima ovaj prvotno nevodljivi plin uspije stvoriti put za električnu provodljivost između elektroda. Na primjer, pražnjenje se može generirati kada elektrode kratkotrajno stupe u kontakt i kroz njih teče električna struja. Taj proces dovodi do disocijacije i ionizacije plina, pri čemu slobodni elektroni stvaraju provodljivu stazu. Obično, kretanje katode osigurava kontakt između elektroda [1, 3, 4, 5].

U priloženoj slici 2.5 prikazane su toplinske plazme generirane različitim plazma medijima. Ove vrste plazme koriste se kod rezanja materijala.



*Slika 2.5. Toplinska plazma generirana različitim plinovima pri 100A (dušik, zrak, kisik)*

## 2.3 Formiranje zasjeka

### 2.3.1 Obradni sustav

**Generator istosmjerne struje (izvor).** Generator istosmjerne struje je izvor električne energije koji omogućuje stvaranje električnog luka u plazmenom gorioniku. Ovaj generator isporučuje potrebnu snagu za stvaranje plazme.

**Plazmeni gorionik.** Plazmeni gorionik je uređaj koji stvara i održava plazmu, visokoenergetski plamen. To se postiže stvaranjem električnog luka između elektroda unutar gorionika. Plazma se koristi za topljenje i rezanje materijala na visokim temperaturama.

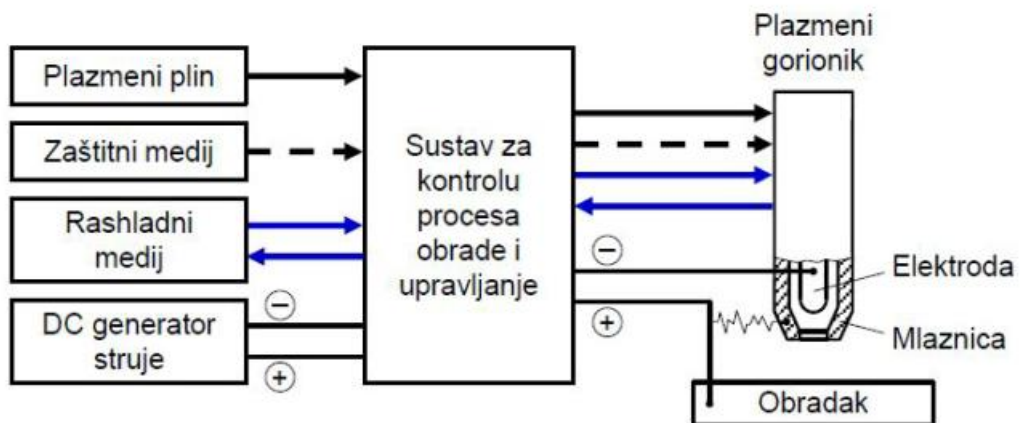
**Sustav za dovod plazmenog plina.** Plazmeni plin je plin koji se koristi za podršku i stabilizaciju plazme. Ovaj plin pomaže u očuvanju stabilnosti električnog luka i sprečava oksidaciju metala. Često se koristi komprimirani zrak, kisik, dušik ili drugi plinovi, ovisno o aplikaciji.

**Sustav za kontroliranje samog procesa obrade te njegovo upravljanje.** Ovaj sustav obuhvaća različite senzore, kontrolere i računalne sustave koji prate i kontroliraju sam proces plazma rezanja. Oni osiguravaju preciznost, stabilnost i sigurnost procesa te omogućuju programabilnost i prilagodljivost prema potrebama.

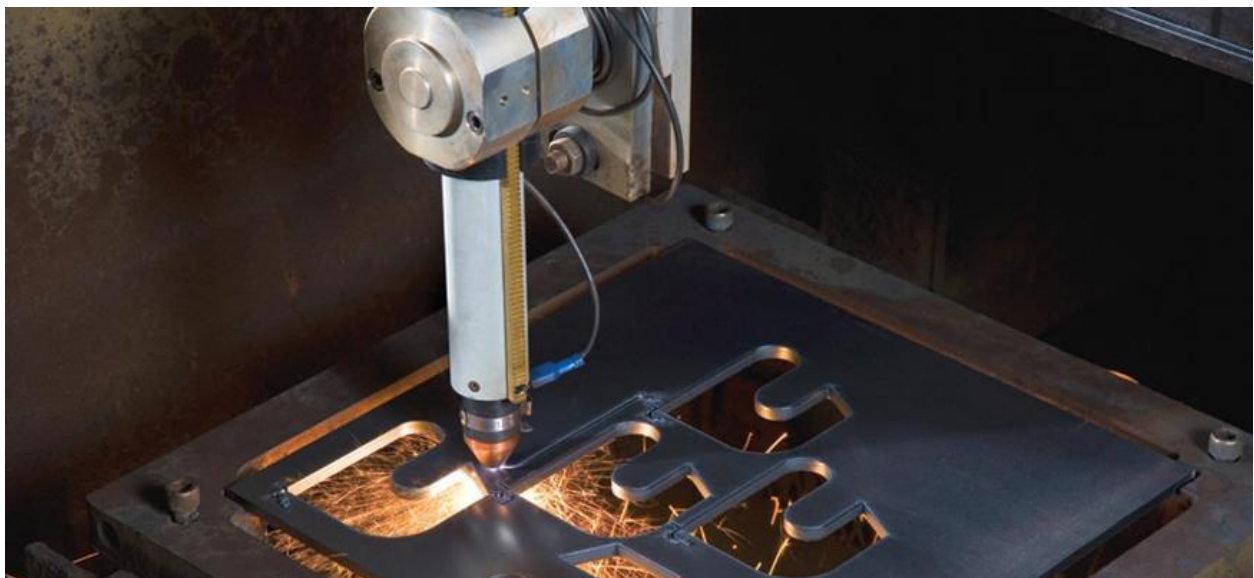
**Sustav za dovod zaštitnog medija.** Zaštitni medij se koristi kako bi se spriječilo oštećenje gorionika i drugih komponenata plazma sustava. To može uključivati hlađenje gorionika i električnih komponenata te sprečavanje kontaminacije.

**Sustav za dovod sredstva za hlađenje.** Ovaj sustav pruža hlađenje različitim dijelovima plazma rezača koji se zagrijavaju tijekom procesa rezanja. Hlađenje je važno za održavanje optimalnih radnih uvjeta i produženje životnog vijeka komponenata.

Ovi elementi zajedno čine kompletni sustav PBM-a koji omogućuje precizno i učinkovito rezanje metala i drugih materijala pomoću plazme. Kontinuirana kontrola i upravljanje ovih komponenata ključna je za postizanje željenih rezultata u procesu obrade [7].



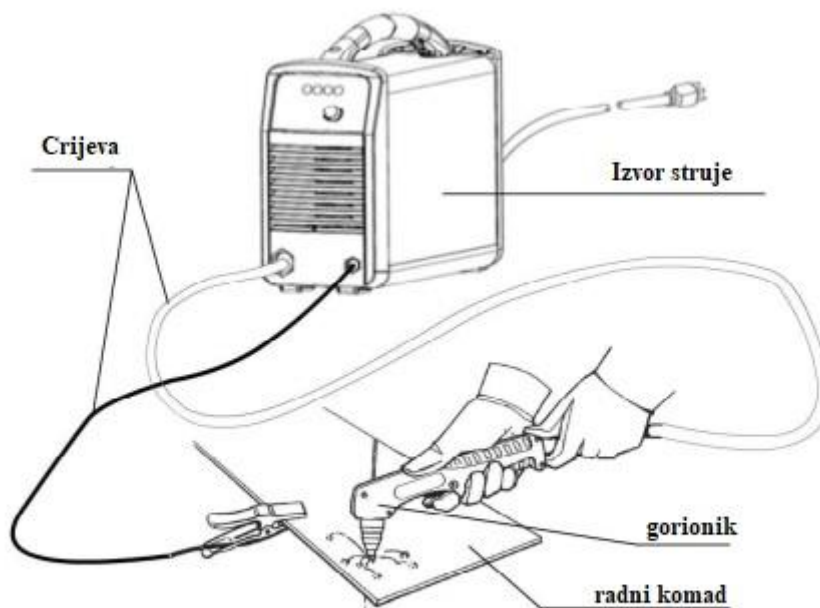
*Slika 2.6 Obradni sustav PBM*



*Slika 2.7 Obrada mlazom plazme*

### 2.3.2 Izvor struje, crijeva i plazmeni gorionik

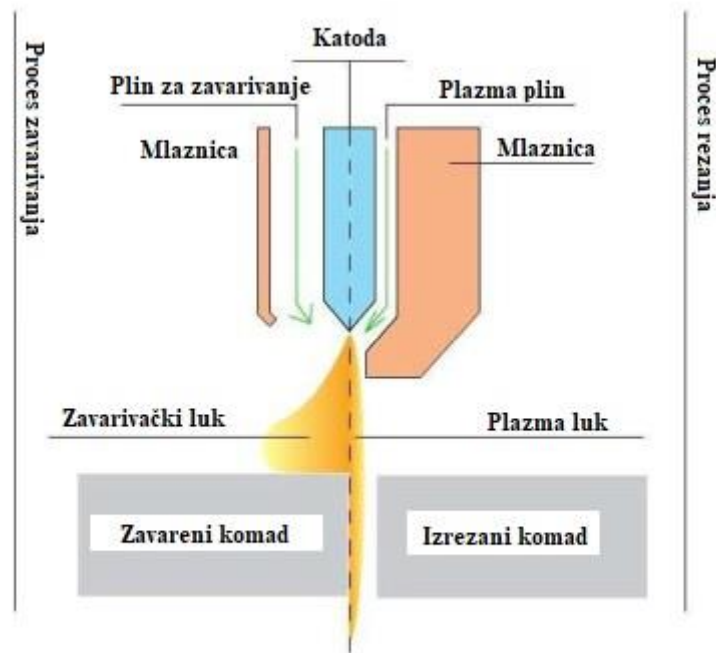
Sustav plazme za rezanje sastoji se od izvora napajanja, paketa crijeva i plazmenog gorionika. Izvor napajanja osigurava pretvorbu električne struje u struju potrebnu za rezanje (uobičajeni sustavi koriste invertersku tehnologiju). Plinski gorionik je oprema pomoću koje korisnik može izvršiti rezanje materijala. Sve ove komponente prikazane su na slici 2.8, koja prikazuje kompletni sustav za ručno plazma rezanje.



*Slika 2.8 Sustav plazme za ručno rezanje sa svim komponentama*

### 2.3.3 Plazmeni gorionik

Osiguranje uspješnog toplinskog rezanja putem metode plazma luka (PBM) zahtijeva poseban dizajn gorionika prilagođen toj svrsi. Konstrukcija gorionika dolazi iz dizajna gorionika za "Tungsten Inert Gas" (TIG) zavarivanje. Uvođenje dodatnih komponenti sužava plazma luk, što rezultira povećanjem potrebne energetske vrijednosti plazme za rezanje. Usporedba između gorionika za zavarivanje i rezanje može se vidjeti na slici 2.9.



Slika 2.9 Konstrukcija gorionika za zavarivanje i rezanje

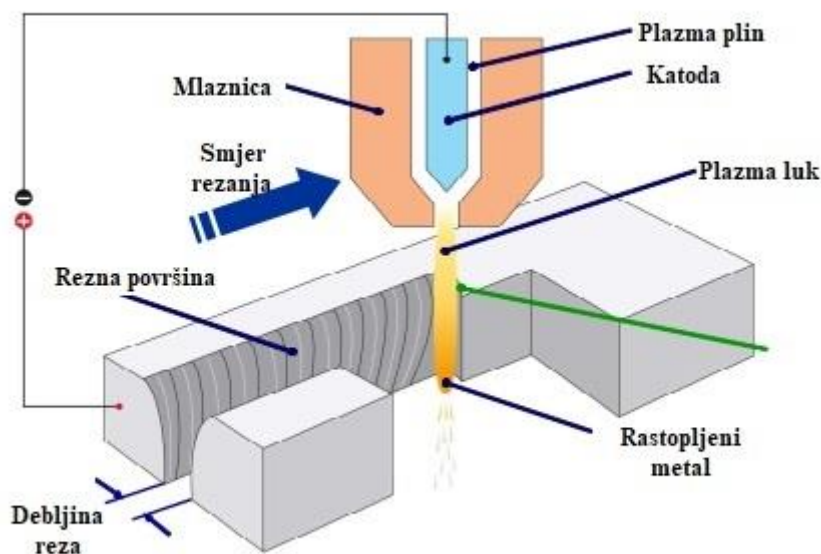
Gorionik se sastoji od nekoliko dijelova, koji bi trebali biti dizajnirani prema toplinskom opterećenju i potrebnoj električnoj snazi za rezanje. U osnovi, gorionik se sastoji od različitih komponenti, uključujući tijelo gorionika, katodu, mlaznicu i povremeno prsten za vrtloženje, kako je prikazano na slici 2.10.



Slika 2.10 Komponente plazma gorionika (s lijeva: zaštitna kapa, mlaznica, katoda, prsten za vrtloženje, tijelo gorionika)

Tijelo se može opisati kao osnovna građevna komponenta koja spaja električnost i cijevi za unos plinova ili tekućina u jednu sveobuhvatnu strukturu. Ovo tijelo gorionika vješto je integrirano u ergonomski oblikovanu ručku. Također, tijelo gorionika ima ključnu ulogu u sigurnom smještaju katode i mlaznice, osiguravajući njihovu odgovarajuću izolaciju.

Ipak, katoda i mlaznica ističu se kao ključni čimbenici unutar ovog sustava. Ovi elementi imaju značajan utjecaj tijekom postupka rezanja. Elektroda i mlaznica su potrošni materijal s obzirom na njihovu ključnu ulogu. Gornji dio elektrode i mlaznice, prikazan na slici 2.11, služi za regulaciju protoka plina i stabilizaciju plazma luka. Intenzivna energija koju emitira plazma luk povećava temperature materijala, često premašujući točku topljenja metala, dok protok plina izbacuje rastopljeni metal iz područja rezanja, kao što je prikazano na slici 2.11.

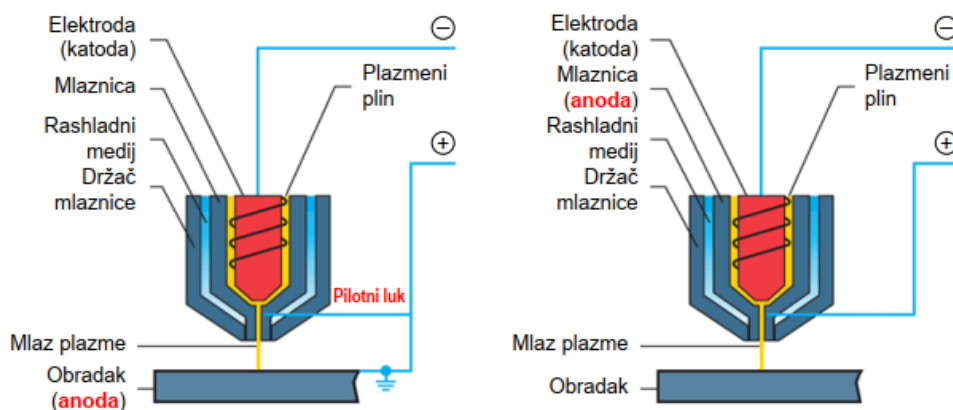


*Slika 2.11 Princip toplinskog rezanja sa PBM metodom*

Protok plina također ima važnu ulogu u održavanju hladnoće gorionika i potrošnih materijala. Značajne promjene svojstava plina događaju se u području pada katode. Ovo određeno područje smješteno je na gornjem dijelu katode i blizu kanala mlaznice. Plazma se generira na ovom području ili putem izravnog kontakta ili korištenjem visokofrekventnog napona. Uobičajena metoda obično uključuje iniciranje plazme putem kontakta, što se postiže aksijalnim pomicanjem komponenata katode. Prije paljenja, katoda je u kontaktu s mlaznicom. Kada paljenje počne putem električnog pražnjenja, struja i plin teku između katode i mlaznice. Istovremeno, kretanje katode uspostavlja potrebnu udaljenost od mlaznice. Putanja stvorena za protok plina prema području katode također utječe na plazma luk koji se formira. Plinski tlak, dok prolazi kroz kanal mlaznice, ima ulogu u stabilizaciji plazma luka. Specifičan dizajn mlaznice oblika lijevka, zajedno s njezinom geometrijom, ima značajan utjecaj na postupak rezanja [7, 8].

Kompresija plazma stupca može imati utjecaj na temperaturu plazme i kinetičku energiju prijenosnog plina, često nazivanog "hladni plin". Taj ohlađeni plin ostaje u nerazdvojenom stanju i stvara zaštitni sloj oko plazma luka, što je naznačeno plavim strelicama na slici 2.13.

Unutar plazma gorionika postoje dvije različite metode rada plazma luka. Izvor napajanja može automatski prebacivati električni potencijal između mlaznice i radnog komada. Kada mlaznica ima električni potencijal, naziva se ne-prijenosni luk. S druge strane, drugi način rada poznat je kao prijenosni luk, što znači da se električni potencijal premješta s mlaznice na materijal koji se reže. Ovaj koncept prikazan je na slici 2.12 [6].



Slika 2.12 Prenosivi (lijevo) i neprenosivi luk (desno)

#### 2.3.4 Kinetička energija strujanja plina

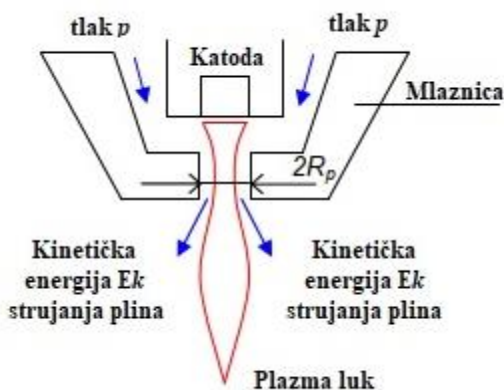
Pri radu s toplinskom plazmom za stvaranje prostora za rezanje, postizanje odgovarajuće temperature plazme i osiguranje dovoljne kinetičke energije u protoku plina postaju ključni čimbenici za učinkovito uklanjanje rastopljene metalne tvari iz reza.

Potrebna kinetička energija strujanja plina dobiva se iz propisanog protoka plina. Taj je protok ovisan o tlaku. Promjena kinetičke energije plina, označena kao  $\Delta E_k$ , pri konstantnom protoku, matematički se može izraziti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\Delta E_k = \frac{m \cdot \Delta v^2}{2} \text{ [kgm}^2\text{s}^{-2}\text{]}. \quad (2.9)$$

Maksimalna kinetička energija koja se postiže u plinu koji struji nastaje kada se potencijalna energija potpuno pretvori. To sugerira da protok plina ovisi o učinkovitosti ugrađenog kompresora ili pumpe unutar izvora napajanja. Dio te energije prolazi kroz promjenu u području katode i kanalu mlaznice, a stupanj te transformacije povezan je s radijusom  $R_p$  kanala, kako je prikazano na slici 2.13.

Na brzinu plina na izlazu iz mlaznice, označena kao  $v$ , utječi i radijus  $R_p$  i tlak  $p$ . Ti čimbenici mogu doprinijeti stvaranju kinetičke energije, posebno kada plin teče kroz kanal mlaznice bez prisutnosti plazma luka.



Slika 2.13 Plazma luk sužen strujanjem plina kroz kanal mlaznice

Kada se koristi plazma luk za toplinsko rezanje, može utjecati na kretanje hladnog plina. To sugerira da plazma luk djeluje kao izvor energije koji može utjecati na brzinu plina unutar kanala. Važno je napomenuti da je brzina plazme veća od brzine hladnog plina. Duž osi, ta brzina doseže svoj vrhunac i postupno opada kako se povećava radijus  $R_p$  kanala. Uvode se određeni parametri, kao što su električna struja  $I$  i gustoća struje  $j$ , kako bi procijenio kinetičku energiju  $E_k$  [9, 10, 11, 12].

Ti parametri pružaju uvid u određivanje tlaka plazma luka  $P(r_s)$ :

$$P(r_s) = \frac{\mu_v * I * j}{4\pi} \left(1 - \frac{r_p^2}{R_p^2}\right), \quad (2.10)$$

$$j = \left(\frac{I}{\pi} * R_p^2\right), \quad (2.11)$$



gdje je

$j$  – gustoća struje [A/mm<sup>2</sup>],

$I$  – jakost struje [A],

$\mu_v$  – propusnost u vakuumu [H/m],

$r_p$  – radijus luka plazme [mm],

$R_p$  – radijus kanala mlaznice [mm].

Maksimalni tlak u smjeru osi luka plazme ( $r_p = 0$ ) iznosi:

$$P_{max} = P_{(r_p=0)} = \frac{\mu_v * I^2}{4\pi^2 R_p^2} = \frac{1}{2} \rho_D v_z^2, \quad (2.12)$$

gdje je

$\rho_D$  – gustoća medija plazme [kgm<sup>-3</sup>],

$v_z$  – aksijalna brzina plazma luka [ms<sup>-1</sup>].

Ovaj odnos može definirati brzinu u plazma luku:

$$v_z = \sqrt{\frac{2P_{max}}{\rho_D}}. \quad (2.13)$$

Unutar kanala mlaznice prisutne su značajne promjene temperature, varijacije gustoće plina i različite brzine plazme i hladnog plina. Jasno razlikovanje između hladnog plina i plazme te precizno određivanje kinetičke energije plazme i hladnog plina na izlazu mlaznice predstavlja zahtjevan trud [13].

### 2.3.5 Raspodjela toplinske energije u procesu rezanja

Energetske potrebe za toplinsko rezanje korištenjem plazma luka temeljito su razmatrane u različitim izvorima literature [4, 14, 15, 16]. U određenim slučajevima, matematički modeli koji

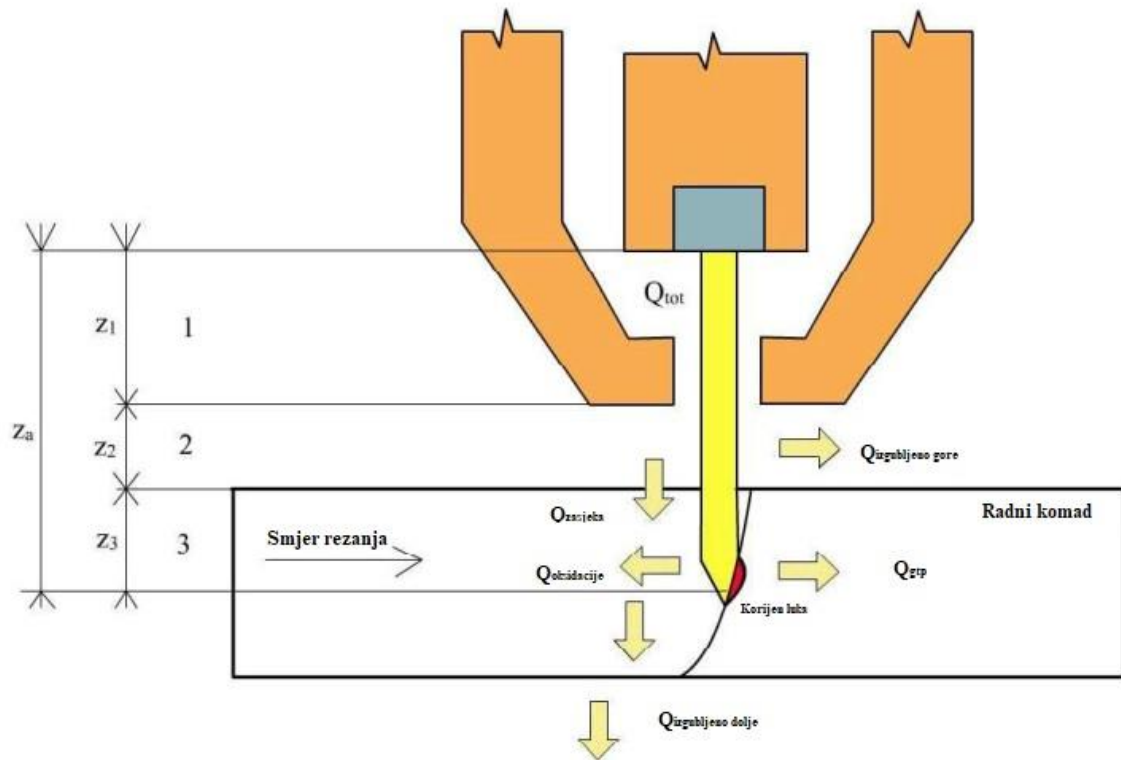
prikazuju raspodjelu energije uspoređivani su sa stvarnim eksperimentalnim podacima [14, 4, 16, 17, 18]. Kada je riječ o toplinskom rezanju s plazma lukom, primjenjuje se napredni model razvijen od strane autora Teulet, Girard i suradnici. Njihova metodologija pojašnjava osnovne principe procesa rezanja uzimajući u obzir raspodjelu energije.

Tehnologija rezanja plazma lukom koristi toplinsku energiju iz plazme kako bi povećala temperaturu materijala dok ne dosegne točku taljenja. Kao rezultat toga, stvoreni zasjek izbacuje tekući metal zbog strujanja hladnog plina. Ukupna ulazna snaga potrebna za postupak rezanja može se odrediti koristeći jednadžbu  $Q_{tot} = U \times I$ . Proračun potrošnje snage,  $Q_{tot}$ , uključuje dva glavna dijela. Prvi dio usredotočen je na prijenos energije  $Q_{zasjek}$  na materijal, što uključuje prijenos toplinske energije kroz plazma luk. Proračun uzima u obzir čimbenike kao što su gubici od zračenja, konvekcija, gubici toplinske provodljivosti od potrošnih materijala te gubici koji nastaju u područjima pada katode i anode.

Sljedeći dio proračuna istražuje gubitke koji nastaju uslijed taljenja materijala, označene kao  $Q_{taljenja}$ , zajedno s gubicima toplinske provodljivosti nazvanim  $Q_{gtp}$ . U situacijama koje uključuju upotrebu kisikovog plazma medija, postoji potencijal za inicijaciju egzotermne reakcije između kisika i željeza, što rezultira dodatnom toplinskom energijom nazvanom  $Q_{oksidacije}$ . Ukupna potrošnja energije može biti sažeto prikazana sljedećim izrazom:

$$Q_{tot} = Q_{gtp} + Q_{taljenja} + Q_{preostalo} - Q_{oksidacije}. \quad (2.14)$$

$Q_{preostalo}$  se odnosi na preostalu energiju koja izlazi iz donjeg dijela prostora za rezanje. Ova se energija također može apsorbirati raspršivanjem rastaljenog metala iz zasjeka za rezanje. Sveobuhvatan niz procesa raspodjele energije prikazan je na slici 2.14.



Slika 2.14 Distribucija energije u procesu rezanja

### 2.3.6 Energija potrebna za topljenje metala

Energiju  $Q_{taljenja}$  moguće je približno procijeniti koristeći Ramakrishnanovu jednadžbu koja uključuje procjenu brzine taljenja  $M_t$  [ $gs^{-1}$ ]. To podrazumijeva proučavanje veze između mase rastaljenog metala i raspršenog rastaljenog materijala iz prostora za rezanje, sve unutar konteksta vremena:

$$M_t = v_t \cdot \rho \int_{-h}^0 K_r(z) dz. \quad (2.15)$$

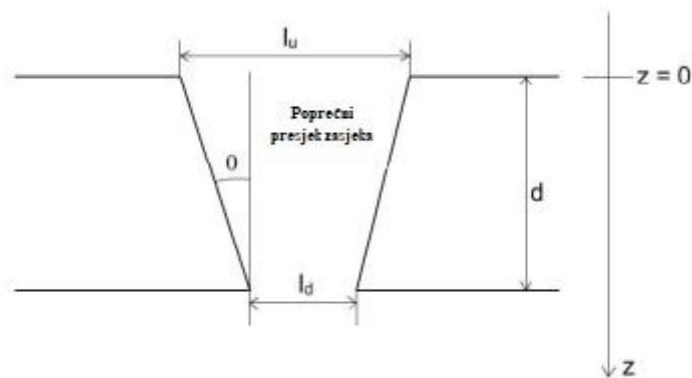
U ovom kontekstu,  $K_r$  označava širinu zasjeka, ovisno o okomitoj osi  $z$  koja obuhvaća debljinu  $d$  radnog dijela. Oblik zasjeka može se opisati temeljem prikaza na slici 2.15, usklađujući se sa sljedećom funkcijom označenom kao  $K_r(z)$  [14]:

$$M_t = v_t \cdot \rho \cdot \left( \frac{l_u + l_d}{2} \right) \cdot d. \quad (2.16)$$

Ovdje,  $l_u$  i  $l_d$  predstavljaju širine zasjeka na gornjem i donjem dijelu radnog dijela. S pomoću prethodno nevedenih jednadžbi postaje moguće izračunati potrebnu snagu [W] za taljenje materijala koristeći sljedeći izraz [14]:

$$Q_{topljenja} = M_t * \left[ \int_{T_0}^{T_f} C(T) dT + Q_L \right]. \quad (2.17)$$

U ovom scenariju, gdje  $Q_L$  iznosi 270 kJ/kg, što označava latentnu toplinu taljenja,  $T_0$  ukazuje na okolnu temperaturu, a  $T_f$  označava temperaturu taljenja materijala ( $T_f = 1800$  K).



Slika 2.15 Poprečni presjek zasjeka

Tijekom procesa termičkog rezanja pomoću plazme s oksidacijskim sredstvom kisikom, može doći do interakcije između kisika i željeza koja rezultira reakcijom oksidacije. Ovaj slijed dovodi do stvaranja oksida FeO (poznatog i kao Wüstit) prema jednadžbi:  $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$ . Ova transformacija oslobađa toplinu, označenu kao  $\Delta H = 549,2$  kJ/mol. Važno je istaknuti da se ova konkretna vrijednost primjenjuje isključivo na oksidacijsko sredstvo plazme kisika. Tijekom reakcije oksidacije, gustoća kisika ostaje nepromijenjena, a temperatura kisika ne prelazi  $T = 3500$  K. Kisik ostaje u molekularnom stanju kao  $\text{O}_2$  pri temperaturama nižim od  $T < 3500$  K. Prema spoznajama Vasil'eva i Chernyaka, otprilike 90 % ukupnog protoka plazme za rezanje sastoji se od nepodijeljenog plazmenog plina. Prema perspektivi Ramakrishnana, razdjelna linija održava kontakt s polovicom bočne površine plazmenog stupca preko cijele debljine materijala. S tim aspektima na umu, opseg oksidacije  $Q_{oksidacije}$  uključujući kisik i željezo može se kvantificirati s učinkovitošću od samo 45 %:

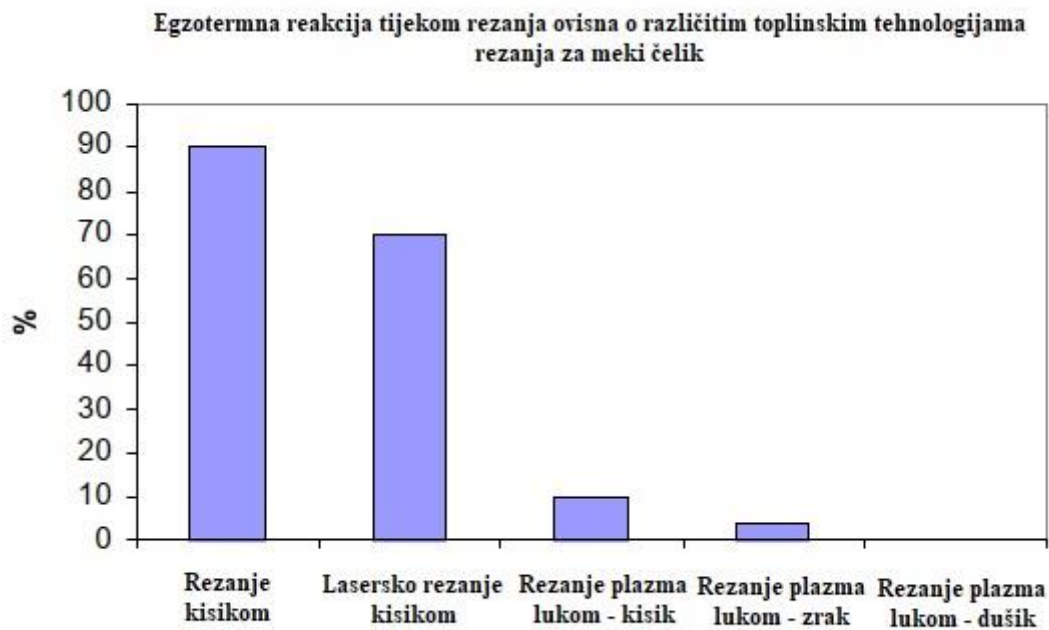
$$Q_{\text{oksidacije}} = \frac{0.45 \cdot D_{O_2}}{M_{O_2}} \cdot \Delta H, \quad (2.18)$$

gdje je

$M_{O_2}$  – molarna masa kisika [g/mol],

$D_{O_2}$  – maseni protok kisika pri konstantnom tlaku [g/s].

Kao primjer, sastav zračnog medija uključuje dušik ( $N_2$ , otprilike 79 %) i kisik ( $O_2$ , oko 21 %). To rezultira značajnim smanjenjem oksidacijske reakcije između kisika i željeza. Oksidacijska reakcija u zračnom mediju manja je od 5 % u usporedbi s rezanjem čistim kisikom, kako je prikazano na slici 2.16. Točno određivanje opsega i karakteristika oksidacijske reakcije složen je zadatak koji zahtijeva napredne tehnike poput spektroskopije optičke emisije za promatranje procesa rezanja.



Slika 2.16 Usporedba različitih tehnologija rezanja

## 2.4 Procesi na granici plazma – metal

Tijekom postupka rezanja plazma lukom, metal unutar područja ureza prolazi kroz proces topljenja i isparavanja. Nadolazeći učinci unutar prostora rezanja povezani su s fizičkim karakteristikama materijala i svojstvima plazme. Značajna toplinska energija prisutna u plazmi stvara izražen gradijent temperature između plazme i materijala. Koegzistiranje plazma plina, hladnog plina i isparavanja metala može potencijalno izazvati promjene u kemijskom sastavu površine ureza, time utječući na ukupnu kvalitetu rezanja.

Izraz "formacija šljake" odnosi se na nakupljanje oksida ili rastopljenih kapljica na donjem dijelu ruba rezanja. Ti oksidi ili rastopljene kapljice unose dodatnu karakteristiku koja pomaže u procjeni kvalitete rezanja. Formacija šljake je neželjena i može biti podložna modifikacijama putem utjecaja plinske plazme tijekom procesa rezanja. Osnovni cilj ovog poglavlja je temeljito istražiti procese taljenja koji se odvijaju na sučelju između plazme i metala. Ovaj napor oslanja se na teorije koje se odnose na fizikalne i metalurške fenomene, temeljene na radovima Lakomskog [19].

### 2.4.1 Topljivost plinova u tekućim metalima do točke vrelišta

Zavarivanje sa električnim lukom je ključna metoda u mnogim industrijama. Tijekom postupka zavarivanja, elektroda se zagrijava na visokih 2500 do 2600 K. Tehnologija korištenja elektronskog snopa u vakuumu omogućava da se dodatno zagrije materijal, podižući temperaturu za 300 – 500 K iznad točke topljenja materijala. Plazma rezanje stvara još više topline, čime se dodatno zagrijava rastopljeni metal. Zbog toga je važno detaljno proučiti proces topljenja metala, sve do točke vrenja.

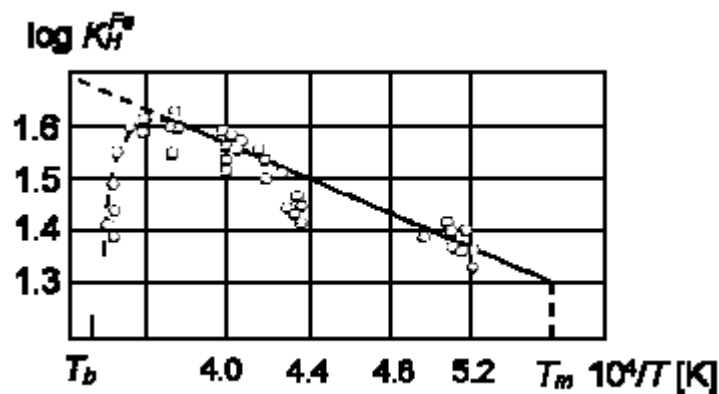
Lakomsky je provodio dubinska istraživanja kako bi razumio kako se plinovi otapaju u metalima. Njegovi eksperimenti su jasno pokazali da se rastvaranje plina u tekućem metalu stalno povećava s povišenjem temperature. Kada temperatura tekućeg metala dostigne točku ključanja, rastvaranje plina se iznenada smanjuje do potpunog nestanka. Put rastvaranja plina prati krivulja na slici 2.17. Ova krivulja može se matematički opisati kao funkcija logaritma:

$$\log K_{g_2}^{M_e} = f(1 / T), \quad (2.19)$$

gdje  $K_{g_2}^{Me}$  [%·atm<sup>-1/2</sup>] predstavlja standardnu rastopljivost plina u tekućem metalu pri određenoj temperaturi  $T$ ,  $Me$  označava određenu vrstu metala dok indeks  $g$  označava primijenjeni plin.

Na primjer, eksperiment rastopljivosti vodika u tekućem metalu otkriva da se odstupanje od približne krivulje javlja uslijed utjecaja pare metala koja se nalazi blizu površine metala [19].

Na temelju eksperimenta, jasno je da temperaturni raspon od točke topljenja do točke ključanja materijala uzrokuje linearno povećanje rastopljivosti plina iz plazme i hladnog plina u tekućem metalu. Proces rastopljivosti plina narušava para metala koja ima suprotnu putanju od difuzije plina u metalu [19].



Slika 2.17 Topljivost vodika u tekućem željezu u temperaturnom intervalu od točke taljenja do vrelišta metala

Ako se temperatura tekućeg metala približi točki ključanja  $T_b$ , oblik rastopljivosti plina u odnosu na temperaturu i tlak podsjeća na eksponencijalnu funkciju, vidljivo na slici 2.17. Stoga se rastopljivost plina u tekućim metalima može definirati do njihovih točaka vrenja.

Maksimalna rastopljivost plina ovisi o količini rastvorenog plina u metalu i procesu isparavanja tekućeg metala. Pretpostavlja se da je energetska nivo pare metala veći od energetske nivoa rastopljivosti plina u tekućem metalu. Ovaj fenomen može biti drukčiji u zasjeku tokom procesa rezanja plazmom. U tablici 2.1 prikazano je istraživanje rastopljivosti vodika u različitim metalima ovisno o temperaturi.

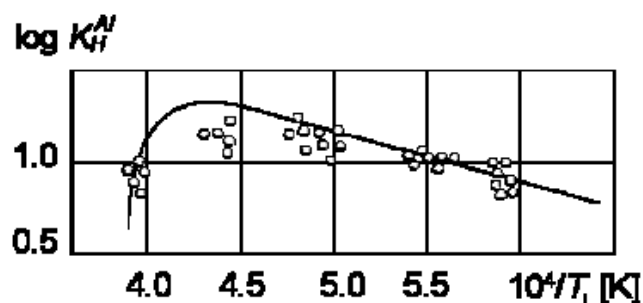
Tablica 2.1 Topljivost vodika u različitim metalima

Topljivost vodika u različitim metalima		
Metal	Temperatura	Sadržaj
	K	cm <sup>3</sup> /100 g
Željezo	2720	40,5
Nikal	2430	72
Aluminij	2300	20,9
Aluminij	2792	31,1

Na temelju izmjerene rastopljivosti plina, mogla bi se definirati aproksimirajuća krivulja rastopljivosti vodika u tekućem aluminiju u ovisnosti o temperaturi prema sljedećem izrazu:

$$\log K_H^{Al} - 0.5 \log(1 - p_{Al}) - 1 / T. \quad (2.20)$$

Rastopljivost vodika ima linearnu funkciju, ali brzo pada na nulu u području točke vrenja, prikazano na slici 2.18 [19].



Slika 2.18 Topljivost vodika u tekućem aluminiju pri visokoj temperaturi

Eksperimenti koji se odnose na rastopljivost dvoatomskog vodika H<sub>2</sub> prema Lakomskom izvedeni su samo za čiste metale poput (Fe, Al, Ti itd.). Materijali poput austenitnog čelika, koji sadrže više metalnih elemenata, čine teoriju rastopljivosti plina u tekućem metalu složenijom, a teorija rastopljivosti plina u tekućem metalu tijekom rezanja plazmom dosad nije bila tako temeljito istraživana. Također, do sada nisu provedeni eksperimenti u ovom polju pri izuzetno visokim temperaturama. Teorijski model koji se odnosi na rastopljivost plina u tekućem metalu pri visokim



temperaturama mogao bi uzeti u obzir osnovnu fiziku disocijacije plina i otapanja plina u metalu [19, 20, 21].

Disocijacija dvoatomskih plinova u plinskoj fazi može se izraziti sljedećim odnosom:

$$\left(\frac{1}{2}G_2\right)_g = (G)g. \quad (2.21)$$

Rastvaranje atomskog plina u metalu:

$$(G)g = [G]_{Me}. \quad (2.22)$$

Treba pretpostaviti da će sposobnost tekućeg metala za rastvaranje plina ostati prisutna sve dok tekući metal postoji. Očito će rastopljivost plina u tekućem metalu biti jednaka nuli na kritičnoj temperaturi. To znači da će gustoća tekućeg metala i njegove zasićene pare biti jednake. Granicu između dviju faza blizu kritične točke vrlo je teško utvrditi. U tablici 2.2 prikazani su eksperimentalni rezultati istraživanja A. V. Grossa, koji se usredotočio na procjenu kritičnih točaka za nekoliko metala [19, 22].

*Tablica 2.2 Kritične temperature čistih metala*

Kritična temperatura čistog metala	
Metal	Temperatura [K]
Fe	10 000
Sn	3 850
Mg	8 720
Mo	17 000
W	23 000

Valja napomenuti da plazma i njen utjecaj na rastopljivost plina u zasjeku ne pokreću reakciju između plina i tekućeg metala na temperaturama većim od 5000 – 6000 K tijekom rezanja [19].

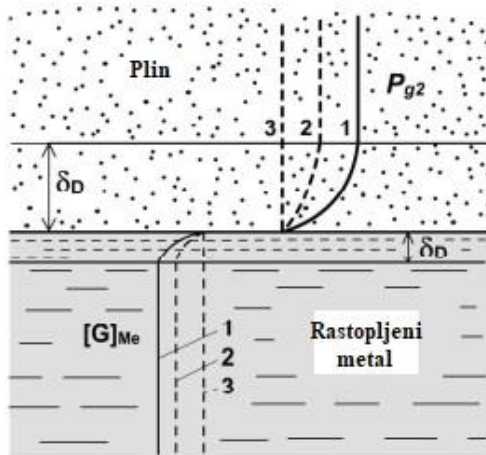
## 2.4.2 Difuzija plina u talini metala

Heterogeni proces tipičan je za apsorpciju plina u tekućinu ili proces uklanjanja plina putem rafiniranja ponovnim topljenjem. Reagensi u jedno komponentnim ili homogenim reakcijama miješaju se međusobno bez poremećaja prijenosa reagirajućih masa.

Situacija u heterogenim reakcijama je drukčija, a transportni procesi igraju važnu ulogu. Transportni procesi su povezani s kemijskim reakcijama i predstavljaju različite stupnjeve heterogenih procesa.

Slijed stupnjeva heterogene reakcije, odnosno procesa apsorpcije, kao što je apsorpcija dušika, izgleda ovako [19]:

- Prva faza prenosi molekule dušika u plinskoj fazi iz jezgre plinskog toka do površine tekućeg metala. Kada se plin  $N_2$  apsorbira tekućim metalom, koncentracija dušika blizu površine tekućeg metala obično ima tlak  $p_{N_2}^i$  manji od tlaka  $p_{N_2}$  u jezgri toka (okolni plin). Ova razlika u tlakovima uzrokovana je strujanjem dušika prema tekućem metalu, stvarajući gradijent koncentracije. Nakon toga, transport dušika odvija se putem konvekcije i molekularne difuzije plina, prikazano na slici 2.19.
- U drugoj fazi, dolazi do kemijske reakcije plina na sučelju faza. Ova se reakcija može izraziti kao:  $\frac{1}{2}N_2 = [N]_{Me}$ . Lakomsky je opisao drugi korak apsorpcije koristeći sljedeće procese: disocijaciju molekularnih plinova  $N_2$ , kemisorpciju atoma u tekućem metalu i prijenos dušikovih atoma iz područja djelovanja površine u okolicu metala.
- Treća faza raspršuje atome dušika unutar tekućeg metala, premještajući ih s površine u dubinu tekućeg metala.



Slika 2.19 Apsorpcija plina tekućim metalom na sučelju između plina i tekućeg metala

Prijenos mase u tekućem metalu odvija se putem dva različita mehanizma: prvo, molekularna difuzija nastaje uslijed koncentracijskih gradijenata, dok drugi mehanizam uključuje prijenos mase potaknut tekućim protokom. Protok tekućine češći je u tekućem metalu. Izvori protoka u tekućinama mogu biti uzrokovani različitim gustoćama tekućeg metala, različitim kemijskim sastavima tekućeg metala i različitim temperaturama metala u različitim dijelovima kupelji [19].

Međusobno preplitanje molekularne difuzije i konvekcije, obilježeno protokom fluida, naziva se konvektivna difuzija. Međutim, osnovni transportni sistem je molekularna difuzija na sučelju faza između plina i tekućeg metala [19].

Miješanje tekućeg metala može ubrzati prijenos mase u heterogenom sustavu. Kada molekularna difuzija napreduje na sučelju tekućine i plina, difuzija atoma (ili nečistoća) u tekućem metalu olakšava se elementarnim pomicanjem otopljenih čestica. Na primjer, pretpostavlja se da osnovna difuzija u taljenju željeza prolazi migracijom prisutnog kisika u sustavu. Mehanički aspekti migracije i konfiguracija čestica ostaju nepoznati. U tekućem metalurškom šljaku, vodik se može pojaviti u obliku aniona  $\text{OH}^-$ , a migrirajuća čestica, predstavljena ionom  $\text{H}^+$ , prenosi se s jednog kisikovog iona na drugi [19].

Koeficijent molekularne difuzije plina u tekućem metalu ovisi o temperaturi i moguće ga je izraziti pomoću sljedeće jednadžbe [19]:

$$D = D_o \exp(-Q/RT), \quad (2.23)$$

gdje je

$D$  – koeficijent molekularne difuzije [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ],

$D_0$  – difuzijska konstanta,

$Q$  – aktivacijska energija difuzije [W],

$R$  – molarna plinska konstanta [ $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ],

$T$  – temperatura [K].

Dinamičnost atoma otopljenih u tekućini može ovisiti o različitim tipovima veza. Grogoryan i Darken su putem eksperimenta saznali da difuzijski koeficijent kisika i dušika iznosi  $D = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  u području tekućeg željeza, organskih tekućina, taljenih soli i otapanja metala. S druge strane, difuzijski koeficijent vodika unutar tekućeg metala raste za jedan i pol reda veličine. Ova pojačana difuzija vodika dobro je poznata u svijetu metalurgije čelika. Razlog ovome leži u malenoj veličini difuznog vodikovog entiteta ( $\text{H}^+$ ), koji ima radijus od oko  $10^{-13} \text{ cm}$ , nasuprot radijusu vodikovog atoma od  $0,028 \text{ nm}$ . U kontrastu, atom kisika nosi radijus od  $0,066 \text{ nm}$ , dok atom dušika nosi radijus od  $0,070 \text{ nm}$ . Kod tekućeg željeza, vodik se uranja s entalpijom  $H_H^S = 65,7 \text{ kJ/mol}$  [19].

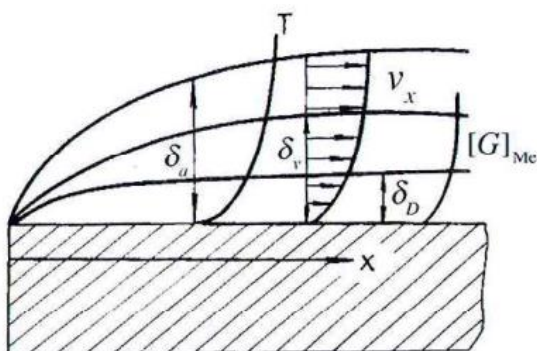
#### 2.4.3 Rubni slojevi na granici faza tekućeg metala i plina

Na sučelju gdje tekući metal susreće plin, razlikuju se tri različite vrste granica. Određivanje granica ovisi o koeficijentu difuzije  $D$ , koeficijentu kinematičke viskoznosti  $\nu$  i koeficijentu toplinske provodljivosti  $\alpha$ . Sva tri koeficijenta imaju iste dimenzije [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ] i karakteriziraju sposobnost medija za molekularni transport mase (molekularna difuzija), količinu pokreta (kinematička viskoznost) i prijenos topline [19].

Međusobni odnosi ovih koeficijenata razlikuju se međusobno, posebno kod tekućeg metala. Posebno je primjetno da odnosi između ovih koeficijenata pokazuju varijacije. Na primjer, prisustvo plina otopljenog u tekućem metalu možda neće utjecati na područje molekularne difuzije koju predstavlja  $D$ . Međutim, dušik ( $\text{N}_2$ ) zaista može utjecati na kinematičku viskoznost unutar tekućih metala.

Svojstva granica između plina i tekućeg metala razlikuju se u usporedbi s tipičnim svojstvima makro-strujanja u hidrodinamici. Ako plin ili tekućina prolaze uzduž čvrste granice, komponenta

brzine strujanja,  $v_x$ , mijenja se duž osi  $y$  dok postupno ne opadne na nulu unutar određenog  $\delta_v$  područja, kao što je prikazano na slici 2.20. Ovo područje povećane viskoznosti naziva se Prandtlov sloj [19].



Slika 2.20 Granični slojevi za temperaturu ( $\delta_a$ ), viskoznost ( $\delta_v$ ) i difuziju ( $\delta_D$ ) u kontekstu gibanja tekućeg metala ( $v$ ) uzduž čvrste ploče ( $x$ )

Definirano područje  $\delta_a$  karakterizira promjenu temperature za sve tri granice, prelazeći s temperature jezgre  $T_0$  prema čvrstoj površini  $T_s$ . Oblik koncentracije rastopljenog plina  $[G]$  u tekućem metalu [%] i promjenu koncentracije plina na sučelju između tekućeg metala i čvrste površine prikazan je na slici 2.20. Očito je da je difuzija plina u čvrstoj površini manje izražena u usporedbi s difuzijom u tekućem metalu. Difuzija na sučelju između tekućeg metala i čvrste površine utvrđena je prema izmjerenim vrijednostima od strane Nernsta. Eksperiment se temelji na brzini otapanja čvrste tvari u tekućini i može se matematički izraziti sljedećom jednačinom:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{DS}{\delta_D} ([G]_b - [G]). \quad (2.24)$$

U gornjem izrazu simbol  $\delta_D$  predstavlja debljinu difuzijskog graničnog sloja tekućine na čvrstoj površini [mm], dok  $D$  označava koeficijent difuzije [ $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ]. Varijabla  $S$  označava površinu između čvrste i tekuće granice [ $\text{mm}^2$ ]. Oznaka  $[G]_b$  predstavlja koncentraciju rastopljenih elemenata unutar graničnog sloja, a  $G$  obuhvaća ukupnu količinu rastopljenih elemenata.

Debljinu slojeva moguće je odrediti pomoću matematičke metode. Faktori koji utječu na debljinu slojeva tijekom rezanja ovise o brzini protoka plina u reznom prostoru, kemijskom sastavu plazma medija i koeficijentu difuzije  $D$ .

#### 2.4.4 Granični slojevi između plazme, plina i tekućeg metala

Sučelje između tekućeg metala i plina ima važno značenje u teoriji procesa plazma taljenja i zavarivanja lukom. U ovom sučelju odvija se niz fizičkih i kemijskih procesa koji utječu na molekularni sastav plinova koji migriraju prema površini tekućeg metala [19].

Plin plazme ne mora biti u termodinamičkoj ravnoteži kada reagira s tekućim metalima. Stoga je važno poznavati kemijski sastav i molekularne spojeve plinova blizu tekućih metala.

Razmjena energije odvija se među plazma plinovima putem sloja ne ioniziranog plina do granice metalne kade. Temperaturni gradijent opada u smjeru površine tekućeg metala. Fizičko-kemijski procesi mogu utjecati na konačnu količinu plina u metalu, koji potječe od plazma plina. S gledišta termodinamičkih svojstava plinova, na primjer, plazma dušikovog medija može udvostručiti volumen dušika u čeliku. Ovaj fenomen može imati utjecaj na svojstva taljenja tijekom rezanja i zavarivanja [19].

Površina reza i tekući metal dolaze u dodir s električnim poljem plazme. Granice između plazme, plina i tekućeg metala mogu biti poremećene električnim poljem. Procesu poput kemijske apsorpcije u tekućem metalu mogu biti popraćeni električnim tokom. To znači da će električno polje promijeniti karakter plinskih slojeva u usporedbi s konvencionalnim postupcima proizvodnje čelika.

Kada se plin preobrazi u ionizirano stanje te reagira s rastaljenim materijalima, započinje zanimljiva reakcija rekombinacije. Ovaj proces uključuje elektrone, ione, atome i molekule, skladno mijenjajući unutarnju energiju plinske faze. Važno je napomenuti kako ovi fenomeni utječu na granicu između plazme i plina. Nadalje, potrošena energija pri prijelazu faze plina pokreće hlađenje plazme [19].

#### 2.4.5 Adsorpcija plina u tekućem i čvrstom metalu

Adsorpcija ima značajnu ulogu u području heterogenih reakcija, posebno u interakciji između plinova i tekućih metala. Ovaj proces između plina i metala odvija se kroz dvije jasno definirane

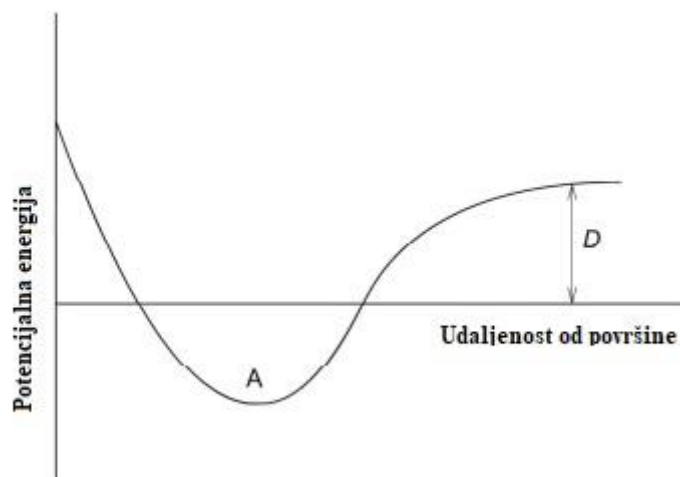
faze adsorpcije. U prvoj fazi, plin se otapa u tekućem metalu. Druga faza predstavlja proces odstranjivanja plinova.

Adsorpcija pri visokim temperaturama ovisi o kompleksnim kemijskim vezama koje nastaju između atoma plina i tekućeg metala. Ovaj znanstveni fenomen također je poznat kao kemijska adsorpcija, proces koji započinje kemijskom aktivacijom. Tok kemijske adsorpcije usko podsjeća na konvencionalnu kemijsku reakciju. To implicira da molekule ili atomi moraju uspješno prevladati posebno postavljenu prepreku aktivacije. Kada dvoatomski plinovi kemijski apsorbiraju na površine tekućeg metala pri visokim temperaturama, taj proces prati disocijaciju plinskih molekula [19].

Kemijska adsorpcija homonuklearnih dvoatomskih plinova (poput  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ) odvija se prema sljedećem mehanizmu: površina metala u kontaktu s plinom neprestano je izložena udarima molekula plina. Neke molekule se uhvate na površini, što rezultira promjenama njihove kinetičke energije. Prilikom sudara, dio kinetičke energije prenosi se na oscilacijsku energiju molekula, dok se preostali dio prenosi na atome na metalnoj površini [19, 20].

Oscilacijska energija plinskih molekula ima učinak smanjenja čvrstoće među atomskih veza unutar metala. To čak može dovesti do pucanja veza između atoma metala na površini. Nakon toga, događa se kemijska adsorpcija plina na tekući ili čvrsti metal. Kako se molekule plina disociraju, rezultirajući atomi pokreću neovisno oscilacijsko kretanje po površini metala neko vrijeme. Ta oscilacija atoma završava kada se postigne ravnoteža unutar strukture tekućeg ili čvrste metalne rešetke. Kao posljedica toga, adsorbirani atom gubi određeni stupanj slobode u usporedbi s početnim stanjem u plinskoj fazi [19].

Interakcija molekularnih plinova s površinom metala (na primjer, vodika i metala) može se učinkovito prikazati dijagramom koji je razvio J. Lennard-Jones, kako je prikazano na slici 2.21. Predstavlja snažnu vezu koja se formira između kemijski apsorbiranih atoma vodika i površine metala. Na slici 2.21, točka A označava da je veza između plina i metala jača od energije potrebne za disocijaciju molekule plina.



*Slika 2.21 Model interakcije između molekule plina i površine metala*

Veza između plina i metala osigurava se sudjelovanjem elektrona koji potječu iz atoma metala, posebno tijekom kemijske apsorpcije kisika, dušika i vodika. Presudni faktor koji određuje karakter te veze temelji se na elektronskoj sklonosti dijeljenoj između plina i elektrona metala.

Utvrđeno je da se plinovi s nižim potencijalom ionizacije (kao što je vodik) lakše kemisorbiraju. Prema procjenama, sklonost kemisorpciji između ta tri plina može se poredati u sljedećem redoslijedu:  $O_2 \gg N_2 \gg H_2$  [19, 23].

Osnovne fizikalne karakteristike koje upravljaju adsorpcijom dvoatomskih plinova vodika, kisika i dušika su sljedeće:

## **VODIK**

Atomi vodika pokazuju prilično umjereni elektronski afinitet (0,747 eV) i imaju potencijal ionizacije od 13,595 eV. Kada molekula vodika prikupi dovoljno energije da prevlada aktivacijsku prepreku na površini, ulazi u fazu disocijacije gdje se razdvaja na pojedinačne atome uslijed sudara. Nakon toga, valentni elektroni vodika inkorporiraju se u rešetku materijala [19, 24].



## KISIK

Elektronski afinitet kisika je relativno visok (1,465 eV), a potencijal ionizacije iznosi 13,614 eV. Adsorpcija kisika može uzrokovati odvajanje elektrona s površine metala. To ima utjecaj na gustoću elektrona na površini metala. Adsorpcijski sloj nosi negativni naboj, što povećava energiju površine metala [19, 26].

## DUŠIK

Atom dušika pokazuje iznimno niski elektronski afinitet od 0,05 eV, dok mu je potencijal ionizacije 14,54 eV. S obzirom na niski elektronski afinitet dušika, ne treba očekivati snažnu interakciju između dušika i površine metala. Proces disocijacije dušika na površini je značajno zahtjevniji u usporedbi s atomima kisika ili vodika, uglavnom zbog više disocijacijske energije dušika. Naknadna kemisorpcija dušika na metalnu površinu karakterizira niska radna funkcija, primjerice za volfram 4,53 eV, molibden 4,24 eV, titan 4,16 eV i željezo 4,63 eV [19, 25].

Adsorpcija plinova na površini tekućeg metala razlikuje se od procesa na površinama čvrstih metala zbog dinamičke prirode tekućih metala. Ova fluidna svojstva uvode varijable kao što su različite temperature unutar rastopljenog metala ili razlike u kemijskom sastavu na različitim područjima. Dodatni faktori obuhvaćaju moguću isparavanje metala, što potencijalno može utjecati na kemisorpciju plinova na površini tekućeg metala. To isparavanje također može promijeniti strukturu sloja adsorpcije i time utjecati na površinsku napetost tekućeg metala.

Sva tri plina – vodik, kisik i dušik – imaju značajan utjecaj na površinske karakteristike tekućeg željeza (Fe). Eksperimenti koje je proveo Lakomsky pokazali su da vodik ima površinsku aktivnost, ali tu aktivnost je lako suzbiti prisutnošću kisika, ugljika i silicija. Maksimalna adsorpcija vodika u tekućem metalu doseže vrijednost od  $22 \times 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup> pri temperaturi od 1585 °C. U slučaju rastopljenog metala s kemijskim sastavom od 1,2 % ugljika (C) i 0,5 % silicija (Si), proces kemisorpcije vodika na metalnoj površini se ne odvija [19, 20].

Dušik također pokazuje površinsku aktivnost u tekućim metalima. Koncentracija dušika od 0,04 % u tekućem metalu dovodi do smanjenja površinske napetosti s vrijednosti 1860 na 1645 mJ/m<sup>2</sup> na temperaturi od 1550 °C. Površinske aktivne osobine dušika ostaju prisutne i u legiranim

čelicima. Primjerice, materijal s kemijskim sastavom od 0,07 % ugljika (C), 0,4 % silicija (Si), 9,5 % mangana (Mn), 17,5 % kroma (Cr) i 4,5 % nikla (Ni), zajedno s otopljenim dušikom (N) u koncentraciji od 0,08 %, pokazuje površinsku napetost od 1311 mJ/m<sup>2</sup>. Povećanje koncentracije dušika na 0,27 % u čeliku dovodi do tek blagog smanjenja površinske napetosti na 1241 mJ/m<sup>2</sup>. Kada se dušik kemisorbira na tekuće željezo, vjerojatno se stvaraju komponente FeN pri temperaturi od 1575 °C, pri čemu je maksimalna ostvarena adsorpcija dušika  $10,18 \times 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup> [19, 20].

Kisik pozitivno ulazi u reakciju s tekućim željezom i niklom. Interakcijom između atoma kisika i željeza ili nikla formiraju se oksidi FeO i NiO unutar sloja adsorpcije. Maksimalna adsorpcija kisika u tekućem željezu može doseći vrijednost do  $17 \times 10^{-10}$ , dok u tekućem niklu ta vrijednost može doseći čak  $21,8 \times 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup> [19, 20].

Ako element (nečistoća) u tekućem metalu ima višu energiju površinske aktivnosti u usporedbi s gore navedenim plinovima, adsorpcija plinova ovisi o količini nečistoća prisutnih u rastopljenom metalu. Na primjer, sadržaj sumpora od 0,03 % (S) u tekućem željezu rezultira formiranjem spoja FeS na granici sloja rastopljenog metala. Sadržaj sumpora u tekućem metalu može dovesti do smanjenja adsorpcije plinova na tom granici sloju. Slični mehanizmi pretpostavljaju se za elemente poput kisika, telurija i selena. Utjecaj ovih površinski aktivnih elemenata u rastopljenim metalima na adsorpciju plinova može se poredati sljedećim redoslijedom: O > S > Se > Te. S druge strane, dodatak neaktivnih elemenata kao što su aluminij (Al), krom (Cr), bakar (Cu) i nikal (Ni) u rastopljeno željezo ne utječe na proces prijelaza plina u metal [19, 22, 23].

#### 2.4.6 Adsorpcija unutar temperaturnog gradijenta između tekućeg metala i plazme

Plazma luk obuhvaća molekule, atome i ione s povišenim unutarnjim energijama. Među njima, elektroni igraju ključnu ulogu olakšavajući kretanje nabijenih čestica između dvije elektrode. Gustoća elektrona može se kretati od  $10^{15}$  do  $10^{17}$  čestica po kubičnom centimetru (cm<sup>-3</sup>). Sama temperatura elektrona i temperatura težih čestica (kao što su atomi, radikali, ioni i molekule) obično su usporedive. Središnja regija plazma luka može dosegnuti temperature veće od 10000 K. Međutim, temperatura na obodnici plazmatskog stupca obično je niža. Tijekom postupaka zavarivanja, temperatura na granici plazmatskog stupca obično ostaje ispod 2500 K. Razlike u temperaturi između granice plazmatskog stupca i susjednog tekućeg metala potencijalno mogu

utjecati na adsorpciju plazma plinova u tekući metal. Interakcija ovih fizičkih svojstava, uz moguće kemijske reakcije između tališta metala i plinova u njihovim atomskim ili molekularnim fazama, zahtijeva istraživanje unutar precizno definiranih temperaturnih raspona [19].

Interakcija plina (plazma plina) s tekućim metalom u električnom luku odvija se između dvije slojevite površine  $S_a$  i  $S_d$ . Površina  $S_a$  označava područje na kojem se plin iz plazme adsorbira tekućim metalom. Površina  $S_d$  označava preostalo područje gdje plin iz metalne kupke isparava. Isparavanje plina iz metalne kupke potiče istodobno strujanje plinova u suprotnim smjerovima. U ovom slučaju, važno je poznavati energetska stanja diatomskih plinova prisutnih na površinama  $S_a$  i  $S_d$  [19].

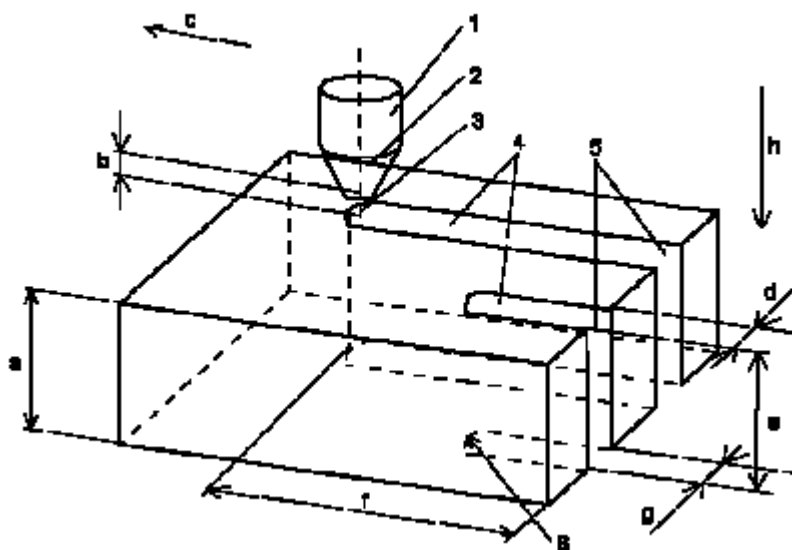
Metal se može zagrijati putem izvora koji nisu bazirani na luku (npr. indukcijsko grijanje, otvorena plamenica). U takvim slučajevima grijanja, pretpostavlja se stanje termodinamičke ravnoteže. Proces adsorpcije i isparavanja odvijaju se unutar istog područja, što omogućava pretpostavku jednakosti faza:  $S_a = S_d = S$ . Temperatura rastopljenog metala ne prelazi raspon od 2200 do 2300 K, a analiza energetskih uvjeta diatomskog plina nije nužna jer plin ostaje u svojoj diatomskoj fazi. Unutarnja energija unutar molekule plina postiže ravnotežu, usklađujući se s uobičajenim metalurškim procesima promatranim tijekom fuzije [19].

## **2.5 Procjena preciznosti rezanja u skladu s normom EN ISO 9013**

Evaluacija kvalitete rezanja i metoda mjerenja obrađuju se u međunarodnoj normi EN ISO 9013. Ova norma odnosi se na različite procese termičkog rezanja metala, uključujući rezanje kisikom, rezanje mlazom plazme i lasersko rezanje. Norma pojedinačno klasificira svaku metodu termičkog rezanja, ali osigurava da simboli i metode vrednovanja ostanu konzistentni za sve procese. Sljedeći opisi odnose se isključivo na rezanje metalnih materijala mlazom plazme.

Procjena kvalitete rezanja prema normi EN ISO 9013 provodi se za debljinu obratka od 1 do 150 mm koji se reže mlazom plazme. Norma ocjenjuje geometrijske zahtjeve obratka i tolerancije kvalitete rezanja [27].

Definicije i pojmovi objašnjeni su prema normi uz pomoć slikovnih prikaza. Termini vezani uz proces rezanja prikazani su na slici 2.22 dok su termini vezani uz konačnu geometriju obratka prikazani na slici 2.23.

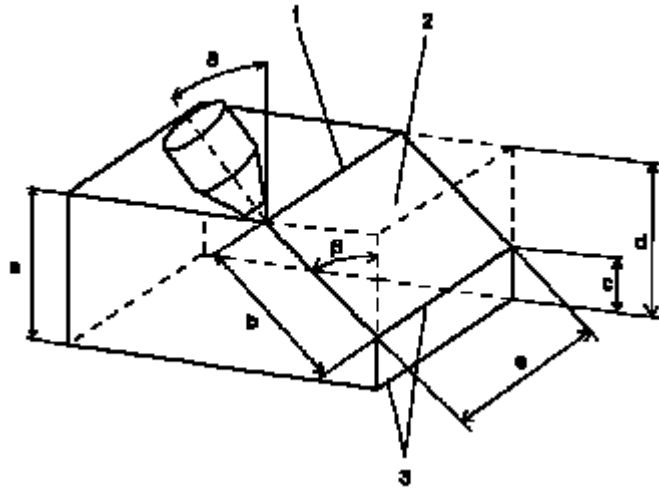


Slika 2.22 Označavanje pojmova koji se odnose na proces rezanja

Pojašnjenja:

1. Plazma plamenik
2. Mlaznica
3. Luk plazme
4. Zasjek
5. Početak reza
6. Kraj reza

- a – Debljina radnog komada
- b - Udaljenost postolja mlaznice
- c – Smjer kretanja
- d - Širina reznog prostora na vrhu
- e – Debljina rezanja
- f – Duljina rezanja
- g - Širina reznog prostora na dnu
- h – Smjer rezanja

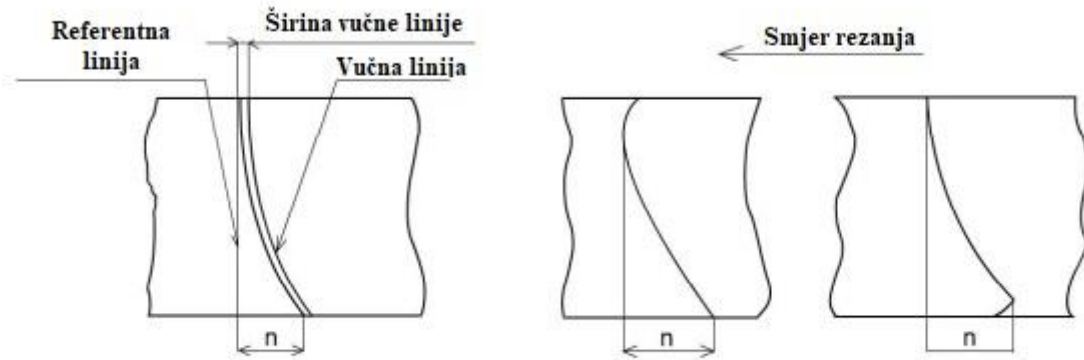


Slika 2.23 Označavanje pojmova koji se odnose na konačnu geometriju rezanja

Pojašnjenja:

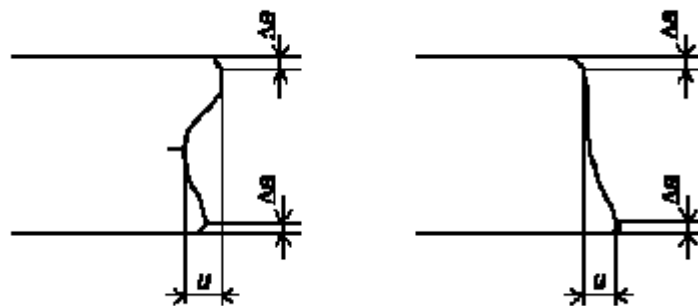
- |                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Vrh reza                  | a - Debljina obratka             |
| 2. Površina rezanja          | b - Debljina reza (prva opcija)  |
| 3. Donja rubna površina reza | c - Visina površine korijena     |
|                              | d - Debljina reza (druga opcija) |
|                              | e - Duljina rezanja              |

Norma EN ISO 9013 opisuje ravni rez i oblikovani rez. Klasifikacija oblikovanih rezova neće biti predmet diplomskog rada. Brzina rezanja povezana je s relativnom brzinom između plazma plamenika i materijala koji se reže. Širina utora precizno je definirana normom kao udaljenost između rezanih površina na vrhu reza. Ako rezana površina ima istopljeni rub, ta se udaljenost mjeri odmah ispod istopljenog ruba. Ponekad je moguće primijetiti tragove vučenja ( $n$ ) na rezanoj površini, kao što je prikazano na slici 2.24 [27].



Slika 2.24 Vrsta tragova vučenja  $n$ .

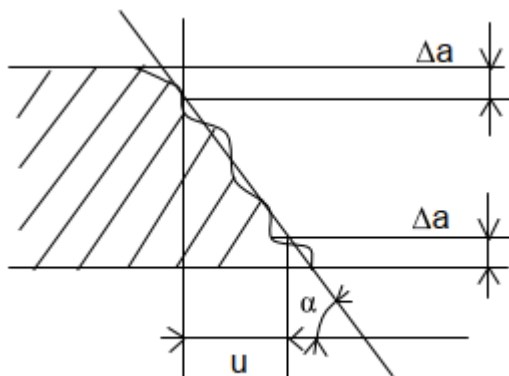
Metoda detekcije ravnosti i nagiba tolerancije  $u$  definirana je normom kao udaljenost između dvije paralelne ravne crte, obje sijeku površinu reza gdje je oblik reza ucrtan. Te ravne crte tvore određeni kut s površinom reza, kao što je  $90^\circ$  za ravni rez. Slika 2.25 prikazuje primjer maksimalne ravnosti i nagiba tolerancije  $u$  za ravni rez.



Slika 2.25 Primjer tolerancije ravnosti i nagiba ' $u$ '

Plazma uređaj koji se koristi za eksperimente radi na niskoj snazi, a maksimalna debljina reza za kvalitativnu procjenu iznosi 6 mm. Navedena metoda pojednostavljuje procjenu kvalitete reza za debljinu obratka od 3 do 15 mm. Važno je napomenuti da ova procjena ne odgovara normi. Nepraktična metoda mjerenja navedena u normi EN ISO 9013 ne uzima u obzir procjenu malih debljina materijala. Stoga je razvijena pojednostavljena metoda temeljena na izmjerenom nagibu kutova na rezanoj površini, kako je prikazano na slici 2.26. Tablica 2.3 podijeljena je na 5 zona

tolerancije koje sadrže nagib kutova na rezanoj površini. Vrijednosti su usporedive s rezultatima navedenim u normi EN ISO 9013 [27].

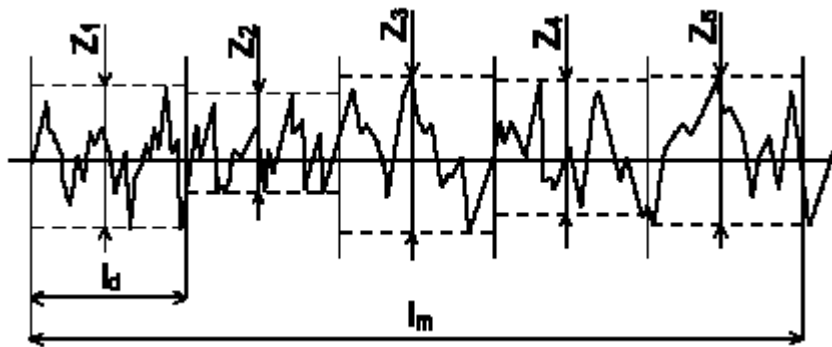


Slika 2.26 Metoda mjerenja nagiba kuta na rezanoj površini

Tablica 2.3 Određivanje ravnosti tanke debljine obratka putem mjerenja nagiba kuta

Debljina obratka [mm]	Ravnost				
	Zone tolerancija				
	1	2	3	4	5
	[α]	[α]	[α]	[α]	[α]
3	88,87	86,74	81,84	74	66,5
4	89,11	87,45	83,72	77,59	71,48
5	89,25	87,88	84,86	79,8	74,62
6	89,35	88,17	85,62	81,28	76,77
8	89,47	88,52	86,57	83,16	79,52
10	89,54	88,74	87,14	84,29	81,19
12	89,59	88,88	87,52	85,04	82,31
15	89,64	89,03	87,9	85,8	83,44

Hrapavost  $R_z$  na rezanoj površini predstavlja udaljenost između najvišeg vrha i najniže doline na izmjerenoj površini. Mjerenje se provodi pomoću posebnog uređaja za mjerenje hrapavosti opremljenog dijamantrnim vrhom. Dijamantni vrh može procijeniti visinu  $Z$  na određenoj duljini površine. Prosječna vrijednost  $R_{z5}$  visine nepravilnosti izračunava se kao aritmetička sredina petih regija na duljini  $l_d$ , kako je prikazano na slici 2.27 [27].



Slika 2.27 Mjerenje nepravilnosti na rezanoj površini

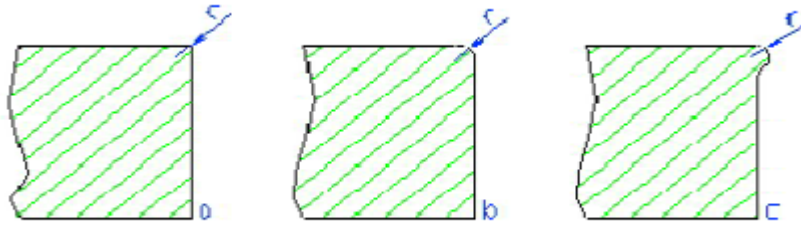
$l_m$  – ukupna duljina mjerenja

$l_d$  – segment ukupne duljine mjerenja ( $1/5 \times l_m$ )

$Z_{1-5}$  – djelomična visina nepravilnosti na površini [ $\mu\text{m}$ ]

Plazma luk može utjecati na gornju rubnu površinu reza, gdje se materijal topi pod utjecajem visoke temperature, a rastaljena masa izbacuje se strujom plazme. Stupanj zaobljenosti gornjeg ruba može biti podložan promjenama ovisno o udaljenosti između vrha mlaznice i materijala koji se reže, brzini rezanja, vrsti materijala itd. Rezovi se klasificiraju prema prisutnosti oštih rubova (a), veličini rastaljenog ruba, bilo s izbočinom (b) ili bez izbočine (c). Radijus  $r$  definira stupanj deformacije rastaljenog ruba, kako je prikazano na slici 2.28 [27].





Slika 2.28 Vrsta zaobljenosti gornjeg ruba označena kao 'r'

### 2.5.1 Uvjeti mjerenja

Mjerenje se mora izvoditi na čistoj površini reza, bez prisutnosti oksida i bez defekata. Odabir mjesta za mjerenje ovisi o obliku i veličini obratka. Površina reza klasificira se prema zonama tolerancije u odnosu na maksimalnu izmjerenu vrijednost. Mjerna točka trebala bi biti smještena na području gdje se očekuju najviše vrijednosti mjerenja. Za valjano mjerenje moraju se ispunjavati sljedeći uvjeti:

$u$  – dva seta od tri mjerenja na razmaku od 20 mm za svaki metar duljine reza,

$R_{z,5}$  – jedno mjerenje za svaki metar duljine reza.

Položaj mjesta mjerenja ograničen je karakterističnim odstupanjem  $a$ , što smanjuje područje mjerenja. Veličina karakterističnog odstupanja ovisi o debljini obratka. Obično se mjerenje hrapavosti  $R_{z,5}$  provodi na udaljenosti od  $2/3$  debljine reza kod plazma luka. Ovaj uvjet vrijedi za debljine obratka od 2 mm i više. Prosječna  $R_{z,5}$  hrapavost mora se mjeriti na minimalnoj duljini od 15 mm duž smjera kretanja plazma plamenika na površini reza [27].

Kvaliteta rezane površine postignute termičkim rezanjem opisuje se sljedećim karakterističnim vrijednostima:

- a) kvadratnost ili tolerancija nagiba  $u$ ,
- b) prosječna hrapavost  $R_{z,5}$ .

Ostale karakteristične vrijednosti mogu se uključiti u ocjenu kvalitete reza:

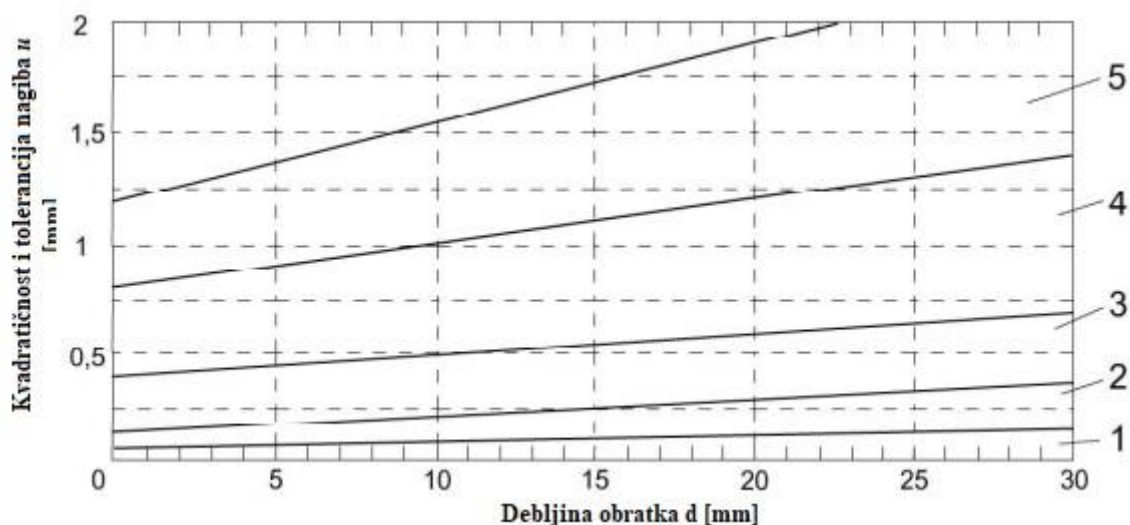
- a) tragovi vučenja  $n$ ,

- b) zaobljenost gornjeg ruba  $r$ ,
- c) pojava šljake ili istopljenih kapi na donjem dijelu reza.

Pojava oksida ili istopljenih kapi na donjem dijelu reza (formacija šljake) nije precizno definirana u normi EN ISO 9013 prema standardiziranom stupnju. Umjesto toga, ocjenjuje se pojedinačno prema željenoj kvaliteti reza.

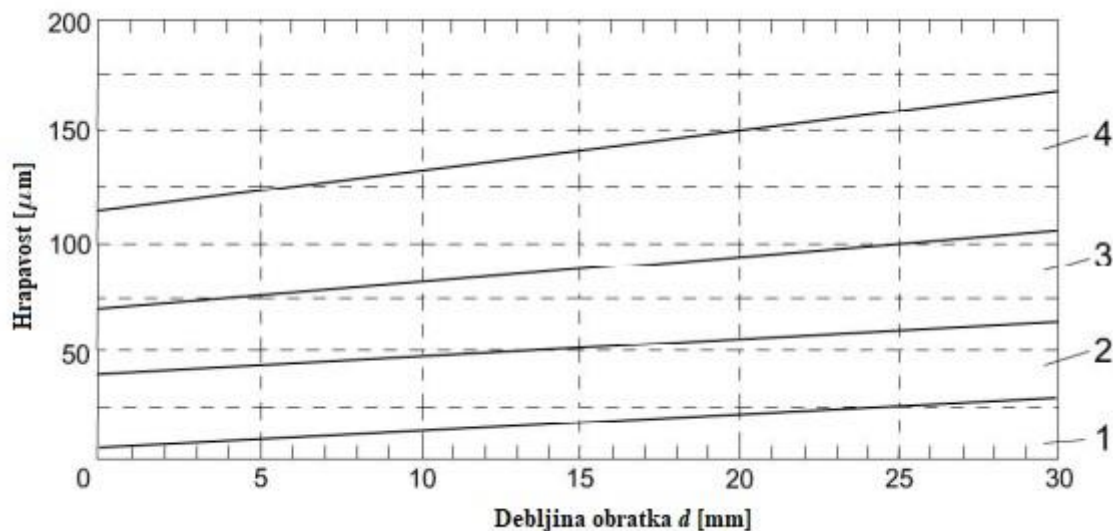
Norma EN ISO 9013 razlikuje rezove različite duljine i širine obratka. U slučaju da je omjer duljine i širine veći od 4:1, mora se definirati posebno karakteristično odstupanje za procjenu kvalitete reza, jer obradak može biti podložan različitim utjecajima.

Kvaliteta reza razlikuje se za različite procese toplinskog rezanja prema zonama tolerancije. Kvadratnost na rezanoj površini smanjuje se karakterističnim odstupanjem  $\Delta a$ , a zatim se može procijeniti ograničeno područje rezane površine. Rezultat kvadratnosti može se klasificirati pomoću odgovarajućeg grafa prikazanog na slici 2.29. Graf je podijeljen na pet različitih zona, pri čemu svaka zona označava postignutu kvalitetu reza. Zona 1 označava najbolju kvalitetu, a povećanje broja zone označava smanjenje kvalitete, posebno u smislu kvadratnosti na rezanoj površini. Spomenuti graf može se koristiti za maksimalnu debljinu obratka od 30 mm. Važno je napomenuti da norma također može procjenjivati debljinu obratka do 150 mm [27].



Slika 2.29 Kvadratnost i tolerancija nagiba 'u' za debljinu obratka do 30 mm.

Sljedeća karakteristična vrijednost hrapavosti reza  $R_{z5}$  također se koristi za klasifikaciju kvalitete. Procjena kvalitete temeljena na izmjerenoj vrijednosti  $R_{z5}$  olakšana je uz pomoć grafa prikazanog na slici 2.30. Graf je podijeljen na četiri zone tolerancije, omogućujući klasifikaciju izmjerenih vrijednosti ovisno o debljini obratka. Vrijednost u Zoni 1 označava najvišu postignutu kvalitetu rezane površine, a viši brojevi zona odgovaraju nižoj kvaliteti rezane površine, kako je prikazano na slici [27].



Slika 2.30 Prosječna hrapavost  $R_{z5}$  za debljinu obratka do 30 mm.

### 3. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA POSTIGNUTU KVALITETU REZA

#### 3.1 Pregled postojećeg stanja rezanja plazma lukom

Razvojne tendencije plazma rezanja usmjerene su prije svega na dizajn plazma plamenika i izvore napajanja. Stoga se mnogi proizvođači ovih plazma sustava trude povećati učinkovitost i snagu ove tehnologije kako bi postigli željenu kvalitetu reza. Poznate konvencionalne tehnologije koriste stlačeni zrak kao plazma medij, dok nova inovativna tehnologija koristi tekući plazma medij, što rezultira većom pokretljivošću uređaja. Međutim, važno je napomenuti da ova inovativna tehnologija nije detaljno proučena niti uspoređena s konvencionalnim metodama.

Karakteristične vrijednosti koje određuju kvalitetu reza nakon toplinskog rezanja plazmom su ravnost ili tolerancija nagiba  $u$  i hrapavost  $R_{z5}$ . Te karakteristične vrijednosti izravno utječu na kvalitetu reza prema normi EN ISO 9013. Norma također razmatra mogućnost pojave šljake ili istopljenih kapi na donjem rubu reza. Iako se ovaj problem možda ne čini važnim na prvi pogled, formiranje šljake je često raspravljana tema u praksi. Šljaka ili istopljene kapi na donjem rubu reza mogu značajno utjecati na kvalitetu reza. Nažalost, neke norme ne pružaju detaljne klasifikacije za takve karakteristične vrijednosti i smatraju ih dodatnim parametrima.

Utjecaj plazma medija može znatno utjecati na proces rezanja i kvalitetu reza. Na ovu temu provedeno je mnogo istraživanja koja se uglavnom koncentriraju na plazma plinove i njihov utjecaj na konvencionalne procese rezanja i kvalitetu reza. Međutim, za novu tehnologiju potrebno je detaljnije istraživanje topljenja i metalurških procesa, kemijske analize površine reza i istopljenih kapi na donjem dijelu materijala kako bi se preciznije razumio utjecaj kemijskog sastava plazma medija na proces rezanja. Na temelju teorijskih okvira, predloženih eksperimenata i dobivenih rezultata moguće je utvrditi prednosti i nedostatke različitih plazma medija u pogledu kvalitete reza, procesa rezanja, difuzije plina u zoni rezanja, promjena kemijskog sastava površine reza itd. Ovakvo istraživanje omogućava usporedbu između dviju tehnologija koje koriste različite kemijske sastave plazma medija.

### 3.2 Glavni cilj

Primjena plazma medija s optimalnim kemijskim sastavom mogla bi omogućiti visoku kvalitetu reza bez stvaranja istopljenih kapi. Inovativna tehnologija plazma luka omogućuje upotrebu različitih tekućih mješavina za rezanje, čime je moguće pratiti promjene u procesu rezanja i procijeniti kvalitetu reza. Ove mogućnosti koje pruža inovativna tehnologija predstavljaju novi smjer u razvoju naprednih plazma medija. Istraživanje se usmjerava na usporedbu osnovnog plazma medija s raznolikim kemijskim sastavima. Glavna svrha ovog istraživanja je procjena utjecaja predloženih medija na proces rezanja, kvalitetu reza. Temeljita analiza procesa rezanja je nužna, uzimajući u obzir fizičke i metalurške aspekte te dubinsku analizu zona reza i površina reza koje izravno utječu na kvalitetu reza.

### 3.3 Metoda rješavanja eksperimentalnog problema

Rezanje plazma lukom specifičan je proces u kojem je nužno promatrati fizička svojstva plazma luka i strujanje plina unutar prostora za rezanje te istraživanje interakcije plazme s tekućim metalom u utoru tijekom rezanja. Ovaj proces moguće je proučavati izravno uz pomoć visokobrzinske kamere ili proučavanjem kvalitete reza nakon toplinskog rezanja. U ovome radu fokus je na samu kvalitetu reza ovisno o zadanim parametrima rezanja kao i njihovom međudjelovanju kako bi se postigla najbolja kvaliteta reza za određene parametre obrade pomoću Taguchi metode.

Taguchi metoda, nazvana prema japanskom inženjeru i statističaru Genichirou Taguchiju, je statistička metoda planiranja eksperimenata koja se koristi za poboljšanje kvalitete proizvoda i procesa. Ova metoda se često primjenjuje u industriji kako bi se optimizirali proizvodi i procesi tako da budu manje osjetljivi na varijacije u okolini, materijalima ili procesima proizvodnje.

Glavni cilj Taguchi metode je minimiziranje varijacija i smanjenje defekata u proizvodnji, što dovodi do poboljšanja kvalitete proizvoda, smanjenja troškova i povećanja zadovoljstva kupaca. Ključni koncepti Taguchi metode uključuju [28]:

**Dizajn eksperimenata.** Taguchi metoda uključuje planiranje eksperimenata kako bi se testirali različiti faktori i njihove razine koji utječu na kvalitetu proizvoda ili procesa [28].

**Matrica eksperimenta.** Sastoji se od faktora, njihovih razina i kombinacija tih faktora koji se testiraju kako bi se identificirale najbolje postavke [28].

**Signal-šum omjer (S/N omjer).** Ovo je ključni koncept u Taguchi metodi. Cilj je maksimizirati S/N omjer kako bi se postigla željena kvaliteta proizvoda ili procesa. Signal predstavlja željeni učinak, dok šum predstavlja varijacije i nepoželjne efekte [28].

**Analiza varijance (ANOVA).** Koristi se za analizu rezultata eksperimenata kako bi se identificirali najvažniji faktori i njihovi utjecaji na kvalitetu [28].

**Optimizacija.** Nakon provedbe eksperimenata i analize rezultata, metoda se koristi za identifikaciju optimalnih postavki faktora za postizanje željenih ciljeva [28].

Taguchi metoda je posebno korisna u situacijama gdje je važno minimizirati varijacije i postići stabilnost procesa, kao što je proizvodnja u automobilskoj industriji, elektronicima ili farmaceutskoj industriji. Ova metoda pomaže proizvođačima da postignu bolje rezultate uz manje ispitivanja i troškova, što čini procese efikasnijim i konkurentnijim na tržištu [28].

Može se primijeniti i u kontekstu rezanja s plazmom kako bi se analizirao utjecaj mlaza plazme na kvalitetu reza. Ako se želi postići što glađa površina reza prilikom rezanja pomoću plazme, može se primijeniti Taguchi metodu kako bi se optimizirao proces. U nastavku su opisani potrebni koraci.

**Identifikacija faktora.** Prvo treba identificirati faktore koji mogu utjecati na glatkoću površine reza. To mogu biti parametri kao što su brzina rezanja, struja plazme, vrsta plazma plina, udaljenost između plazma izvora i materijala, kut mlaza plazme, itd.

**Odabir razina.** Za svaki identificirani faktor se odabiru različite razine koje će se testirati tijekom eksperimenata. Na primjer, brzina rezanja može se varirati u rasponu od niskih do visokih vrijednosti.

**Izbor eksperimentalnog plana.** Koristi se Taguchi matrica eksperimentalnog plana za odabir kombinacija faktora i razina koje će se testirati. Odabir plana ovisi o broju faktora i razina koje se želi testirati.

**Provođenje eksperimenata.** Provođe se eksperimenti prema odabranim kombinacijama faktora i razina. Pazi se na održavanje konstantnih uvjeta i prati glatkoća (hrapavost) površine reza u svakom eksperimentu.

**Mjerenje rezultata.** Za svaki eksperiment se pažljivo izmjeri glatkoća površine reza. To uključuje korištenje uređaja za mjerenje površinske hrapavosti.

**Analiza podataka.** Koriste se statistički alati poput analize varijance (ANOVA), kako bi se identificiralo koje kombinacije faktora i razina dovode do glade površine reza. Identificiraju se najvažniji faktori koji utječu na kvalitetu reza.

**Optimizacija procesa.** Na temelju analize podataka odabiru se optimalne vrijednosti za faktore koji su najviše utjecali na glatkoću površine reza. To može uključivati smanjenje brzine rezanja, prilagodbu struje plazme ili promjenu vrste plazma plina, ovisno o rezultatima.

**Verifikacija i praćenje.** Provođe se dodatni eksperimenti s odabranim optimalnim parametrima kako bi se provjerilo postizanje kontinuirano glatke površine reza. Također, prati se proces kako bi se osigurala dosljedna kvaliteta.

Korištenjem Taguchi metode može se sustavno optimizirati proces rezanja mlazom plazme kako bi se postigla što glađa površina reza. Važno je napomenuti da će ovi rezultati ovisiti o vrsti materijala koji se reže, a u ovom slučaju to će biti niskougljični čelik S235JR.

### 3.4 Postavke eksperimenta

Za postavke eksperimenta korištene su dostupne informacije na internetu kao i dostupni znanstveni članci koji se odnose na rezanje mlazom plazme [30, 31, 32, 33]. Za praktični se dio sugeriraju koraci opisani u nastavku.

Odabir tri različita plazma medija s posebnim kemijskim sastavom za rezanje plazmom, koji mogu imati različiti utjecaj na proces rezanja. Sljedeći se plazma mediji koriste u eksperimentu:

- voda + etanol ( $H_2O + C_2H_5OH$ ),
- zrak ( $N_2 + O_2$ ),
- voda ( $H_2O$ ).

Osnovna ideja provjere kvalitete obrađene površine tijekom rezanja je promjena kemijskog sastava plazma medija. Odabir plazma medija provodi se uzimajući u obzir koncentraciju kisika, dušika i vodika. Inovativna tehnologija koja koristi tekućinu kao plazma medij ima kemijski sastav tekuće vode + etanola. Etanol smanjuje temperaturu smrzavanja tekućine. Konvencionalna tehnologija koristi zrak kao medij.

Tri različita medija testira se na jednoj vrsti materijala, niskougličnom čeliku S235JR. Kemijski sastav radnog komada naveden je u sljedećoj tablici 3.1 [29].

Tablica 3.1 Kemijski sastav materijala za obradu

Kemijski sastav S235JR	
Element	Udio
C	0,134
Si	<0,01
Mn	0,48
Cr	-
Ni	-
P	0,008
S	0,014



Parametri rezanja isti su za sve eksperimente i korištene plazma medije. Jedina razlika je u brzini rezanja, jakosti električne struje i mediju koji se koristi u određenom pokusu. Parametri su sljedeći:

debljina radnog komada  $d = 6$  mm,

brzina rezanja za niskouglični čelik S235JR  $v_t = 300$  do 1800 mm/min,

električna struja  $I = 50$  do 100 A,

radni tlak za medij  $p = 5,5$  bara,

razmak između izlaza mlaznice i materijala  $s = 1,5$  mm.

U tablici 3.2 dani su početni faktori i razine potrebne za izradu Taguchijeve  $L_9$  matrice pokusa.

*Tablica 3.2 Faktori i razine pokusa*

Faktori	Razina		
	1	2	3
Brzina rezanja [mm/min]	300	900	1800
Jakost struje [A]	50	75	100
Vrsta medija	Zrak	Voda	Voda+Etanol

Za provedbu Taguchi optimizacijske metode koristio se softver Minitab koji je olakšao sami proces optimizacije jer nudi određene statističke alate koji skraćuju vrijeme postavljanja i uređivanja dobivenih rezultata pokusa kao i samu interpretaciju dobivenih rezultata.

### **3.5 Postupak optimizacije rezanja plazmom pomoću softvera Minitab**

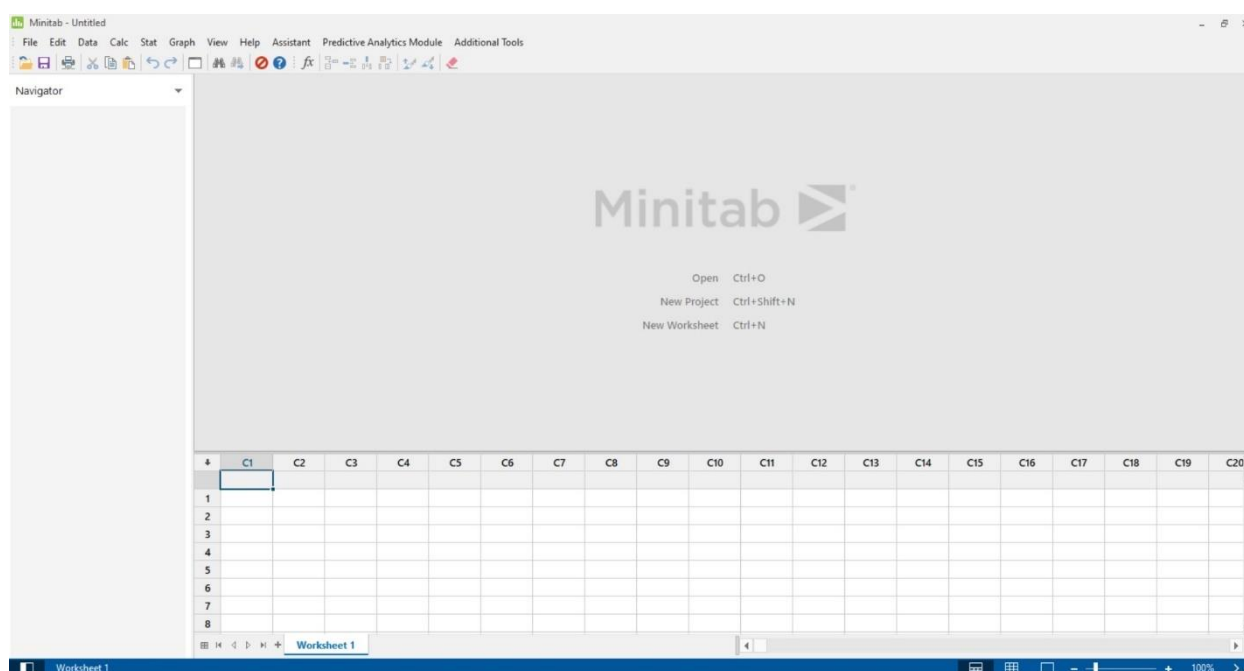
Nakon što su definirani ulazni parametri i njihove razine, utvrđuje se odgovarajući niz kako bi se identificirao prikladan tretman u eksperimentu. Za ovaj je eksperiment odabran  $L_9$  ( $3^3$ ) ortogonalni niz, kako je naznačeno u tablici 3.3. Stupac hrapavosti su vrijednosti koje se dobiju provođenjem eksperimenta sa zadanim parametrima koji su generirani unutar navedene matrice i upisuju se ručno kao "odgovor" na zadane parametre mjerenjem površine reza.

Tablica 3.3  $L_9$  ortogonalni niz pokusa

Pokušaj	Brzina rezanja [mm/min]	Jakost struje [A]	Plazma medij	Hrapavost [ $\mu\text{m}$ ]
1	300	50	Zrak	26
2	300	75	Voda	38
3	300	100	Voda+Etanol	50,6
4	900	50	Voda	46
5	900	75	Voda+Etanol	38,8
6	900	100	Zrak	33
7	1800	50	Voda+Etanol	54,8
8	1800	75	Zrak	58
9	1800	100	Voda	49

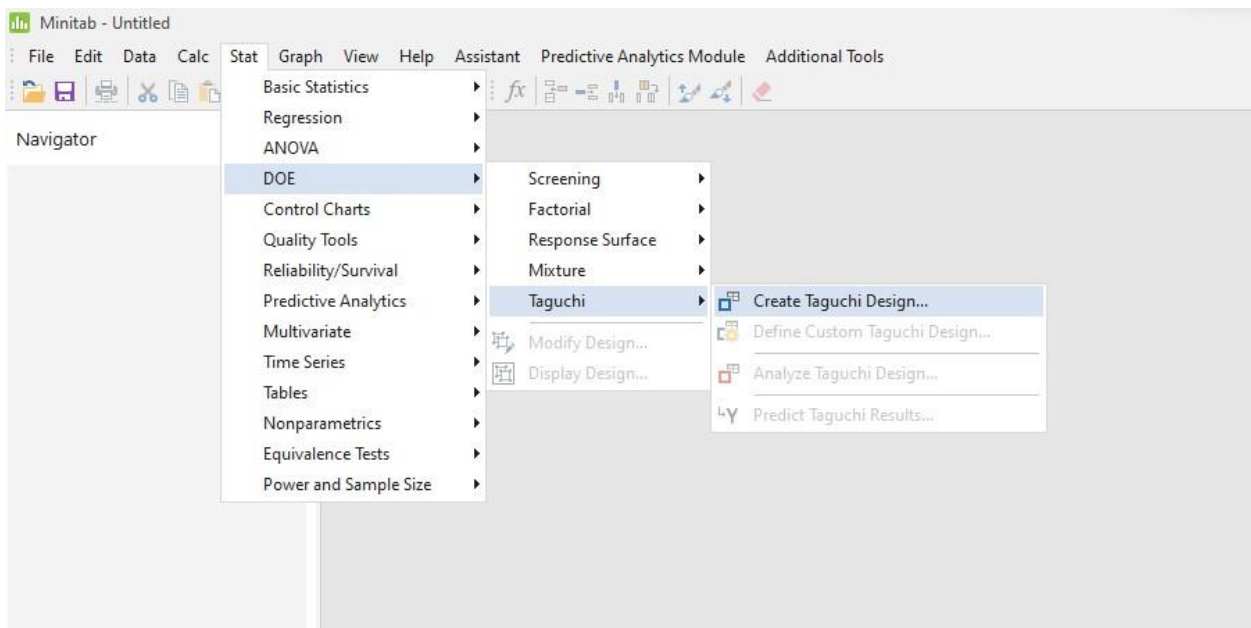
Postupak u programu Minitab opisan je u nastavku.

Nakon otvaranja programa Minitab započne se novi projekt, na slici 3.1 je prikazano sučelje programa.



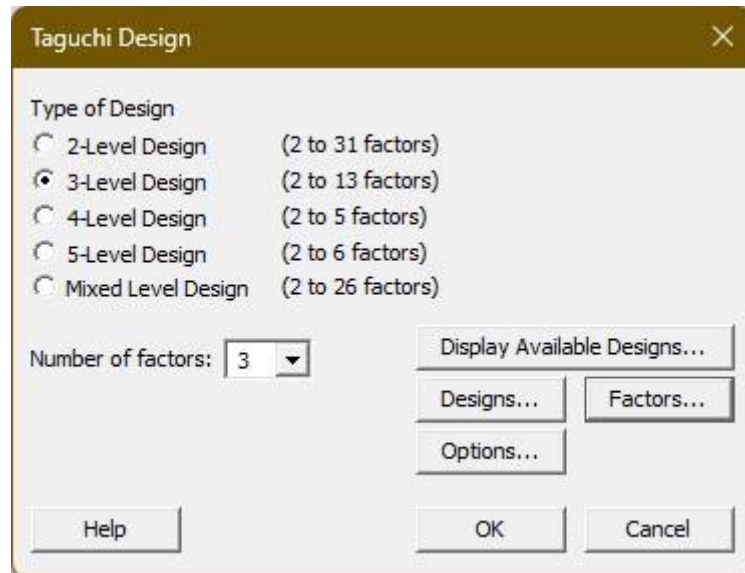
Slika 3.1 Sučelje softvera Minitab

Ide se na alatnu traku Stat > DOE > Taguchi > Create Taguchi Design, prikazano na slici 3.2.



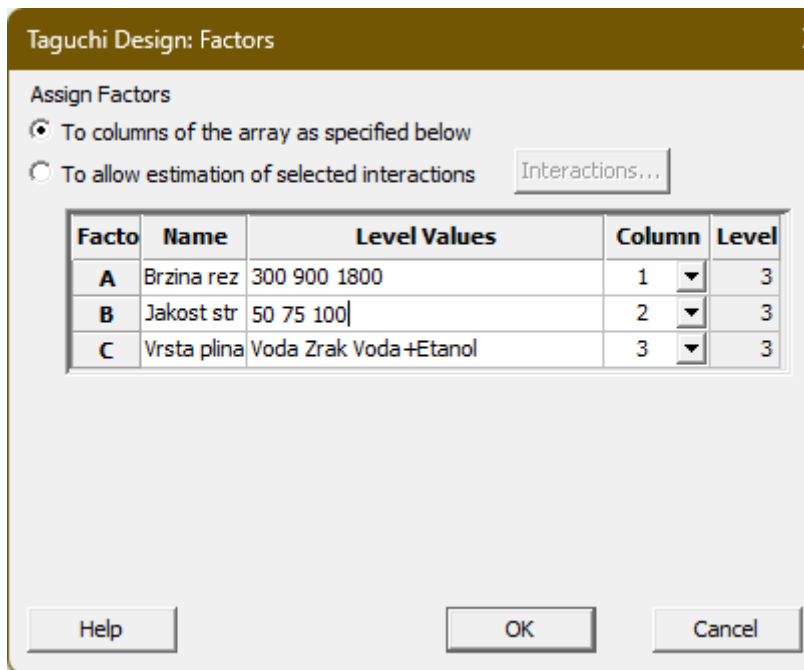
*Slika 3.2 Odabir Taguchi metode*

Otvora se novi prozor gdje se odabire koliko razina i faktora je potrebno za stvaranje matrice pokusa, što je vidljivo na slici 3.3.



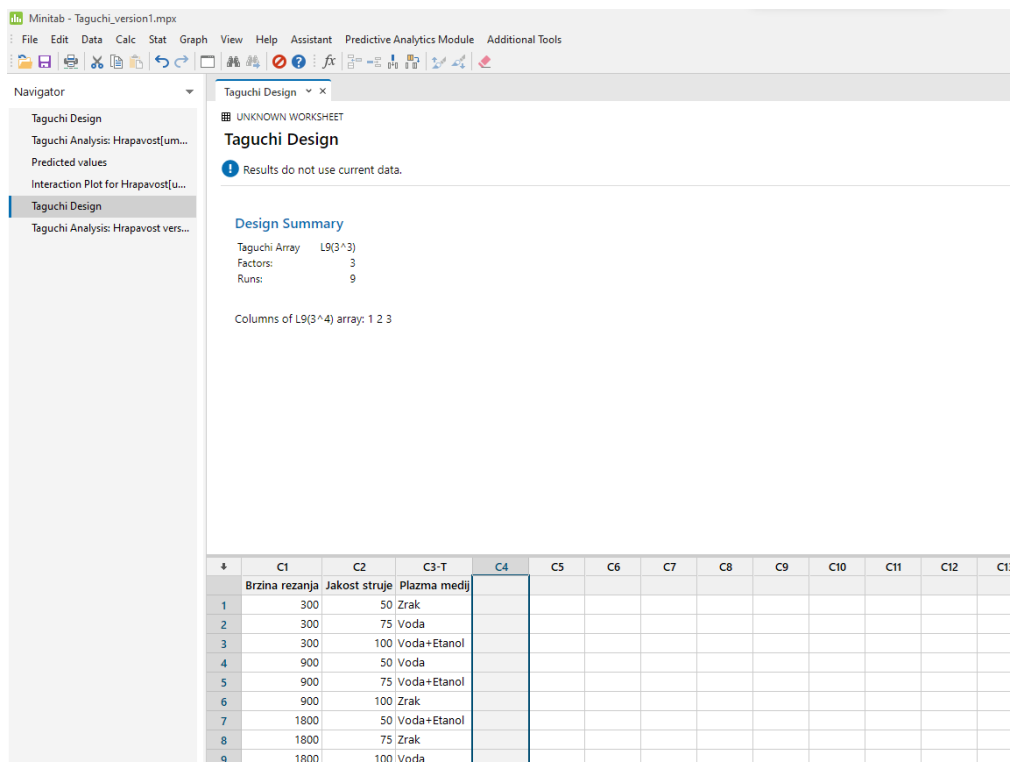
*Slika 3.3 Odabir razina i faktora matrice pokusa*

Sljedeći korak je otvoriti tab "Factors", gdje se ručno upisuju nazivi pojedinih faktora za pokus kao i njihove razine, što se vidi na slici 3.4.



Slika 3.4 Definiranje faktora i razina

Nakon potvrde odabira matrica pokusa izgleda ovako:



Slika 3.5 Generirana matrica pokusa

Sada, kada je gotova matrica pokusa, potrebno je dodati stupac s odgovorom na zadane kombinacije parametara i razina. Odgovori su u ovom slučaju mjerljiva rješenja u vidu hrapavosti površine koja je nastala kao posljedica rezanja plazmom u određenim uvjetima.

U sljedećem se koraku za svaki pokus dodaje hrapavost površine izmjerene nakon rezanja te je izgled matrice sljedeći:

The screenshot shows the Minitab software interface. The main workspace displays the 'Taguchi Design' summary, which includes the following information:

- Taguchi Array: L9(3^3)
- Factors: 3
- Runs: 9
- Columns of L9(3^4) array: 1 2 3

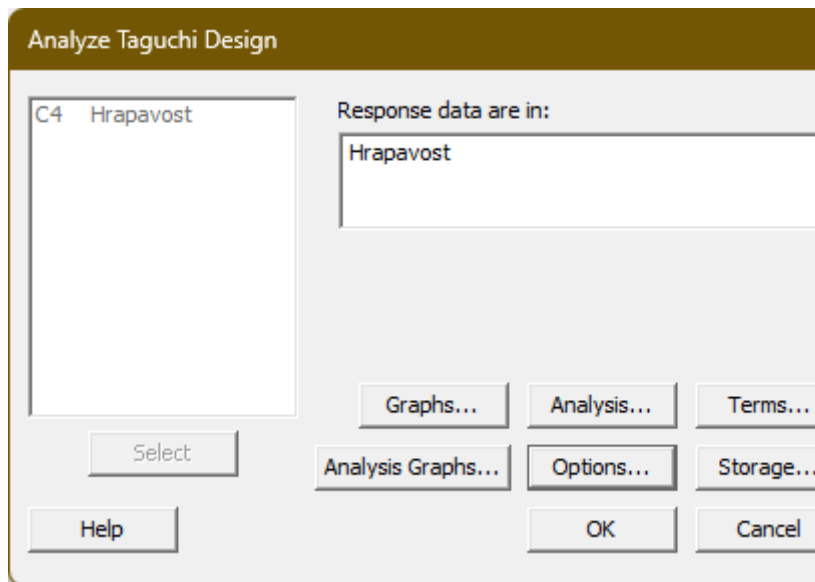
Below the summary is a data table with the following structure:

	C1	C2	C3-T	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	Brzina rezanja	Jakost struje	Plazma medij	Hrapavost					
1	300	50	Zrak	26,0					
2	300	75	Voda	38,0					
3	300	100	Voda+Etanol	50,6					
4	900	50	Voda	46,0					
5	900	75	Voda+Etanol	38,8					
6	900	100	Zrak	33,0					
7	1800	50	Voda+Etanol	54,8					
8	1800	75	Zrak	58,0					
9	1800	100	Voda	49,0					

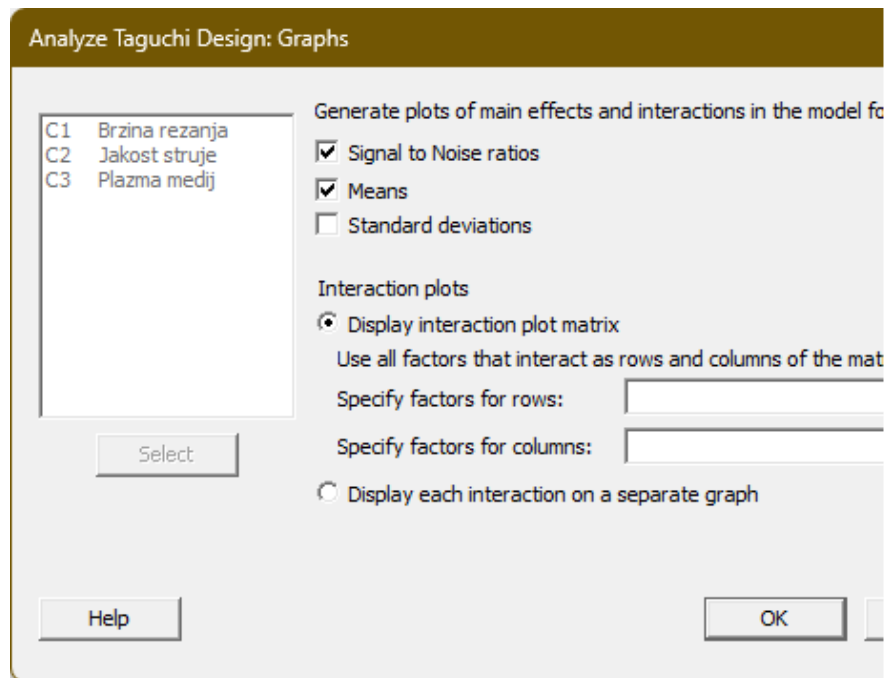
Slika 3.6 Izgled matrice sa izmjerenom hrapavosti rezane površine

Sljedeći korak je analiza dobivenih podataka prema Taguchi metodi optimizacije. Ide se u alatnu traku > Stat > DOE > Taguchi > Analyze Taguchi Design. Otvara se novi prozor gdje se odabire stupac "C4 Hrapavost" i selektira.

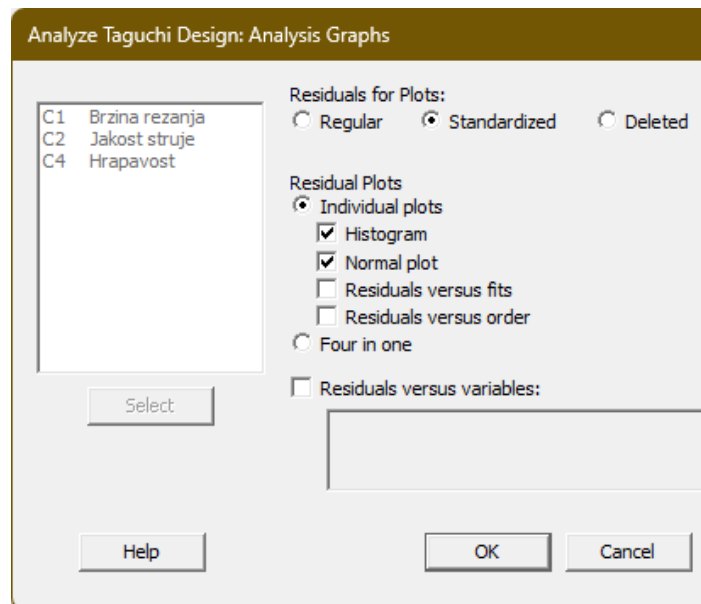
Potrebno je namjestiti kakve analize, rezultate i grafove se želi dobiti obradom navedenih podataka kao i Signal to Noise ratios. Postupak je prikazan na slikama 3.7 do 3.11.



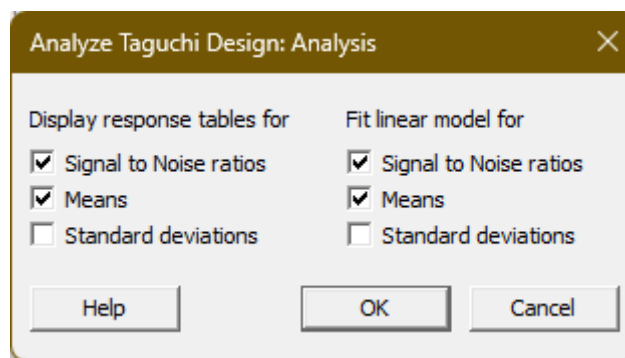
*Slika 3.7 Odabir podataka*



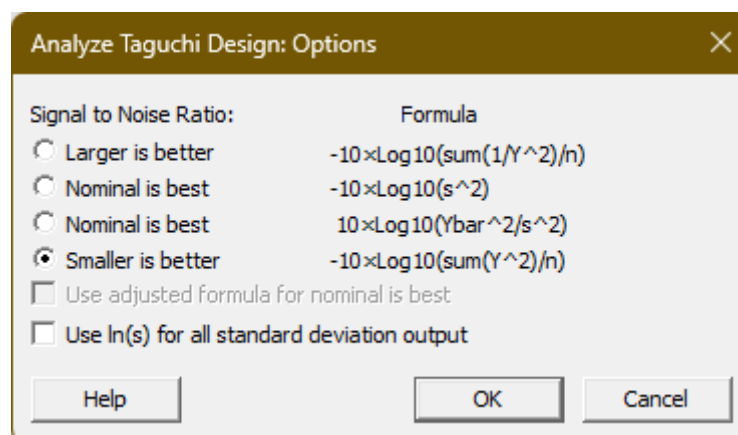
*Slika 3.8 Odabir grafikona za prikaz*



Slika 3.9 Prikaz grafikona

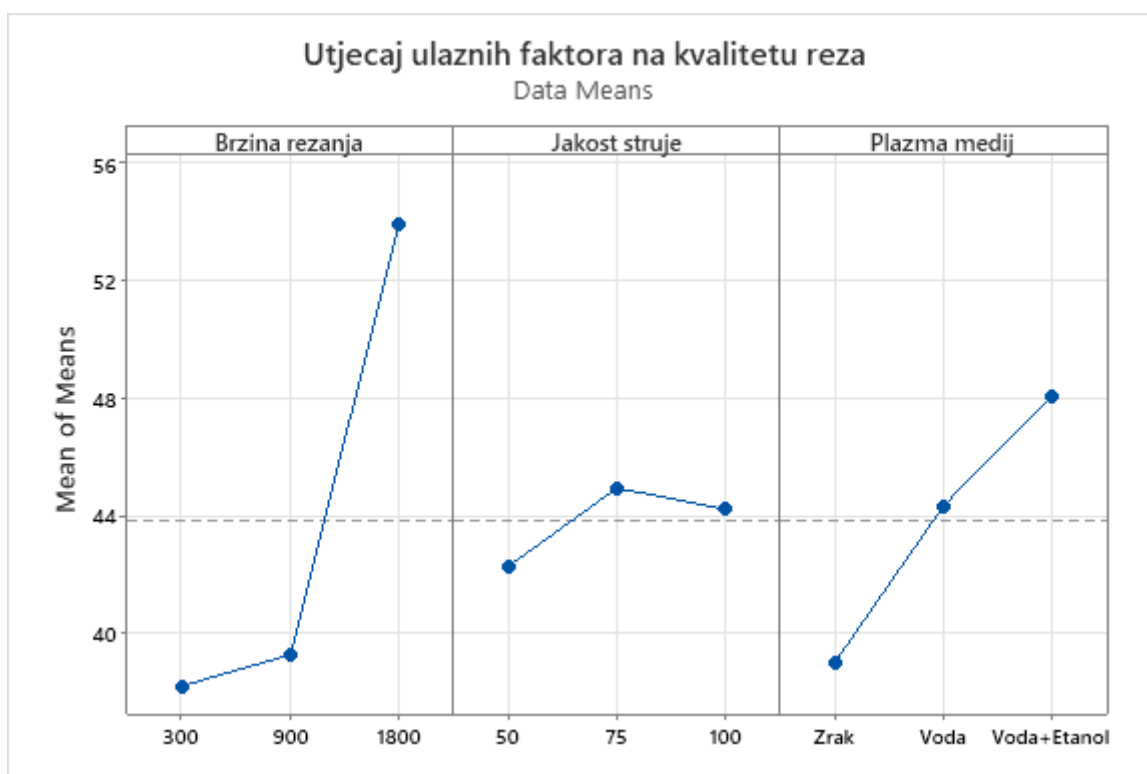


Slika 3.10 Vizualizacija podataka



Slika 3.11 Odabir omjera signal/šum

Korišteni su statistički alati kao što je analiza varijance (ANOVA), kako bi se identificiralo koje kombinacije faktora i razina dovode do glađe površine reza. Softver Minitab generira potrebne grafikone kako bi se mogla izvršiti identifikacija optimalnih parametara. Rezultati su prikazani na slikama niže.



Slika 3.12 Utjecaj ulaznih faktora na kvalitetu reza

Slika 3.12 prikazuje grafički ovisnost o kvaliteti površine reza kako se ulazni parametri mijenjaju. Iz grafa je moguće zaključiti da brzina rezanja i plazma medij značajno utječu na kvalitetu reza dok jakost struje ima manji utjecaj. U tablici 3.4 prikazano je rangiranje faktora prema njihovom utjecaju.

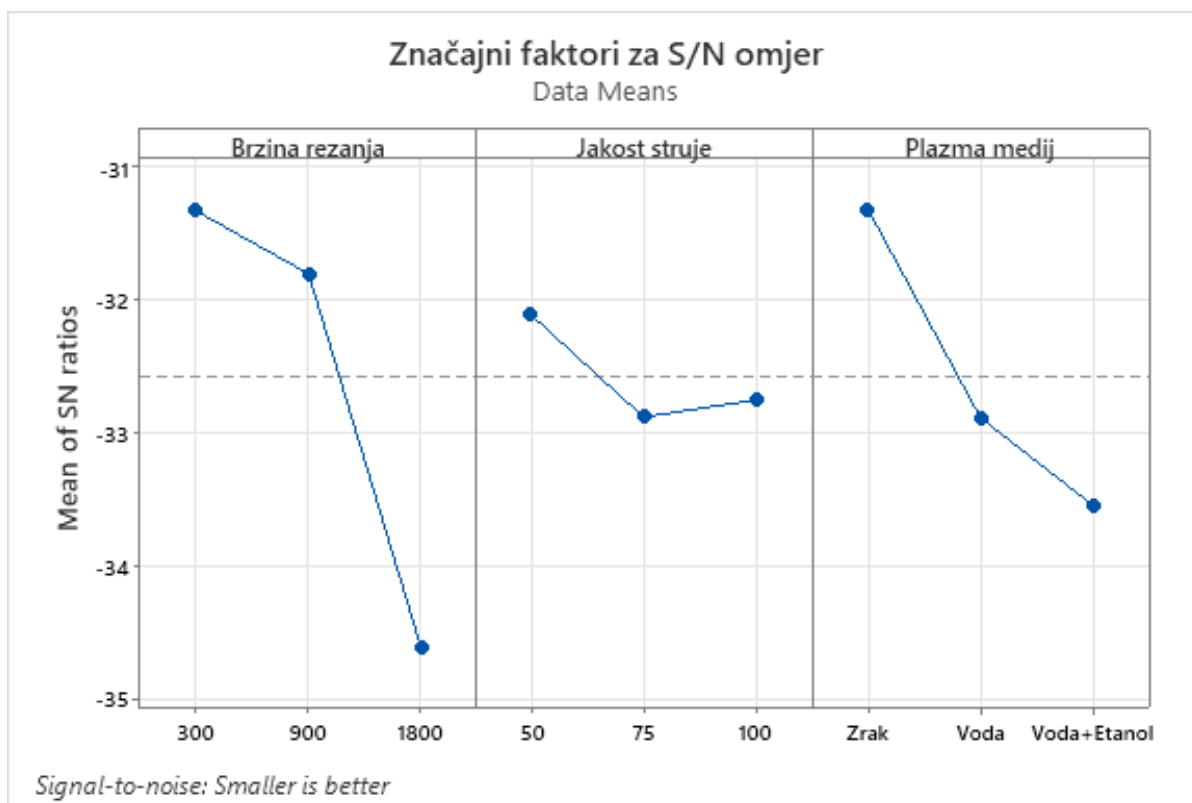
Tablica 3.4 Rangiranje ulaznih faktora

Razina	Brzina rezanja	Jakost struje	Plazma medij
1	38,20	42,27	39,00
2	39,27	44,93	44,33
3	53,93	44,20	48,07
Delta	15,73	2,67	9,07
Rang	1	3	2



U kontekstu analize podataka, S/N omjer (Signal-to-Noise Ratio) se koristi za procjenu kvalitete signala, gdje signal predstavlja korisne informacije koje se žele izmjeriti ili analizirati, dok šum predstavlja sve ostale neželjene signale koji mogu utjecati na mjerenje i potencijalno ga iskriviti. Ovaj omjer pomaže u razdvajanju stvarnih podataka od neželjenih ili slučajnih varijacija, što je ključno za donošenje pouzdanih zaključaka i odluka na temelju podataka.

Da bi se bolje razumjeli i interpretirali podaci, važno je smanjiti ili kontrolirati prisutni šum kako bi se osiguralo da signal dominira. To se postiže povećanjem S/N omjera. Visoki S/N omjer obično ukazuje na bolju kvalitetu podataka jer signal prevladava nad šumom, dok niski S/N omjeri mogu otežati analizu i interpretaciju podataka. Na slici 3.13 prikazani su grafički značajni faktori za S/N omjer za kvalitetu reza.



Slika 3.13 Značajni faktori za S/N omjer

Iz slike 3.13 je vidljivo da će najbolju kvalitetu reza dati parametri obrade (faktori) gdje je brzina rezanja 300 mm/min, jakost struje 50 A i plazma medij zrak.

S/N omjer u hrapavosti rezane površine predstavlja mjernu veličinu koja izražava omjer između "signala" koji predstavlja željenu kvalitetu rezane površine i "šuma" koji predstavlja nesavršenosti ili neželjene varijacije u toj površini. Signal u ovom kontekstu predstavlja glatku i željenu površinu rezanja, dok šum obuhvaća sve nepravilnosti, neravnine ili hrapavosti koje mogu biti prisutne na rezanoj površini.

Određivanje visokog S/N omjera za hrapavost rezane površine ukazuje na to da je rezana površina glatka i kvalitetna, s minimalnim šumom ili nesavršenostima. Ovo je posebno važno u industriji obrade metala i drugim sličnim primjenama gdje je kvaliteta rezanja od bitnog značaja. U tablici 3.5 također je prikazano rangiranje značajnih faktora za S/N omjer.

*Tablica 3.5 Rangiranje odgovora za S/N omjer*

Manje je bolje

Razina	Brzina rezanja	Jakost struje	Plazma medij
1	-31,33	-32,11	-31,31
2	-31,80	-32,88	-32,88
3	-34,62	-32,75	-33,55
Delta	3,29	0,77	2,23
Rang	1	3	2

### 3.5.1 Analiza varijance (ANOVA)

ANOVA, što je skraćena od "Analysis of Variance" (Analiza varijance), je statistička metoda koja se koristi za analizu razlika između srednjih vrijednosti više grupa ili skupina podataka. ANOVA je posebno korisna kada se želi saznati jesu li razlike između grupa stvarne ili su rezultat slučajnih varijacija.

Cilj ANOVA-e je odgovoriti na pitanje jesu li srednje vrijednosti između više grupa statistički značajno različite. Drugim riječima, traži se utvrđivanje postoji li značajna varijabilnost između grupa ili su te razlike vjerojatno rezultat slučajnih fluktuacija.

Rezultat ANOVA-e je  $F$ -statistika i  $p$ -vrijednost. Ako je  $p$ -vrijednost manja od odabrane statističke značajnosti (najčešće postavljene na 0,05), to ukazuje da postoje statistički značajne razlike između dviju grupa. U tablici 3.6 prikazani su podaci za analizu varijance ulaznih faktora.

Tablica 3.6 Analiza varijance za ulazne faktore

**Analysis of Variance for Means**

Izvor	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Brzina rezanja	2	463,79	463,79	231,893	1,58	0,387
Jakost struje	2	11,39	11,39	5,693	0,04	0,963
Plazma medij	2	124,59	124,59	62,293	0,43	0,702
Greška	2	293,12	293,12	146,560		
Ukupno	8	892,88				

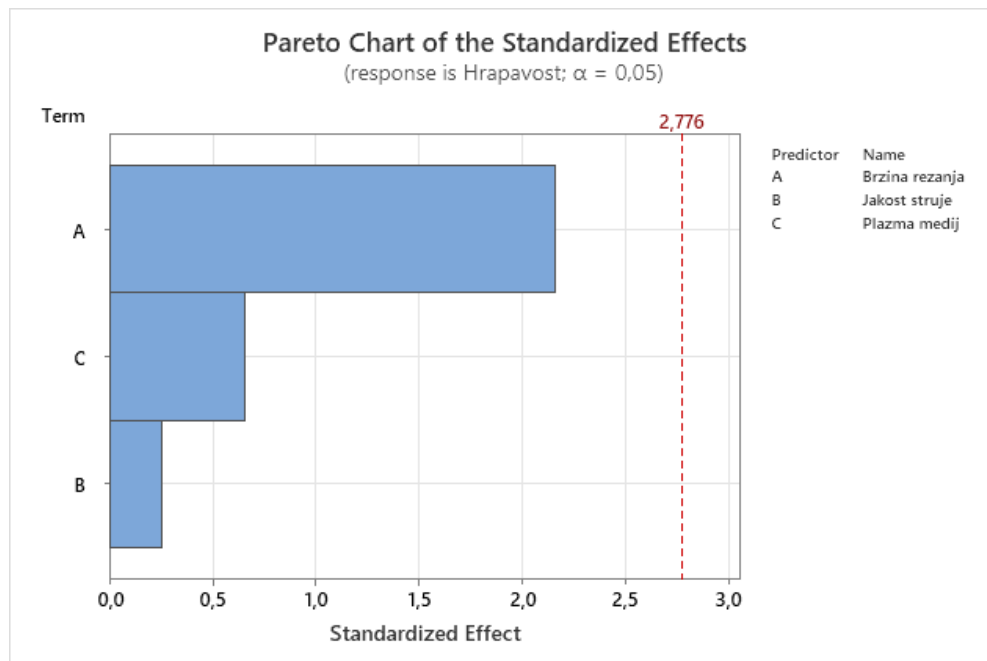
Iz tablice 3.6 je vidljivo da parametri brzina rezanja i plazma medij imaju značajnu  $F$  vrijednost, stoga su ti parametri značajni, dok jakost struje nije značajan parametar. Također  $F$  vrijednost govori da brzina rezanja ima najveći utjecaj pa onda plazma medij. Isto je vidljivo i u tablici 3.7 za analizu varijance S/N omjera.

Tablica 3.7 Analiza varijance za S/N omjer

**Analysis of Variance for SN ratios**

Izvor	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Brzina rezanja	2	18,975	18,975	9,4877	1,44	0,410
Jakost struje	2	1,022	1,022	0,5111	0,08	0,928
Plazma medij	2	7,891	7,891	3,9454	0,60	0,626
Greška	2	13,194	13,194	6,5969		
Ukupno	8	41,082				

Isto je vidljivo i na pareto dijagramu standardiziranih efekata prikazanom na slici 3.14.



Slika 3.14 Pareto dijagram utjecajnih faktora

Pomoću Taguchi metode optimizacije određeni su glavni utjecajni faktori i vrijednosti tih parametara za optimalnu kvalitetu reza. U sljedećem će se koraku pokušati predvidjeti kako će izgledati hrapavost površine reza prema identificiranim optimalnim parametrima.

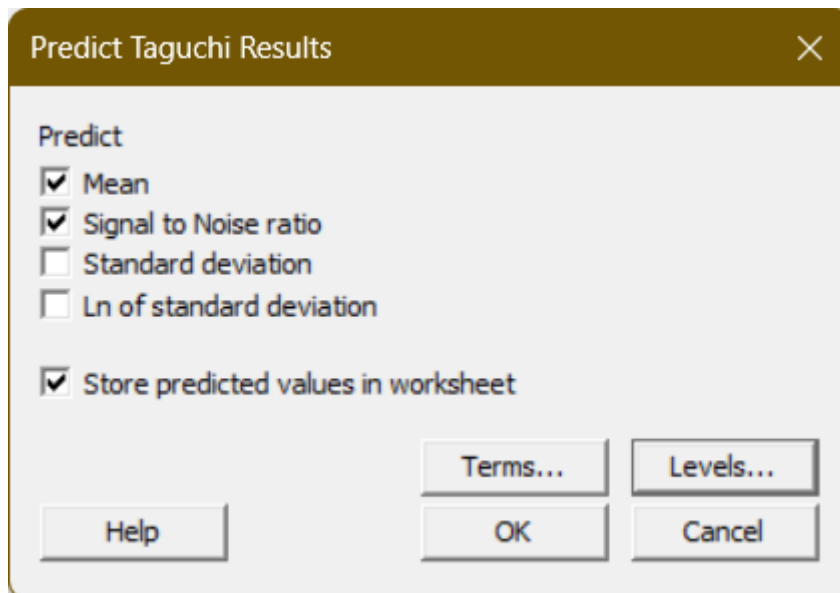
Kao što je već zaključeno, prema Taguchi metodi najbolja kvaliteta reza će biti za:

brzinu rezanja – 300 mm/min,

jakost struje – 50 A,

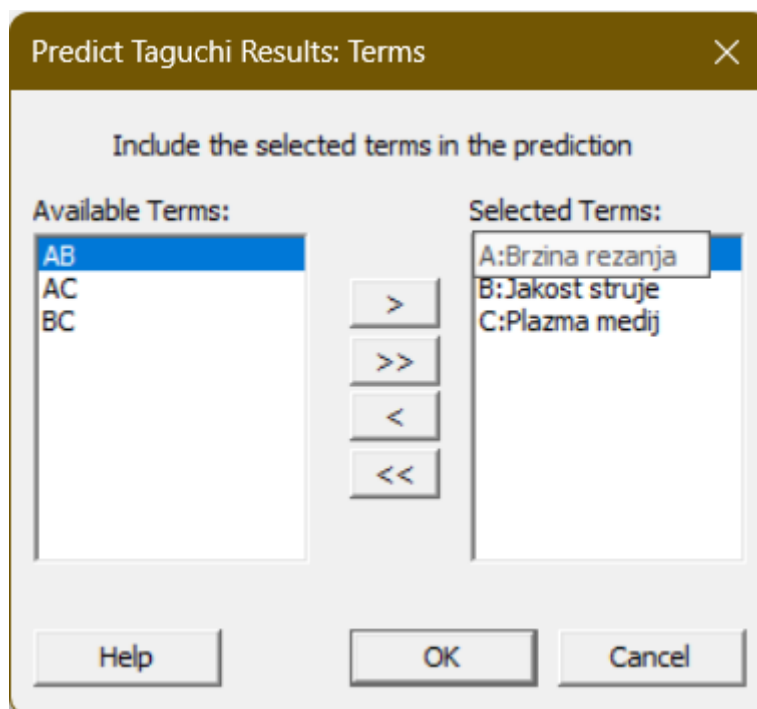
plazma medij – zrak.

Ide se u traku Stat > DOE > Taguchi > Predict Taguchi results i otvara se novi prozor kao što je prikazano na slici 3.15.



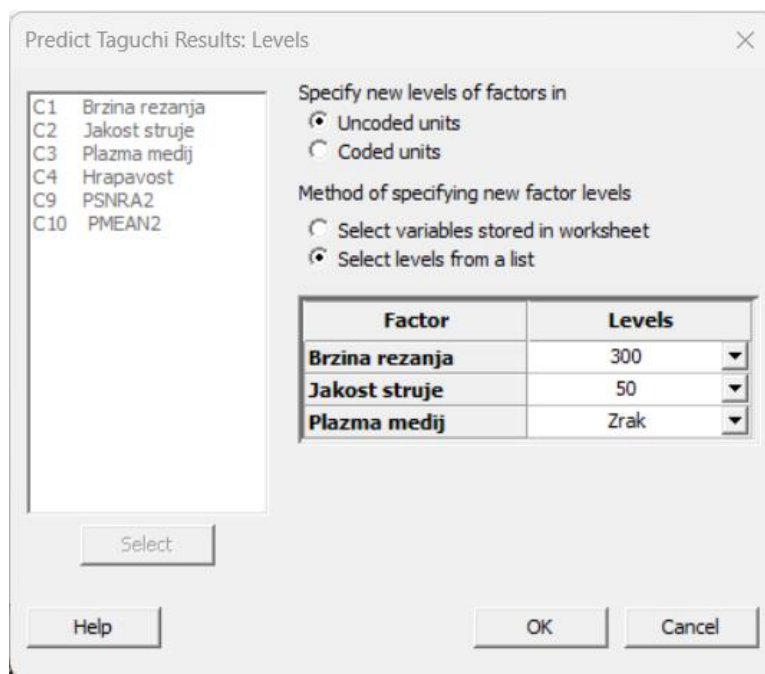
*Slika 3.15 Postavke za predviđanje optimalnog rješenja*

Otvora se tab "Terms" i namještaju podaci kako je prikazano na slici 3.16.



*Slika 3.16 Postavljanje podataka*

Zatim se otvara tab "Level" gdje program traži unos optimalnih parametara identificiranih u prethodnim koracima, gdje će ponovo napraviti analizu baziranu na dostupnim podacima i provedenim analizama. Postavke za predviđanje optimalne kvalitete rezane površine dane su na slici 3.17.



Slika 3.17 Unos optimalnih parametara za predviđanje hrapavosti rezane površine

Tablica 3.8 Rezultati predviđanja Taguchi optimizacije

### Predviđanje

S/N Ratio	Mean
-29,5870	31,8667

Tablica 3.9 Postavke optimalnih parametara

### Postavke

Brzina rezanja	Jakost struje	Plazma medij
300	50	Zrak

Rezultati iz tablice 3.8 govore da će za zadane postavke parametara rezanja mlazom plazme prikazanim u tablici 3.9 očekivana hrapavosti rezane površine biti  $31,8667 \mu\text{m}$ . Pomoću provedenih eksperimenata se na jednostavan, robustan i brz način došlo do konkretnih rezultata kada se govori o kvaliteti reza testnog komada niskougličnog čelika S235JR. Pomoću Taguchi metode analize efekata plazmenih plinova na kvalitetu reza je kroz 9 kombinacija pokusa određeno koja će kombinacija dostupnih i unaprijed definiranih parametara biti optimalna za postizanje zadovoljavajuće kvalitete reza.

## 4. ZAKLJUČAK

U zaključku ovog istraživanja, ključna tema bila je analiza utjecaja različitih plazma medija na proces rezanja mlazom plazme. Studija pruža dublje razumijevanje ove tehnike čiji su potencijalni učinci na industriju i proizvodnju izuzetno značajni.

Određivanje optimalnih parametara za postizanje željene kvalitete rezane površine, temeljem eksperimentalnih rezultata, predstavlja važan korak naprijed. Utvrđeno je da su brzina rezanja i vrsta plazma medija ključni faktori. Korištenje Taguchi optimizacijske metode i softverskog alata kao što je Minitab omogućilo je precizno određivanje najbolje kombinacije parametara za postizanje optimalne kvalitete reza.

Naglasak na niskougličnom čeliku S235JR kao materijalu za rezanje ima praktičnu važnost, budući da se ovaj materijal često koristi u različitim industrijama. Provedeno istraživanje pruža konkretne smjernice za postizanje najboljih rezultata u rezanju mlazom plazme ovog materijala.

Ovaj rad ne samo da pruža eksperimentalne rezultate, već također postavlja temelje za buduće istraživanje u ovom polju. I dalje ostaju mnoga otvorena pitanja, uključujući utjecaj drugih parametara na kvalitetu rezane površine i primjenu ove tehnike u različitim sektorima industrije.



## Literatura

- [1] BOULOS, M.I., FAUCHAIS, P.; PFENDER, E. Thermal Plasmas: Fundamentals and Application: Volume 1. New York: Plenum Publishing Corporation, 1994.
- [2] MURPHY, A.B. Thermal Plasmas in Gas Mixtures. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001.
- [3] BOULOS, M.I. Thermal Plasma Flow Visualization and Diagnostics, Scherbrooke, 2000.
- [4] RAMAKRISHNAN, S. et al. Influence of Gas Composition on Plasma Arc Cutting of Mild Steel. Appl. Phys., 2000.
- [5] RAMAKRISHNAN, S., ROGOZINSKI, M.W. Properties of Electric Arc Plasma for Metal Cutting. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997.
- [6] Cukor, G.: Predavanje 8: EBM i PBM, Rijeka, 2022.
- [7] Thermal Plasma Torches and Technologies: Plasma Torches. Basic Studies and Design. O.P. Solonenko. 1st edition. England: Pearl Tree Press, 2000.
- [8] Thermal Plasma Generators. O.P. Solonenko, M.F. Zhukov. 1st edition. Cambridge: Cambridge Interscience Publishing, 1994.
- [9] BINI, R., KUTLU, A.E., MONNO, M. A 3-D Modeling and Experimental Study of a Plasma Arc Cutting Torch. In 7th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 2004.
- [10] BINI, R., KUTLU, A.E., MONNO, M. Numerical Modelling of a Plasma Arc Cutting Torch. In 17. Congres Francais de Mecanique, 2005.
- [11] GLEIZES, A., GONZALEZ, J.J., FRETON, P. Thermal plasma modelling. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005.

- [12] PATEYRON, B., et al. Sound Velocity in Different Reacting Thermal Plasma Systems. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1996.
- [13] RAMAKRISHNAN, S., ROGOZINSKI, M.W. Properties of Electric Arc Plasma for Metal Cutting. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997.
- [14] TEULET, P., et al. Experimental Study of an Oxygen Plasma Cutting Troch : II. Arc-Material Interaction, Energy Transfer and Anode Attachment. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006.
- [15] GIRARD, L., et al. Experimental Study of an Oxygen Plasma Cutting Troch: I. Spectroscopis Analysis of the Plasma Jet. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006.
- [16] RAMAKRISHNAN, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Controlled Plasma Arc Cutting, 1999.
- [17] HRABOVSKÝ, M., et al. Structure of Mixing Zone of Thermal Plasma Jet. In Arc Plasma and Plasmatrons, 1999.
- [18] HRABOVSKÝ, M., KOPECKÝ, V., SEMBER , V. Water Stabilized Arc as a Source of Thermal Plasma, 2000.
- [19] LAKOMSKY, V.I. Alloying Liquid Metal with Nitrogen from Electric ARC Plasma. 1st edition. Cambridge: Pear Tree Press, 1999.
- [20] POPE, S.I. Theory of metallurgical processes. Moscow: VINITI, 1971.
- [21] SERBIN, S.I., et al. Modeling of Gas Phase Composition in Plasma Cutting Ship Hull Steels. Paton, 2004.
- [22] KAIBICHEV, A.V., LEPINSKIKH, B.M. Refining of Liquid Metals and Alloys in Electric Field: Nauka, 1983.

- [23] CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data. David R. Lide. 79th edition. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [24] Ferroalloys & Alloying Additives Handbook – Hydrogen, 2002.
- [25] Ferroalloys & Alloying Additives Handbook – Nitrogen, 2002.
- [26] Ferroalloys & Alloying Additives Handbook – Oxygen, 2002.
- [27] EN ISO 9013
- [28] K. Krishnaiah and P. Shahabudeen, APPLIED DESIGN OF EXPERIMENTS AN TAGUCHI METHODS, New Delhi-110001, 2012.
- [29] <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/>
- [30] Sahil Sharma, Mukesh Gupta, Raj Kumar, N. S Bindra. Experimental Analysis and Optimization of Process Parameters in Plasma Arc Cutting Machine of EN-45A Material Using Taguchi and ANOVA Method, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Industrial Engineering Vol:11, No:7, 2017.
- [31] Chirag.K.Kolambe, Sambhaji.V.Sagare, Plasma arc Cutting Parameters using TAGUCHI Method, International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 8, Issue 9, 2020.
- [32] S. Ramakrishnan, V. Shrinet, F. B. Polivka, T. N. Kearney and P. Koltun, Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel, Journal of Physics D Applied Physics, September 2000.
- [33] Jacek Górk, The effect of air plasma cutting on the quality, structural transformations and changes in the chemical composition of structural steel, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023.

## Popis slika

Slika 2.1 Kompozicija dušikove plazme pri konstantnom tlaku 100 kPa.....	4
Slika 2.2 Klasifikacija plazme.....	5
Slika 2.3 Maxwell-Boltzmannova distribucija brzina čestica u plazmi.....	7
Slika 2.4 Vrsta plazme ovisi o temperaturi elektrona $T_e$ i teških čestica $T_h$ .....	8
Slika 2.5. Toplinska plazma generirana različitim plinovima pri 100A (dušik, zrak, kisik) .....	9
Slika 2.6 Obradni sustav PBM .....	11
Slika 2.7 Obrada mlazom plazme .....	11
Slika 2.8 Sustav plazme za ručno rezanje sa svim komponentama .....	12
Slika 2.9 Konstrukcija gorionika za zavarivanje i rezanje .....	13
Slika 2.10 Komponente plazma gorionika (s lijeva: zaštitna kapa, mlaznica, katoda, prsten za vrtloženje, tijelo gorionika).....	13
Slika 2.11 Princip toplinskog rezanja sa PBM metodom.....	14
Slika 2.12 Prenosivi (lijevo) i neprenosivi luk (desno).....	15
Slika 2.13 Plazma luk sužen strujanjem plina kroz kanal mlaznice.....	16
Slika 2.14 Distribucija energije u procesu rezanja.....	19
Slika 2.15 Poprečni presjek zasjeka .....	20
Slika 2.16 Usporedba različitih tehnologija rezanja.....	21
Slika 2.17 Topljivost vodika u tekućem željezu u temperaturnom intervalu od točke taljenja ....	23
Slika 2.18 Topljivost vodika u tekućem aluminiju pri visokoj temperaturi.....	24
Slika 2.19 Apsorpcija plina tekućim metalom na sučelju između plina i tekućeg metala .....	27
Slika 2.20 Granični slojevi za temperaturu ( $\delta_a$ ), viskoznost ( $\delta_v$ ) i difuziju ( $\delta_D$ ) u kontekstu gibanja tekućeg metala ( $v$ ) uzduž čvrste ploče ( $x$ ) .....	29
Slika 2.21 Model interakcije između molekule plina i površine metala .....	32
Slika 2.22 Označavanje pojmova koji se odnose na proces rezanja .....	36
Slika 2.23 Označavanje pojmova koji se odnose na konačnu geometriju rezanja.....	37
Slika 2.24 Vrsta tragova vučenja $n$ .....	38

Slika 2.25 Primjer tolerancije ravnosti i nagiba $u$ .....	38
Slika 2.26 Metoda mjerenja nagiba kuta na rezanoj površini .....	39
Slika 2.27 Mjerenje nepravilnosti na rezanoj površini.....	40
Slika 2.28 Vrsta zaobljenosti gornjeg ruba označena kao $r$ .....	41
Slika 2.29 Kvadratnost i tolerancija nagiba 'u' za debljinu obratka do 30 mm. ....	42
Slika 2.30 Prosječna hrapavost $R_{z5}$ za debljinu obratka do 30 mm. ....	43
Slika 3.1 Sučelje softvera Minitab .....	50
Slika 3.2 Odabir Taguchi metode.....	51
Slika 3.3 Odabir razina i faktora matrice pokusa .....	51
Slika 3.4 Definiranje faktora i razina .....	52
Slika 3.5 Generirana matrica pokusa.....	52
Slika 3.6 Izgled matrice sa izmjerenom hrapavosti rezane površine .....	53
Slika 3.7 Odabir podataka .....	54
Slika 3.8 Odabir grafikona za prikaz.....	54
Slika 3.9 Prikaz grafikona .....	55
Slika 3.10 Vizualizacija podataka .....	55
Slika 3.11 Odabir omjera signal/šum .....	55
Slika 3.12 Utjecaj ulaznih faktora na kvalitetu reza.....	56
Slika 3.13 Značajni faktori za S/N omjer .....	57
Slika 3.14 Pareto dijagram utjecajnih faktora .....	60
Slika 3.15 Postavke za predviđanje optimalnog rješenja .....	61
Slika 3.16 Postavljanje podataka.....	61
Slika 3.17 Unos optimalnih parametara za predviđanje hrapavosti rezane površine.....	62

## Popis tablica

Tablica 2.1 Topljivost vodika u različitim metalima .....	24
Tablica 2.2 Kritične temperature čistih metala .....	25
Tablica 2.3 Određivanje ravnosti tanke debljine obratka putem mjerenja nagiba kuta .....	39
Tablica 3.1 Kemijski sastav materijala za obradu .....	48
Tablica 3.2 Faktori i razine pokusa .....	49
Tablica 3.3 L <sub>9</sub> ortogonalni niz pokusa .....	50
Tablica 3.4 Rangiranje ulaznih faktora .....	56
Tablica 3.5 Rangiranje odgovora za S/N omjer .....	58
Tablica 3.6 Analiza varijance za ulazne faktore .....	59
Tablica 3.7 Analiza varijance za S/N omjer .....	59
Tablica 3.8 Rezultati predviđanja Taguchi optimizacije.....	62
Tablica 3.9 Postavke optimalnih parametara .....	62

## Sažetak

Ovo istraživanje temelji se na analizi učinka različitih plazma medija na proces rezanja mlazom plazme. Eksperimenti su obuhvatili tri različita plazma medija: vodu + etanol, zrak i čistu vodu, a cilj je bio utvrditi njihov utjecaj na kvalitetu rezane površine. Materijal koji je korišten za eksperimente bio je niskougljični čelik S235JR.

Kontrolirani su različiti parametri rezanja, uključujući brzinu rezanja i jakost struje. Korištena je Taguchi optimizacijska metoda zajedno sa softverom Minitab za analizu rezultata.

Rezultati su ukazali na ključne faktore koji utječu na kvalitetu rezane površine, pri čemu su brzina rezanja i vrsta plazma medija pokazali značajan utjecaj. Najbolji rezultati postignuti su pri brzini rezanja od 300 mm/min, jakosti struje od 50 A i upotrebi zraka kao plazma medija.

Pružene su smjernice za optimizaciju tehnika rezanja mlazom plazme, posebno za niskougljični čelik S235JR. Međutim, ostaje mnogo prostora za daljnje istraživanje i razvoj u ovom području.

Ovo istraživanje postavlja temelje za daljnji napredak u razumijevanju i primjeni tehnike rezanja mlazom plazme u industriji. S obzirom na široku primjenu ovog procesa, postignuti rezultati imaju potencijalni značaj za optimizaciju proizvodnje i poboljšanje kvalitete rezanih materijala.

Ključne riječi:

Rezanje plazmom, Plazma mediji, Niskougljični čelik, Taguchi optimizacija, Parametri rezanja, Brzina rezanja, Jakost struje, Minitab, Kvaliteta reza.

## Summary

This research is based on the analysis of the effect of different plasma media on the plasma beam cutting process. The experiments included three different plasma media: water + ethanol, air and pure water, and the goal was to determine their influence on the quality of the cut surface. The material used for the experiments was low carbon steel S235JR.

Various cutting parameters are controlled, including cutting speed and amperage. The Taguchi optimization method was used together with the Minitab software to analyse the results.

The results indicated the key factors influencing the quality of the cut surface, where the cutting speed and the type of plasma medium showed a significant influence. The best results were achieved at a cutting speed of 300 mm/min, a current of 50 A and the use of air as a plasma medium.

Guidelines are provided for the optimization of plasma beam cutting techniques, particularly for the low carbon steel S235JR. However, there remains much room for further research and development in this area.

This research lays the foundation for further advances in the understanding and application of plasma beam cutting techniques in industry. Considering the wide application of this process, the achieved results have potential importance for optimizing production and improving the quality of cut materials.

Keywords:

Plasma cutting, Plasma media, Low-carbon steel, Taguchi optimization, Cutting parameters, Cutting speed, Current strength, Minitab, Quality of cut surface.