

Utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću aluminijske legure EN AW 1050A

Cepanec, Alen

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:785170>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-10**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 096/STR/2023

**Utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću
aluminijeve legure EN AW 1050A**

Alen Cepanec, 0336026798

Varaždin, rujan 2023. godine



Sveučilište Sjever

Diplomski sveučilišni studij Strojtarstvo

Diplomski rad br. 096/STR/2023

Utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću aluminijeve legure EN AW 1050A

Student

Alen Cepanec, 0336026798

Mentor

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

Varaždin, rujun 2023. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Alen Cepanec	JMBAG	0336026798
DATUM	15.09.2023.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću aluminijske legure EN AW 1050A		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	The influence of plasma cutting parameters on the tensile strength of EN AW 1050A aluminium alloy		
MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva 2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva 3. izv. prof. dr. sc. Sven Maričić, član povjerenstva 4. doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenski član 5.		

Zadatak diplomskog rada

BR. 096/STR/2023

OPIS
U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupak plazma rezanja metala. Usporediti različite izvedenice plazma postupka rezanja te također usporediti plazma rezanje u ručnoj i automatiziranoj izvedbi. Navesti sve utjecajne parametre u postupku te ocijeniti njihov utjecaj na kvalitetu rezne površine. Također je potrebno objasniti ispitivanje vlačne čvrstoće metalnih materijala.

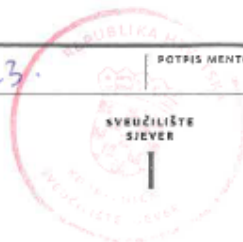
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je plazma rezanjem pomoću komprimiranog zraka rezati lim aluminijske legure EN AW 1050A uz promjenu utjecajnih parametara prema izrađenom planu eksperimenta. Iz izrezanih limova potrebno je izraditi uzorke za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala. Potrebno je izmjeriti vlačnu čvrstoću materijala korištenjem izrađenih uzoraka. Prema rezultatima ispitivanja preporučiti prikladne parametre rezanja i donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

15.09.2023.

POTPIS MENTORA

M. Bušić



Predgovor

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na pruženoj stručnoj pomoći, strpljenju i korisnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj potpori, pomoći i razumijevanju kroz cjelokupni studij.

Sažetak

U teorijskom dijelu ovog diplomskog rada navedeni su osnovni toplinski postupci rezanja. Ukratko su opisani postupci plinskog i laserskog rezanja, a posebno je opisan postupak plazma rezanja. Navedene su i ukratko objašnjene različite metode plazma rezanja te tehnički plinovi koji se koriste u procesu plazma rezanja. Definirani su glavni parametri plazma rezanja i oprema koja se koristi za plazma rezanje. Navedene su specifičnosti kod rezanja aluminijske legure. Na kraju teoretskog dijela opisan je postupak statičkog vlačnog ispitivanja.

U eksperimentalnom dijelu opisan je postupak plazma rezanja lima aluminijske legure EN AW 1050A pri različitim parametrima brzine rezanja i jakosti struje. Opisana je korištena oprema i navedene su tehničke specifikacije. Na izrezanim uzorcima je provedeno statičko vlačno ispitivanje i utvrđen je utjecaj plazma rezanja na vlačnu čvrstoću aluminijske legure. Na kraju rada iznesen zaključak i osvrt na dobivene rezultate eksperimenta.

Ključne riječi: Plazma rezanje, plazma luk, plazmeni plin, zaštitni plin, jakost struje, brzina rezanja, aluminij, statičko vlačno ispitivanje

Summary

In the theoretical part of this master's thesis, basic thermal cutting processes are discussed. Gas cutting and laser cutting procedures are briefly described, with special emphasis on the plasma cutting process. Various plasma cutting methods and the technical gases used in the plasma cutting process are outlined and briefly explained. The main parameters of plasma cutting and the equipment used for plasma cutting are defined. Specific considerations when cutting aluminum are also provided. Finally, the theoretical section concludes with a description of the static tensile testing procedure.

In the experimental part, the process of plasma cutting of aluminum sheet EN AW 1050A at different cutting speed and current intensity parameters is described. The equipment used is detailed, along with its technical specifications. Static tensile tests were performed on the cut samples to determine the impact of plasma cutting on the tensile strength of aluminum. The thesis concludes with a summary and reflection on the obtained experimental results.

Keywords: Plasma cutting, plasma arc, plasma gas, shielding gas, current intensity, cutting speed, aluminum, static tensile testing

Popis korištenih kratica

Kratica	Opis
EN	Europska norma
ISO	eng. International organization for standardization
AW	eng. Aluminium wrought
TIG	eng. Tungsten inert gas
NC	eng. Numerical control
CNC	eng. Computer numerical control
CrNi	krom-nikal
Nd	neodimij
YAG	itrij-aluminijev granat
H ₃₅	mješavina 35% vodika i 65% argona
CO ₂	ugljični dioksid
Ar	argon
H ₂	vodik

Popis korištenih oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	sila
σ	MPa	naprezanje
S_0	mm ²	početna površina presjeka
E	GPa	modul elastičnosti
ΔL	mm	produljenje
L_0	mm	početna duljina
ε	mm/mm	istezanje
R_e	MPa	granica razvlačenja
$R_{p0,2}$	MPa	konvencionalna granica razvlačenja
F_e	N	sila tečenja
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
F_m	N	maksimalna sila
R_k	MPa	konačno naprezanje
F_k	N	konačna sila
ΔL_u	mm	konačno produljenje
ε_u	mm/mm	konačno istezanje
A	%	istezljivost
a_0	mm	početna debljina
b_0	mm	početna širina
v	cm/min	brzina rezanja
I	A	jakost struje

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Toplinski postupci rezanja	2
2.1.	Plinsko rezanje	2
2.2.	Lasersko rezanje	3
3.	Plazma rezanje	5
3.1.	Postupak rezanja plazmom.....	5
3.1.1.	<i>Plazma luk</i>	6
3.2.	Metode rezanja plazmom	7
3.2.1.	<i>Standardno plazma rezanje</i>	7
3.2.2.	<i>Plazma rezanje sa sekundarnim plinom</i>	8
3.2.3.	<i>Plazma rezanje s injektiranom vodom</i>	11
3.2.4.	<i>Plazma rezanje pod vodenim štitom</i>	12
3.2.5.	<i>Precizno rezanje plazmom</i>	13
3.3.	Parametri plazma rezanja	13
3.3.1.	<i>Jakost struje izvora</i>	14
3.3.2.	<i>Brzina rezanja</i>	15
3.3.3.	<i>Udaljenost sapnice od radnog komada</i>	16
3.4.	Plazmeni i zaštitni plinovi	16
3.4.1.	<i>Zrak</i>	17
3.4.2.	<i>Kisik</i>	17
3.4.3.	<i>Plinska mješavina vodika i argona</i>	17
3.4.4.	<i>Dušik</i>	18
3.4.5.	<i>Plinska mješavina argona, vodika i dušika</i>	19
3.4.6.	<i>Zaštitni plin</i>	19
3.5.	Oprema za plazma rezanje	20
3.5.1.	<i>Izvor napajanja</i>	21
3.5.2.	<i>Gorionik plazma rezača</i>	22
3.5.3.	<i>Sustav za vođenje</i>	24
4.	Plazma rezanje aluminija	26
4.1.	Tehnički plinovi	26
4.2.	Sigurnost kod plazma rezanja aluminija	27

5.	Statičko vlačno ispitivanje	28
5.1.	Postupak ispitivanja prema normi EN ISO 6892-1:2019.....	28
5.2.	Definiranje veličina	29
6.	Eksperimentalni dio	33
6.1.	Osnovni materijal	33
6.2.	Plazma rezanje.....	34
6.2.1.	<i>Postupak plazma rezanja</i>	36
6.3.	Statičko vlačno ispitivanje	38
6.3.1.	<i>Provođenje ispitivanja</i>	38
6.3.2.	<i>Rezultati ispitivanja</i>	40
6.4.	Analiza rezultata.....	42
7.	Zaključak.....	43
8.	Literatura.....	44
	Popis slika	46
	Popis tablica.....	47

1. Uvod

U suvremenom svijetu neprestano se postavljaju sve viši zahtjevi u pogledu kvalitete, smanjenja troškova i operativne učinkovitosti. Kontinuiranim razvojem znanosti i tehnologije omogućuje se poboljšanje postojećih i stvaranje novih postupka obrade materijala. Ova potreba je posebno izražena u drugoj polovici 20. stoljeća, kada je došlo do ubrzanog razvoja nekonvencionalnih metoda obrade s ciljem unaprjeđenja ili zamjene tradicionalnih metoda. Ključna razlika jest što nekonvencionalni postupci ne zahtijevaju izravan mehanički kontakt između alata i obradka, i alat ne mora nužno biti tvrdi od obradka kako bi se obrađivao materijal. Osim toga, nekonvencionalni postupci često postižu znatno bolju kvalitetu površine i strože tolerancije čime se smanjuje potreba za dodatnom obradom.

Ideja o plazma rezanju nastala je tijekom pokušaja poboljšanja postupka TIG zavarivanja. U ranim 1950-ima znanstvenici su, radeći na poboljšanju TIG zavarivanja, uočili da električni luk između volframove elektrode i radnog komada može biti primjenjiv za rezanje metala. To je rezultiralo istraživanjem fokusiranja električnog luka, kako bi se povećala energijska gustoća i postigla plazma dovoljno visoke temperature za rezanje. Kao rezultat tog istraživanja, razvijen je postupak plazma rezanja. Rani plazma rezači bili su nepouzdana i nisu isporučivali istu preciznost kao što je prisutna kod modernih rezača. Često su se kvarili zbog generiranja visoke topline tokom procesa, a konstantno mijenjanje mlaznica i elektroda činilo je plazma rezanje neisplativim. Daljnjim razvojem povećanja stabilnosti i gustoće električnog luka, poboljšanjem plazmenih mješavina i hlađenja te primjenom CNC upravljanja, plazma rezanje postalo je preciznije i pouzdanije. Danas se ovaj postupak široko primjenjuje u industriji za rezanje metala i drugih materijala, osiguravajući učinkovito i ekonomično oblikovanje i obradu. Posebno se ističe rezanje visokolegiranih čelika i aluminija, čije osobine često predstavljaju izazov za tradicionalne metode rezanja.

2. Toplinski postupci rezanja

Toplinski postupak rezanja je proces u kojem se toplina koristi kao glavni izvor energije za rezanje materijala. Za dobivanje toplinske energije uglavnom se koristi visokonaponski strujni izvor. S obzirom na način kojim se postiže rezanje materijala, postupci toplinskog rezanja dijele se u dvije skupine:

1. Postupci rezanja izgaranjem u struji kisika:
 - Plinsko rezanje,
 - Elektrolučno rezanje šupljom metalnom elektrodom i kisikom.
2. Postupci rezanja taljenjem:
 - Plazma rezanje,
 - Elektrolučno rezanje metalnom elektrodom,
 - Lasersko rezanje,
 - Rezanje elektronskim snopom.

U postupcima rezanja izgaranjem u struji kisika, materijal izgara pod utjecajem visoke temperature i mlaza čistog kisika. Često se primjenjuju zbog svoje jednostavnosti, niske cijene i sposobnosti rezanja različitih debljina materijala. Nedostatak je što tijekom rezanja dolazi do velikog unosa topline u materijal, što može uzrokovati deformaciju i promjenu mehaničkih svojstava, posebno u tankim materijalima. Zbog toga je vrlo važno pravilno prilagoditi parametre rezanja kako bi se osigurala željena kvaliteta i preciznost.

Kod rezanja taljenjem, materijal se tali duž rezne površine primjenom koncentriranog snopa toplinske energije. Ovakav proces omogućuje veću preciznost rezanja, niži negativni utjecaj topline i lakšu automatizaciju. Uobičajeni nedostaci ovog tipa rezanja su: visoka cijena opreme i ograničena debljina materijala koji se reže.

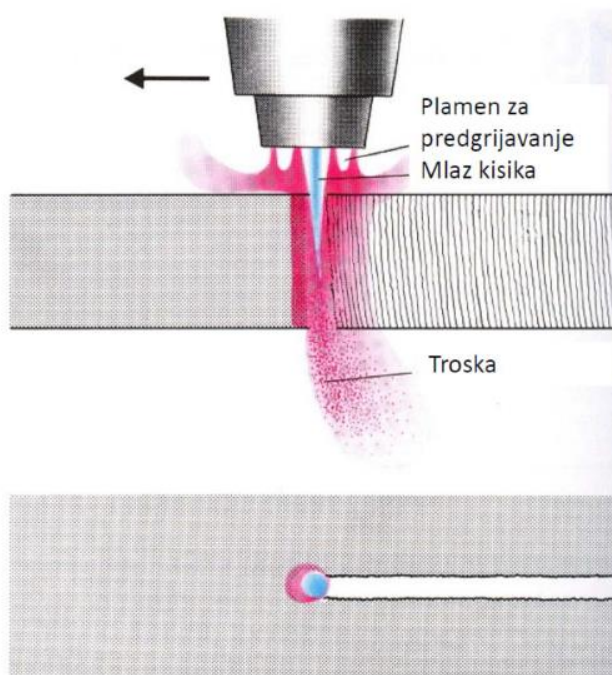
Toplinski postupci rezanja primjenjuju se u različitim granama industrije, za rezanje metala, polimera, tkanina, stakla, keramike i drugih materijala. U praksi se često koriste različiti postupci rezanja, među kojima su najčešći: plinsko, plazma i lasersko rezanje.

2.1. Plinsko rezanje

Plinsko rezanje je postupak rezanja metala koji se odvija u prisutnosti mlaza čistog kisika pri temperaturama nižim od točke taljenja metala. U ovom procesu, metal se izgaranjem u reakciji s kisikom pretvara u okside koji se uklanjaju pomoću mlaza kisika, čime se stvara rez. Prije nego što proces rezanja započne, materijal se mora zagrijati do temperature zapaljenja, što se postiže

primjenom plamena za predgrijavanje (slika 1). Zatim se dovodi kisik kako bi se omogućila reakcija rezanja, a rez se formira pomicanjem plamenika u smjeru rezanja. Prilikom rezanja mlaz kisika ispuhuje trosku niskog viskoziteta.

Plinsko rezanje se primjenjuje za rezanje materijala debljine 3-300 mm, a uz primjenu specijalnih mlaznica i do 1000 mm za nelegirane čelike. Plinskim plamenom teže se režu: CrNi čelici, sivi lijev, aluminij i bakar.



Slika 1. Shematski prikaz plinskog rezanja [1]

Mješavine plinova koje se koriste za plinsko rezanje su:

- kisik i aceten,
- kisik i propan-butan,
- kisik i zemni plin.

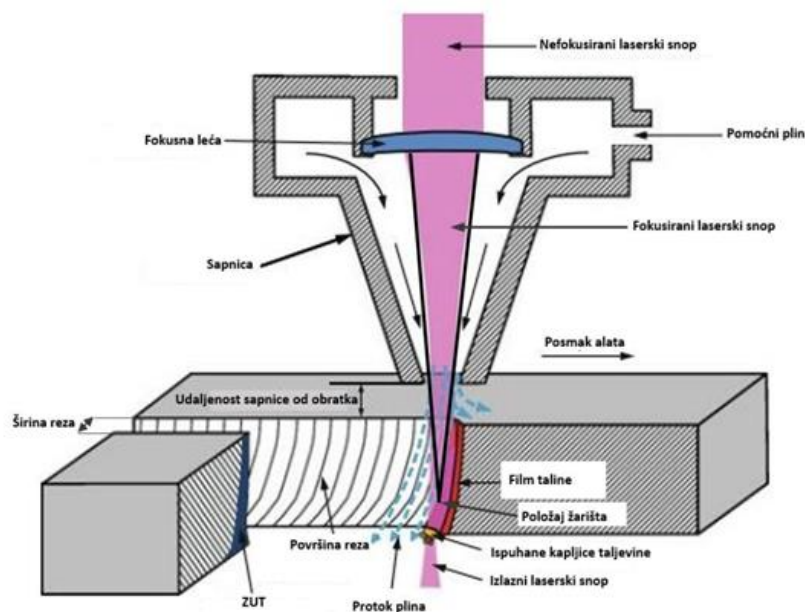
2.2. Lasersko rezanje

Lasersko rezanje je postupak rezanja materijala kod kojeg se usmjerena zraka svjetlosti iz lasera visoke snage koristi za zagrijavanje i taljenje materijala. Primjenjuje se za rezanje različitih vrsta materijala. Materijali koji se teže režu laserskim rezanjem su: transparentni materijali koji ne apsorbiraju dovoljno energije poput stakla i reflektirajući materijali koji odbijaju svjetlosne zrake poput aluminija, bakra i nehrđajućih čelika s visokom udjelom nikla.

Rezanje laserom se ostvaruje pomoću [2]:

- **CO₂ lasera:** koristi se za bušenje, rezanje, označavanje, graviranje,
- **Nd lasera:** najčešće se koristi za bušenje, karakteriziraju ga visoko-energetski impulsi i male brzine ponavljanja,
- **Nd – YAG lasera:** koristi se za bušenje, rezanje, graviranje i podešavanje.

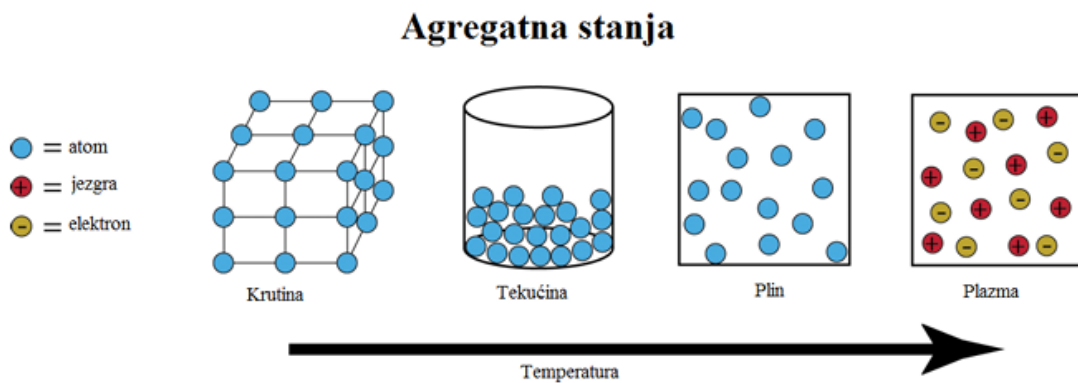
Najvažniji parametri kod rezanja laserom su: snaga, vrsta i tlak zaštitnog plina, promjer i pozicija žarišta te udaljenost sapnice od radnog komada (slika 2). Snaga lasera je ukupna energija emitirana u obliku laserske svjetlosti u sekundi, dok intenzitet laserske zrake znači snagu podijeljenu s površinom na kojoj je snaga koncentrirana. Visoki intenzitet zrake, dobiven fokusiranjem laserske zrake na malu točku, poželjan je za primjene rezanja jer uzrokuje brzo zagrijavanje reza ostavljajući malo vremena za raspršivanje topline u okolinu, što rezultira velikim brzinama rezanja i izvrsnom kvalitetom rezanja. Nadalje, reflektivnost većine metala visoka je pri niskim intenzitetima snopa, ali mnogo niža pri visokim intenzitetima, a rezanje debljih materijala zahtijeva veće intenzitete. Optimalna upadna snaga utvrđuje se tijekom planiranja procesa jer prekomjerna snaga rezultira širokom širinom zarez, dok nedovoljna snaga ne može pokrenuti rezanje [2].



Vođenje lasera ostvaruje se pomoću robotske ruke ili CNC obradnim sustavom. Rezanje se omogućuje gibanjem radnog komada, gibanjem snopa ili istovremenim gibanjem radnog komada i snopa. Na mjestu gdje postupak laserskog rezanja treba započeti dalje od ruba materijala, koristi se postupak probijanja, pri čemu laser najprije buši provrt u materijalu nekoliko sekundi, a zatim nastavlja kretanje u smjeru rezanja.

3. Plazma rezanje

Kontinuiranim dovođenjem topline krutoj tvari dolazi do promjene agregatnog stanja iz krutog u kapljevitost. Ukoliko nastavimo dovoditi toplinu, materija prelazi iz kapljevitog u plinovito stanje i u konačnici slijedi promjena iz plinovitog stanja u plazmu (slika 3). Plazma je jedinstveno stanje tvari u kojem plinovi postaju ionizirani, može se opisati kao fluidno i smatra se četvrtim agregatnim stanjem. Plazmeno stanje postiže se dovođenjem topline plinu putem zagrijavanja ili nabijanjem u jakom elektromagnetskom polju. Elektroni se oslobađaju od atoma, rezultirajući formiranjem pozitivnih i negativnih iona te slobodnih elektrona. Plazmu karakterizira električna vodljivost, što je razlikuje od drugih agregatnih stanja.



Slika 3. Agregatna stanja tvari [4]

3.1. Postupak rezanja plazmom

Plazma rezanje je proces rezanja materijala u kojem se koriste ionizirani plinovi zagrijani na vrlo visoku temperaturu. Mlaz ioniziranog plina, istisnutog pod visokim pritiskom, tali i uklanja materijal iz reza. Postupak rezanja plazmom je vrlo isplativ za rezanje metala velike debljine, fleksibilan je i zahtijeva niske troškove održavanja alata. Također ima visoku preciznost rezanja što ga čini idealnim za rezanje dijelova složene geometrije [5].

Prednosti plazma rezanja:

- Visoka gustoća energije omogućuje veće brzine rezanja,
- Male toplinske deformacije radnog komada,
- Mogu se rezati materijali velike debljine,
- Podešavanjem parametara moguća je precizna kontrola procesa,
- Dobra stabilnost i paralelnost električnog luka,

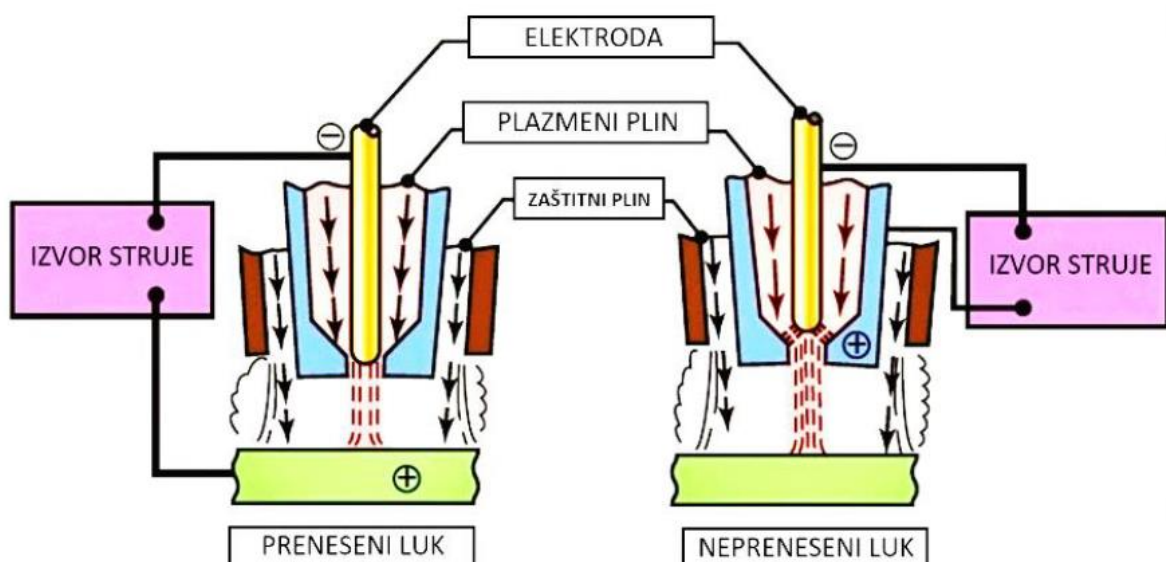
- Lako se automatizira,
- Moguće je rezati širok spektar materijala,
- Zona utjecaja topline je mala s paralelnim rubovima.

Nedostaci plazma rezanja:

- Veća širina reza u odnosu na rezanje laserom,
- Potrebno je detaljno očistiti površinu rezanja,
- Osjetljivost plazma gorionika na oštećenja,
- Potrebno je vodeno hlađenje čak i kod manjih gorionika,
- Razmak između sapnice i elektrode mora biti točno izrađen u uskim tolerancijama.

3.1.1. Plazma luk

Električni luk uspostavlja se između elektrode koja je povezana s negativnim polom istosmjerne struje i radnog komada ili sapnice pištolja koja je spojena na pozitivni pol. Ako je pozitivni pol izvora struje povezan s radnim komadom, tada se radi o prenesenom električnom luku. Ako je pozitivni pol povezan s sapnicom pištolja, električni luk će biti nepreneseni, kako je prikazano na slici 4. Prolazom kroz električni luk, plazmeni plin se zagrijava, disocira i ionizira, te izlazi iz električnog luka u obliku plazme. Plazmeni mlaz se oblikuje prolazom kroz bakrenu sapnicu hlađenu vodom.



Slika 4. Preneseni i nepreneseni električni luk [6]

U prenesenom električnom luku, temperatura plazmenog mlaza doseže vrlo visoke temperature (preko 24000 K). Nakon što brzo izlazi iz sapnice u obliku plazme, plin se stabilizira prenoseći energiju iz električnog luka na radni komad s određenim stupnjem iskorištenja. Vrsta plina utječe na karakteristike i energiju plazmenog mlaza, jer svaki plin ima drukčija svojstva (energija disocijacije, energija ionizacije, toplinska vodljivost i gustoća). Prednost primjene prenesenog luka je velika gustoća prijenosa energije na radni komad i visoka brzina plazmenog mlaza. Primjenjuje se samo za rezanje elektrovodljivih materijala.

Nepreneseni električni luk ne ovisi o radnom komadu jer se strujni krug ostvaruje između sapnice i elektrode. U tom slučaju radni komad ne mora biti električki vodljiv, što omogućuje rezanje električnih izolatora poput keramike, polimera itd. Budući da se plazma generira unutar mlaznice, dolazi do većeg trošenja mlaznice tijekom vremena u odnosu na rezanje s prenesenim električnim lukom. Postupak rezanja neprenesenim lukom zahtijeva pažljivo podešavanje parametara kako bi se osigurala stabilnost električnog luka i kvalitetno rezanje.

3.2. Metode rezanja plazmom

Tijekom procesa plazma rezanja dolazi do pojave taljenja materijala. Najveće taljenje postiže se na dijelu materijala koji se nalazi na najmanjoj udaljenosti od sapnice pištolja. To rezultira zaobljenjem gornjeg ruba reza, nepravilnostima u pravokutnosti ruba ili blagim skošenjima. Budući da su ova ograničenja povezana sa stupnjem suženja luka, razvijeni su različiti dizajni pištolja za rezanje. Glavni cilj je poboljšanje plazmenog luka kako bi se postiglo ravnomjernije zagrijavanje gornjeg i donjeg dijela reza, odnosno bolja kontrola i distribucija topline u procesu rezanja.

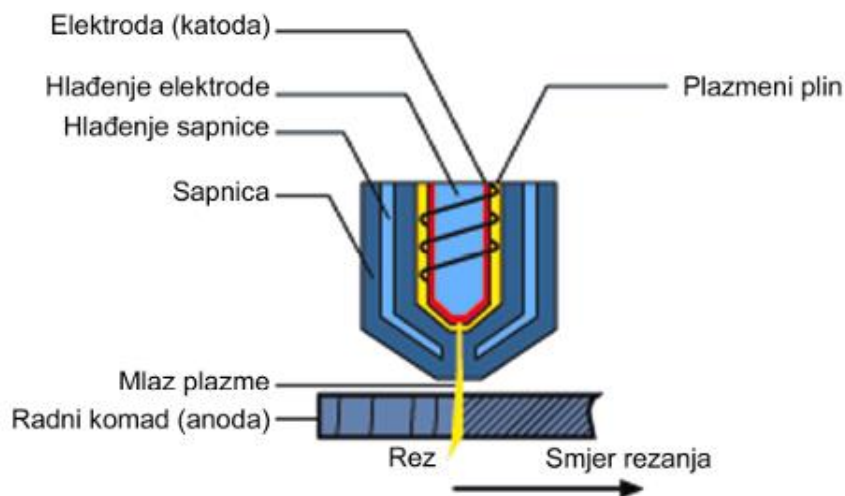
Principi i metode plazma rezanja kontinuirano se usavršavaju s ciljem optimizacije kapaciteta i kvalitete rezanja, istovremeno smanjujući proizvodne troškove i negativni utjecaj na okolinu. Ovisno o karakteristikama materijala i njegovoj debljini, primjenjuju se različite metode plazmenog rezanja. Razlikuju se prema: vrsti sekundarnog medija (voda, zrak ili inertni plin), vrsti i snazi izvora energije te radnoj okolini (rezanje pod vodom ili bez vode).

3.2.1. Standardno plazma rezanje

U uobičajenim sustavima plazma rezanja, gorionik plazma rezača je relativno jednostavan i dizajniran je za upotrebu samo jednog plina, tzv. plina za rezanje. Plinovi koji se obično koriste za rezanje su dušik, kisik ili mješavine argona i vodika. Plazma luk je sužen unutarnjim promjerom mlaznice, što rezultira nakošenim površinama reza koje su karakteristične za ovu tehniku.

Uobičajeno je da plazma plin struji tangencijalno oko elektrode. Način hlađenja plazma pištolja ovisi o brzini rezanja te se može izvoditi pomoću zraka ili vode. Standardni sustavi za rezanje plazmom prikladni su za rezanje metala debljine do 160 mm [7].

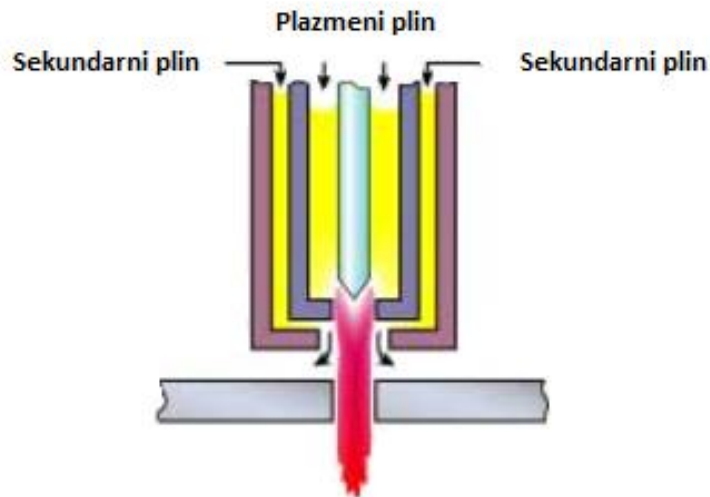
Standardna metoda plazma rezanja uglavnom se primjenjuje za ručno rezanje materijala. Osim klasične primjene za rezanje, ova metoda ima vrlo važnu ulogu kod popravaka i održavanja komponenti, kao što su cijevi, konstrukcije i druge industrijske opreme. Integracija u CNC sustave upravljanja omogućuje automatizirano rezanje cijevi i različitih profila. Na slici 5 nalazi se shematski prikaz standardne metode plazma rezanja.



Slika 5. Standardna metoda plazma rezanja [7]

3.2.2. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom

Primjena sekundarnog plina oko plazma luka ima dodatni efekt sužavanja i stvaranja specifične zaštitne atmosfere, što rezultira povećanjem snage, boljom kvalitetom rezanja i većom brzinom rezanja. Položaj vanjske sapnice i vrtloženi zaštitni plin sprječavaju pojavu dvostrukog luka i omogućuju dodatno hlađenje sustava, čime se produljuje vijek trajanja potrošnih dijelova. Ova metoda rezanja primjenjuje se za rezanje metala debljine do 75 mm. Shematski prikaz plazma rezanja sa sekundarnim plinom može se vidjeti na slici 6 [7].



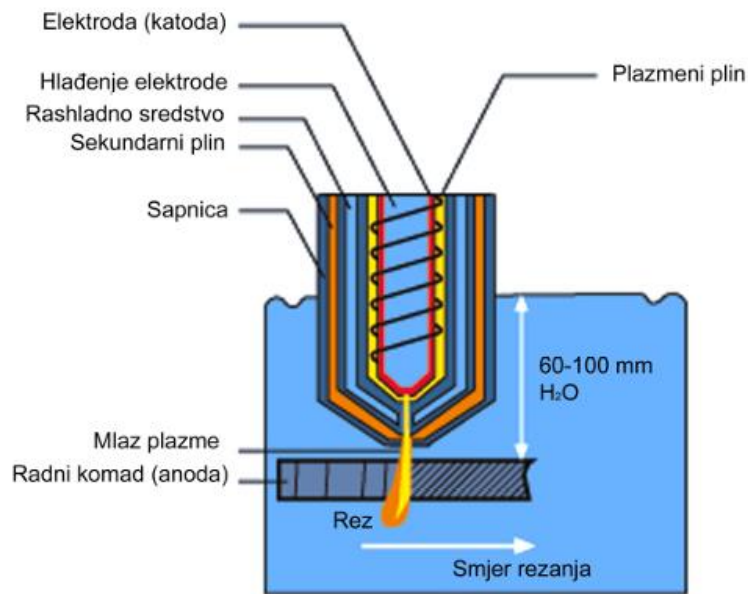
Slika 6. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom [8]

Prednosti u odnosu na standardno plazma rezanje:

- Smanjeni rizik od pojave dvostrukog električnog luka
- Veće brzine rezanja
- Smanjenje zaobljenja gornjeg ruba reza
- Smanjena pojava troske
- Bolje hlađenje

Korištenjem rotirajućeg plina sprječava se nepovoljni utjecaj atmosfere na plazmeni mlaz i rastaljeni metal u zoni rezanja. To je vrlo važno kod rezanja čeličnih materijala, gdje bi prisutnost kisika iz atmosfere izazvala reakciju s površinom reza, rezultirajući oksidacijom. U većini slučajeva, oksidacija zahtijeva dodatnu obradu kako bi se uklonili nastali oksidi. Kao sekundarni plin često se koristi dušik kako bi se osiguralo bezoksidno rezanje limova visokolegiranih čelika debljine do 20 mm [9].

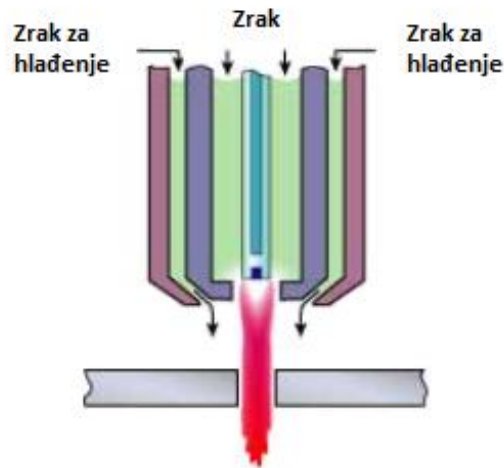
Zahvaljući zaštitnom djelovanju sekundarnog plina, ova metoda plazma rezanja može se primjenjivati i za rezanje pod vodom (slika 7). Rezanje se vrši oko 60 do 100 mm ispod površine vode, čime se značajno smanjuje buka (manje od 85dB), prašina i zagađenje okoline. Također, smanjuje se i utjecaj toplinske deformacije na radni komad. Budući da podvodno rezanje plazmom zahtijeva više energije nego rezanje u atmosferi, brzine rezanja koje se mogu postići niže su od rezanja u atmosferskom okruženju. Konstrukcijski čelici debljine približno 15 mm i visokolegirani čelici debljine približno 20 mm općenito su ekonomični za rezanje pod vodom [7].



Slika 7. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim plinom [7]

Rezanje plazmom pod vodom ima i određene nedostatke, uključujući smanjenu vidljivost radnog komada tijekom rezanja, snižene brzine rezanja za 10-20 % te smanjenu sposobnost rezanja većih debljina radnog komada. Za podvodno rezanje primjenjuju se radni stolovi koji se mogu ispuniti vodom. Stolove je potrebno redovito čistiti, što dovodi do dodatnih troškova održavanja i zastoja u proizvodnji. Kako bi se riješio taj problem, osmišljeni su specijalni radni stolovi koji imaju mogućnost samostalnog čišćenja.

Inertni ili nereaktivni plinovi poput argona ili dušika često se koriste kao plazmeni plin u postupcima plazma rezanja i zavarivanja. Međutim, postoji mogućnost zamjene ovih plinova zrakom kako bi se smanjili troškovi. Zračna plazma ima prednost u tome što koristi lako dostupni zrak umjesto skupih inertnih plinova, ali i zahtijeva posebnu elektrodu od hafnija ili cirkonija. Elektrode s vrhom od materijala kao što je hafnij mogu biti skuplje u usporedbi s elektrodama izrađenim od volframa. Budući da je elektrodu potrebno s vremenom zamijeniti, to može utjecati na ukupne troškove upotrebe zračne plazme, ali treba uzeti u obzir i prednosti koje nudi zračna plazma u smislu smanjenja potrebe za inertnim plinovima. U konačnici, odabir između inertnih plinova i zraka za plazma rezanje ovisi o specifičnim zahtjevima procesa, proračunu i preferencijama korisnika. Shematski prikaz plazma rezanja sa zrakom nalazi se na slici 8 [8].

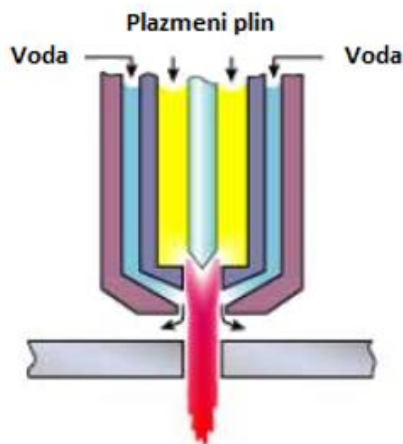


Slika 8. Zračno plazma rezanje [8]

3.2.3. Plazma rezanje s injektiranom vodom

Plazma rezanje s injektiranom vodom temelji se na principu ubrizgavanja vode oko plazmenog luka. To rezultira suženjem luka, povećanjem gustoće energije, a samim time i povećanjem temperature rezanja. Samo mali dio vode isparava, dok preostala voda hladi mlaznicu i radni komad. Hlađenje radnog komada putem ubrizgane vode i visoka brzina rezanja omogućavaju: rezanje s malo deformacija, stvaranje manje srha na rubovima i produžuju vijek trajanja potrošnih dijelova. Razlikuju se dva načina injektiranja vode: radijalno i vrtložno. Kod vrtložnog injektiranja, jedna od reznih površina je gotovo okomita, dok je druga nagnuta za oko 5° do 8°. Primjenom ove metode moguće je rezati metalne ploče debljine do 75 mm [7].

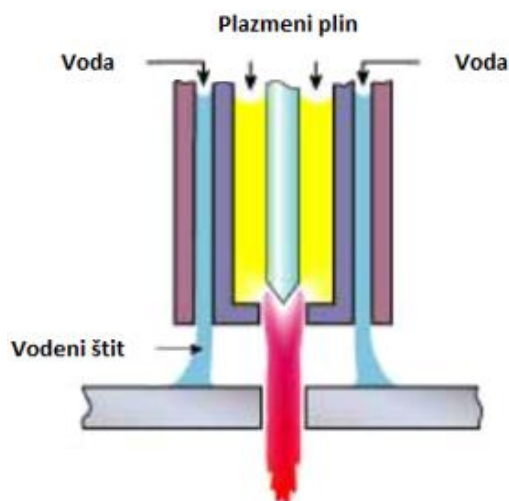
Ova metoda plazma rezanja koristi vrlo široki raspon jakosti struje, između 260 i 750 A, što omogućuje precizno rezanje različitih vrsta materijala s različitim debljinama, a primjenjuje isključivo u mehaniziranim procesima rezanja. Osim dušika, kao plazmeni plin može se koristiti i zrak, čime se značajno smanjuju troškovi procesa. Na slici 9 nalazi se shematski prikaz postupka.



Slika 9. Plazma rezanje s injektiranom vodom [8]

3.2.4. Plazma rezanje pod vodenim štitom

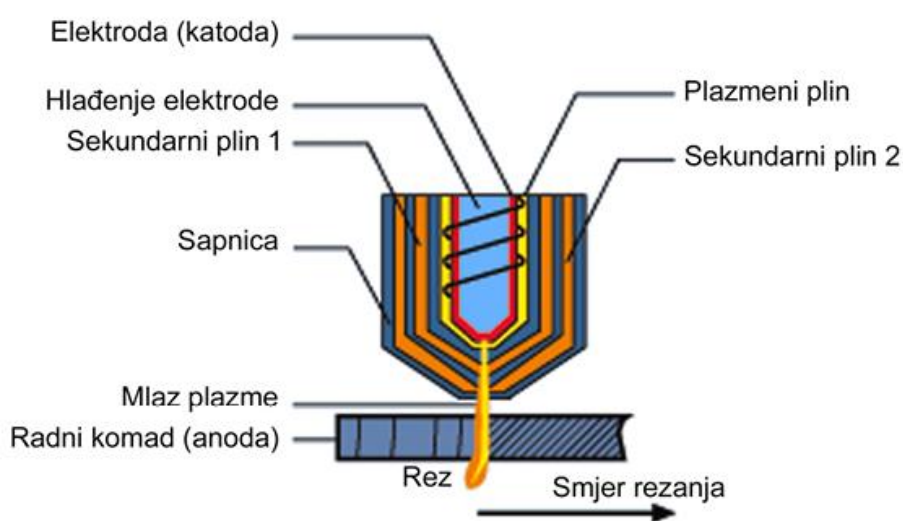
Tijekom plazmenog rezanja pod vodenim štitom, oko plazmenog luka pušta se mlaz vode, kao što je prikazano na slici 10. Sekundarna zaštita vodom štiti luk od vanjskih utjecaja, pruža bolje hlađenje sapnice i radnog komada te daje bolju kvalitetu reza kod rezanja nehrđajućih čelika. Nakon izlaza iz sapnice, vodeni sloj se raspršuje u obliku spreja. Zahvaljujući svom redukcijskom učinku, pojava vodika tijekom procesa rezanja rezultira sjajnom metalnom površinom. Postupak se primjenjuje kod strojnog mehaniziranog rezanja aluminija i visokolegiranih čelika debljine do 50 mm [7].



Slika 10. Rezanje plazmom pod vodenim štitom [8]

3.2.5. Precizno rezanje plazmom

Kako bi se povećala preciznost rezanja plazmom, potrebno je dodatno povećati gustoću plazmenog luka. Jedan od načina kojim se postiže dodatno suženje je primjenom dvostruke sapnice, gdje su dvije sapnice sekundarnog plina postavljene jedna unutar druge (slika 11). Za preciznije pomake pri rezanju, također je nužno koristiti niže brzine rezanja. Različiti proizvođači primjenjuju razne metode za sužavanje luka, a neke od tih metoda omogućuju visokoprecizno izvođenje vertikalnih rezova na limovima debljine od 0,5 do 25 mm [7].



Slika 11. Precizno rezanje plazmom [7]

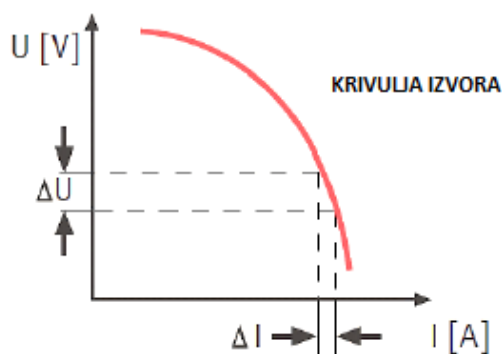
Ova metoda rezanja donosi niz prednosti, uključujući usku širinu reza i manju deformaciju, zahvaljujući smanjenom toplinskom utjecaju. Glavna ideja je postizanje dvije ravne i paralelne površine reza, bez potrebe za dodatnom obradom. Kvaliteta rezanja je bolja od standardnog plazma rezanja, ali i nešto lošija od rezanja laserom. Postupak se primjenjuje samo za rezanje tanjih materijala i brzina rezanja je također vrlo niska.

3.3. Parametri plazma rezanja

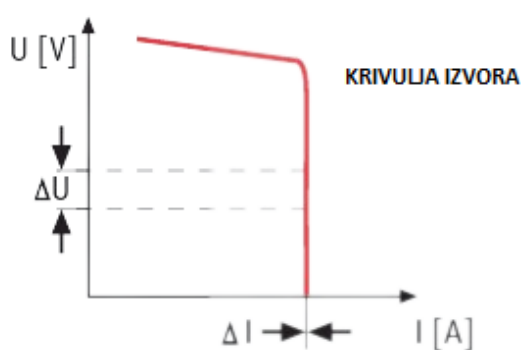
Neprikladna kvaliteta plazma rezanja često dovodi do potrebe za dodatnom obradom i povećava ukupne proizvodne troškove. Postizanje zadovoljavajuće kvalitete rezanja zahtijeva pažljivo upravljanje različitim parametrima. Najvažniji parametri su: jakost struje, brzina rezanja, udaljenost sapnice od radnog komada te protok i vrsta plazmenog i zaštitnog plina.

3.3.1. Jakost struje izvora

Uloga izvora napajanja je osigurati radni napon i struju rezanja za glavni i pomoćni luk. Napon praznog hoda kreće se između 240 i 400 V, a izlazna struja može se kretati između 10 i 1000 A, ovisno o radnom materijalu, debljini i brzini rezanja. Jakost struje ima znatan utjecaj na širinu reza, unos topline u materijal, kvalitetu rezne površine i vijek trajanja potrošnih dijelova. Veća jakost struje obično rezultira širim rezom, dok manja struja daje uži rez. Pravilno podešavanje jakosti struje, u skladu s debljinom materijala i brzinom rezanja, omogućuje postizanje optimalne širine reza. Primjenom optimalne jakosti struje dobiva se visokokvalitetni rez sa minimalnim deformacijama, troskom i neravninama. Izvori struje za plazma rezanje imaju strmo padajuću karakteristiku (slika 12) ili karakteristiku konstantne struje, čime se postižu vrlo male promjene snage rezanja kako luk postaje duži (slika 13).



Slika 12. Strmo padajuća karakteristika [7]

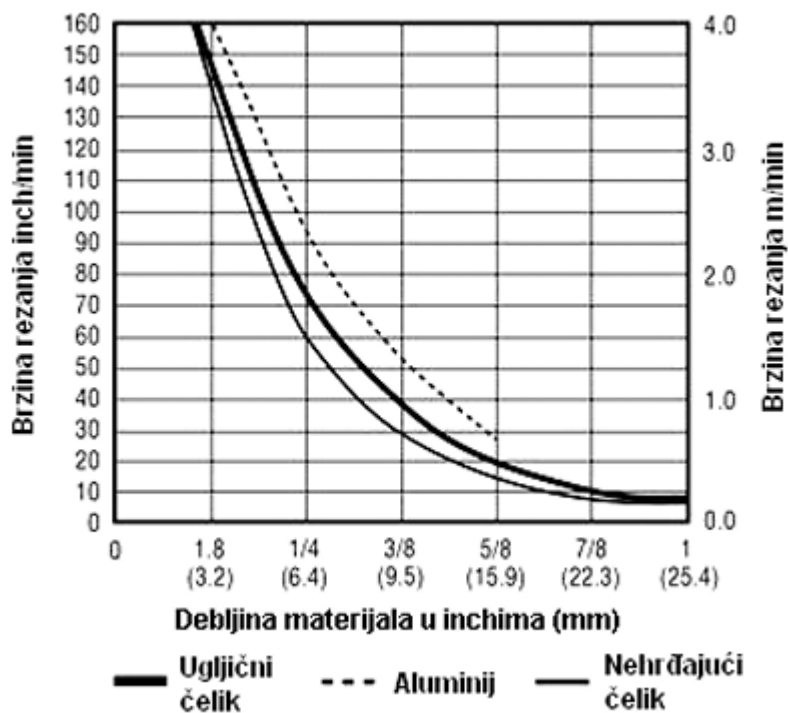


Slika 13. Karakteristika konstantne struje [7]

3.3.2. Brzina rezanja

Kako bi se postigla visoka ekonomičnost u procesu plazma rezanja, potrebno je pronaći optimalnu brzinu rezanja s obzirom na debljinu i vrstu materijala, jakost struje i odgovarajuću mješavinu plinova. Povećanjem brzine rezanja može se smanjiti širina reza, ali istovremeno se povećava nagib reza. Za ručno rezanje složenih oblika, uobičajena brzina je oko 1 m/min. Jedan od načina određivanja pravilne brzine rezanja jest praćenje luka plazme. Ako se koristi plazma koja reže pomoću zraka, luk bi trebao biti okomit na radni komad tijekom izlaska s donje strane reza. Kod plazme koja reže pomoću dušika, argona ili vodika, luk na izlazu iz komada trebao bi ići u suprotnom smjeru od smjera mlaza [10].

Kod prevelike brzine rezanja može doći do zaostajanja i oscilacije luka, nakon čega nastaju stepeničaste brazde, veliki nagib i troska na donjoj strani reza. Troska koja nastaje tijekom prevelike brzine rezanja zahtijeva naknadno brušenje. Ukoliko je brzina prevelika može doći i do nepotpunog probijanja radnog komada. S druge strane, ako je brzina rezanja preniska, širina reza i negativni unos topline biti će znatno veći, a na dnu reza se također nakuplja troska koju je nešto lakše ukloniti u odnosu na onu koja nastaje kod prevelike brzine. Zbog toga je važno prilagoditi brzinu rezanja prema drugim parametrima procesa, kako bi se postigli ravni rezovi bez suviše troske. Slika 14 prikazuje brzinu rezanja u ovisnosti o debljini materijala.

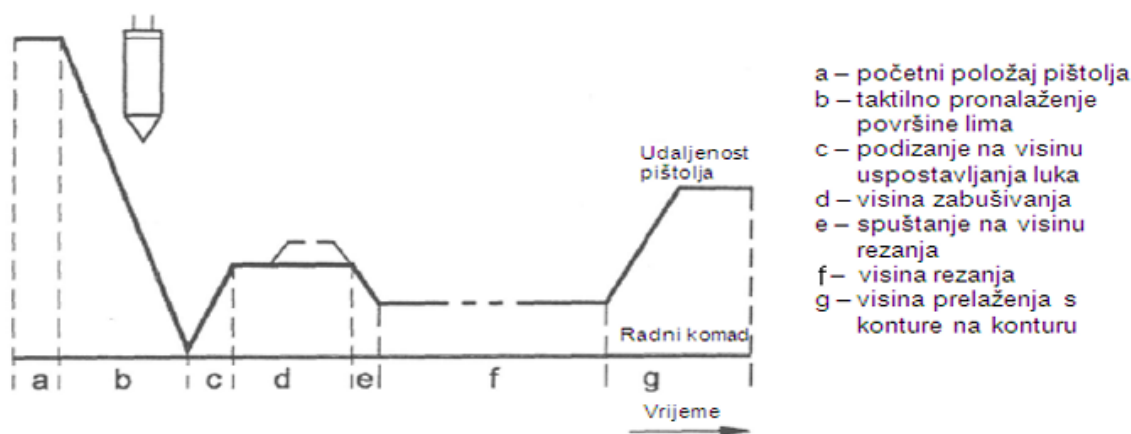


Slika 14. Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [10]

3.3.3. Udaljenost sapnice od radnog komada

Tijekom procesa plazma rezanja važno je precizno održavati konstantni razmak između sapnice i komada za ravnomjernu širinu i nagib reza. Pravilna regulacija udaljenosti omogućava dosljednost čak i na neravnim površinama. Optimalna visina najviše ovisi o plazma plinu i materijalu koji se obrađuje.

Kod CNC upravljanog plazma rezanja, često se koristi taktilni senzor koji pomaže utvrditi početni položaj sapnice. Senzorom se postiže prilazak sapnice radnom komadu sve dok senzor ne detektira kontakt s površinom. Kontaktom se zatvara električni krug. Nakon toga, pištolj se podiže na visinu potrebnu za uspostavljanje električnog luka. Tijekom procesa rezanja, udaljenost između pištolja i površine materijala održava se kroz praćenje napona električnog luka, koristeći sustav automatske regulacije visine. Kretanje CNC upravljanog plazma rezača može se vidjeti na slici 15 [10].



Slika 15. Kretanje plazma rezača prilikom CNC upravljanog plazma rezanja [10]

3.4. Plazmeni i zaštitni plinovi

Stabilnost luka, brzina rezanja te kvaliteta dobivenih reznih površina znatno ovisi o plazmenim i zaštitnim plinovima koji se primjenjuju tijekom procesa plazma rezanja. Prilikom odabira plazmenog ili zaštitnog plina iznimno su važna njegova fizikalna svojstva: ionizacija, energija disocijacije, kemijska reaktivnost, toplinska vodljivost i atomska težina. Pravilan odabir tehničkog plina ili mješavine plinova važan je za postizanje istovremene ekonomičnosti i visoke kvalitete rezanja.

3.4.1. Zrak

Primjena zraka za plazmenog plina omogućuje dobru kvalitetu i visoku brzinu rezanja niskougljičnih i nehrđajućih čelika te aluminijskih. Korištenje zraka pri rezanju nelegiranih čelika općenito rezultira ravnim i relativno glatkim rubovima. Zrak također snižava troškove procesa jer nije potrebno koristiti skupe plinove. Međutim, zrak za plazma rezanje mora biti izrazito visoke čistoće, bez kontaminanata poput raznih čestica, uljne malge ili vlage. Još jedan problem koji se javlja kod zračne plazme je smanjivanje zavarljivosti reznog ruba. Tijekom procesa rezanja dolazi do određenog nitriranja i oksidacije površine, što može rezultirati poroznošću tijekom zavarivanja. Zbog svoje svestranosti, visokih brzina rada i niskih razina stvaranja troske, zrak je dobar izbor za mnoge primjene. Općenito se koristi za ručno plazma rezanje i rezanje tankih ploča. Zrak je također optimalan sekundarni plin kada se koristi zračna plazma [11].

3.4.2. Kisik

Kisik se koristi kao plazma plin za rezanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Kada se kisik pomiješa s talinom, viskoznost taline se smanjuje. Manja viskoznost taline osigurava rubove reza bez neravnina i zaobljenja. Kod rezanja kisikom postižu se veće brzine rezanja nego s dušikom ili zrakom. Za razliku od dušika ili zraka, kisik ne uzrokuje nitriranje rezne površine i smanjuje opasnost od razvoja poroznosti tijekom naknadnog zavarivanja. Zbog velike brzine rezanja, širina zone utjecaja topline je vrlo mala. Velika brzina rezanja posljedica je kemijske reakcije kisika s materijalom.

Nedostatak rezanja kisikom je cijena plina i životni vijek potrošnih dijelova. Također, kisikom se ne preporučaju rezati nehrđajući čelik i aluminij. Najsuremeniji sustavi koriste početne inertne plinove u kombinaciji s kisikovom plazmom, kako bi postigli sličan vijek trajanja dijelova kao i sustavi s dušikom ili zrakom. Povećani troškovi potrošnog materijala i plina obično se nadoknađuju smanjenjem skupih sekundarnih operacija za uklanjanje troske i ravnjanje skošenih dijelova. Prilikom plazma rezanja kisikom, uglavnom se koristi zrak kao sekundarni plin [7, 11].

3.4.3. Plinska mješavina vodika i argona

Zahvaljujući svojoj visokoj atomskoj masi, argon zbog visoke gustoće kinetičke energije u plazmenom mlazu omogućuje izbacivanje rastaljenog materijala iz reza. S obzirom na nisku energetska ionizaciju od 15,76 eV, argon relativno lako postaje ionski nabijen. Zbog toga argon omogućuje laku uspostavu plazmenog luka. Kada se plazma luk uspostavi, uvodi se plazma plin

kako bi se pokrenuo proces rezanja. Međutim, zbog svoje prilično niske toplinske vodljivosti, argon nije optimalan plin za plazma rezanje. Primjena čistog argona rezultira ograničenom brzinom rezanja i stvaranje površine koje su sklone tuposti i ljuštenju.

Usporedba između vodika i argona otkriva značajne razlike u njihovim atomskim svojstvima i njihovoj sposobnosti za prenošenje toplinske energije. Vodik se ističe niskom atomskom težinom i relativno visokom toplinskom vodljivošću. Pri visokim temperaturama, vodik se disocira što rezultira suženjem električnog luka. Zbog svojih fizikalnih svojstava, vodik je jednako nepogodan kao plazma medij kao i argon. No, kada se povoljna toplinska svojstva vodika kombiniraju s visokom atomskom masom argona, rezultirajuća smjesa plina omogućuje brz prijenos visoke kinetičke energije, kao i dovoljnu toplinsku energiju materijalu koji se reže. U praksi se često koristi mješavina od 35% vodika i 65% argona (H₃₅).

Mješavina plinova vodika i argona koristi se za plazma rezanje debljih komada nehrđajućeg čelika i aluminijsa. Ova mješavina omogućuje stvaranje visoko-energetske plazme koja rezultira ravnom i glatkom reznom površinom. Kako bi se spriječilo oksidiranje metala i poboljšala kvaliteta reza, obično se koristi dušik kao zaštitni plin, zajedno s argon-vodik plazmom. Jedan od nedostataka ove kombinacije je visoki trošak [7, 11].

3.4.4. Dušik

Dušik se može koristiti kao samostalni plazma plin. Omogućuje brzo rezanje obradaka s tankim stijenkama bez oksida. Nedostatak je što se rezovi sa paralelnim stranama rijetko postižu. Proizvedeni kut skošenja uvelike ovisi o postavljenoj količini plina i brzini rezanja. Povećana koncentracija dušika na reznim površinama također nepovoljno utječe je na zavarivanje, uzrokujući porozitet.

Plazma rezanje dušikom predstavlja jako dobar izbor za rezanje aluminijsa i nehrđajućeg čelika jer se postiže visoka kvaliteta reza. S druge strane, prilikom rezanja nelegiranih čelika kvaliteta reza je manja zbog pojave nitriranja rezne površine. Temperatura rezanja dušikom je niža u odnosu na rezanje zrakom, što ima značajan pozitivan utjecaj na trajnost elektroda i sapnica. Osim dušika, zrak se često koristi kao sekundarni plin. Još jedan sekundarni plin koji se može primjeniti je ugljični dioksid, čija prisutnost poboljšava završnu obradu površine, brzinu rezanja i vijek trajanja dijelova. Nedostatak primjene ugljičnog dioksida je visoka cijena u usporedbi sa zrakom ili dušikom jer zahtijeva posebne plinske cilindre s razdjelnicima. Kao sekundarni medij može se primjeniti i voda, čija prisutnost pri rezanju aluminijsa i nehrđajućeg čelika omogućuje postizanje vrlo glatke i sjajne površine rezanja [7, 11].

3.4.5. Plinska mješavina argona, vodika i dušika

Za rezanje visokolegiranih čelika i aluminija, često se primjenjuje plinska mješavina koja sadrži argon, vodik i dušik. Ova kombinacija plinova ima značajne prednosti u smislu dobivanja visokokvalitetnih rezova i smanjenja stvaranja troske u usporedbi s mješavinama argona i vodika. Uobičajeni omjeri plinova u mješavinama su približno 55% argona te 45% dušika i vodika. Udio dušika često doseže oko 30%. Prilagodba količine vodika u mješavini ovisi o debljini materijala koji se reže. Kako bi se osigurala optimalna učinkovitost, veći udio vodika koristi se kod debljih materijala. Dodavanje dušika u mješavinu argona i vodika ima značajnu ulogu pri rezanju visokolegiranih čelika i konstrukcijskih čelika. Prisutnost dušika omogućuje postizanje rezova bez stvaranja troske te povećava brzinu rezanja [7].

3.4.6. Zaštitni plin

Primjena zaštitnog, odnosno sekundarnog plina, ima značajnu ulogu u poboljšanju kvalitete rezanja i kontroliranju samog procesa. Sekundarnim plinovima stvara se zaštitni sloj oko plazma luka, čime se luk štiti od negativnih utjecaja okoline. Kvalitetan odabir sekundarnog plina i njegov optimalan protok ovisit će o: radnom materijalu, debljini materijala, željenoj kvaliteti rezanja, metodi rezanja i drugim karakteristikama. Najčešće korišteni sekundarni plinovi su: zrak, kisik, dušik i vodik, a rjeđe se primjenjuje: argon, ugljični dioksid i helij. Glavni ciljevi primjene sekundarnog plina su:

1. Zaštita od oksidacije reznog ruba
2. Zaštita od nitriranja reznog ruba
3. Sprječavanje stvaranja troske - vrlo važno kod preciznih i čistih rezova
4. Povećanje stabilnosti plazma luka - sekundarni plinovi pomažu stabilizirati primarni plazma luk, čime se postiže preciznije rezanje
5. Povećanje gustoće plazma luka - povećanjem gustoće energije mogu se rezati tanji rezovi veće debljine
6. Bolje hlađenje materijala - sprječavaju se toplinske deformacije
7. Veća brzina rezanja - pravilno odabrani sekundarni plin može omogućiti veću brzinu rezanja bez smanjenja kvalitete

Zaštitni plinovi korišteni u plazma rezanju pridržavaju se smjernica norme HR EN ISO 14175:2008, koja regulira plinove i plinske mješavine za postupke zavarivanja taljenjem i srodnih

postupaka. Norma uključuje oznake, strogu kontrolu preciznosti miješanja te visoku čistoću plinova. U tablici 1 nalaze se različite kombinacije plazmenih i sekundarnih plinova.

Tablica 1. Plazmeni i zaštitni plinovi [9, 11]

Plazmeni plin / sekundarni plin:	Konstruktivski čelik	Nehrdajući čelik	Aluminijeve legure
Zrak / zrak	Moguće stvaranje nitrida na površini reza, dobra brzina rezanja i ekonomičnost.	Hrapava i oksidirana površina reza s malo troske, dobra brzina rezanja i ekonomičnost.	Hrapava površina reza, dobra brzina rezanja i ekonomičnost.
Kisik / zrak	Visoka kvaliteta reza s malo troske, nema stvaranja nitrida na površini reza, manje troske nego kod rezanja zrakom, troska se lako uklanja.	Ne preporuča se.	Ne preporuča se.
Argon i vodik / dušik	Ne preporuča se.	Glatka i sjajna površina reza pri većim debljinama od 12 mm, pojava troske pri manjim debljinama.	Glađa površina reza nego kod rezanja zrakom, približno okomita površina reza, visoka kvaliteta reza pri debljinama većim od 12 mm.
Dušik / dušik	Slabija kvaliteta reza s malo troske, izvrstan vijek trajanja dijelova.	Dobra kvaliteta rezanja i vijek trajanja dijelova, sjajna površina reza bez troske u području tankih limova.	Izvrсна kvaliteta rezanja i vijek trajanja dijelova.
Argon, vodik i dušik / dušik	Ne preporuča se.	Glatka i sjajna površina reza, dušik smanjuje stvaranje troske.	Glatka i sjajna površina reza, dušik smanjuje stvaranje troske.

3.5. Oprema za plazma rezanje

Poznavanje svake komponente sustava i njezine optimalne konfiguracije, važno je za postizanje optimalnog procesa rezanja. Suvremeni uređaji za plazma rezanje omogućuju visoku preciznost rezanja, uz minimalni gubitak materijala i manjom potrebom za dodatnom obradom. Edukacija korisnika o pravilnom rukovanju opremom također ima važnu ulogu u postizanju

optimalnih rezultata. Osnovni dijelovi opreme za plazma rezanje su: izvor napajanja, plazma gorionik te plazmeni i zaštitni plinovi.

3.5.1. Izvor napajanja

Postoji nekoliko tipova izvora napajanja za plazma rezanje, uključujući istosmjerni i visokofrekventni izvor. Visokofrekventni izvori (inverteri) koriste tranzistore kojima se povećava frekvencija izmjenične struje, a time se omogućuje korištenje manjeg transformatora. Zbog korištenja manjih transformatora inverteri su mnogo lakši i pokretniji od konvencionalnih izvora plazma energije što ih čini prikladnim i za ručnu primjenu. Današnji izvori se uglavnom izrađuju s inverterskom tehnologijom i imaju odlične mogućnosti integriranja s robotiziranim CNC sustavima. Upravljanje i kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza. Primjer visokofrekventnog izvora nalazi se na slici 16 [9].



Slika 16. Izvor napajanja za plazma rezanje [11]

Prilikom odabira izvora napajanja, najprije je potrebno uzeti u obzir debljinu materijala koji će se rezati. Izvori se u pravilu uspoređuju prema kapacitetu rezanja i jakosti struje. Svaki izvor napajanja ima svoju optimalnu debljinu plazma rezanja. Ukoliko je cilj rezati tanje materijale, pogodnije bi bilo odabrati izvor napajanja za rezanje plazmom niske struje. Time se osigurava dulji vijek trajanja potrošnih komponenti i štedi se potrošnja energije.

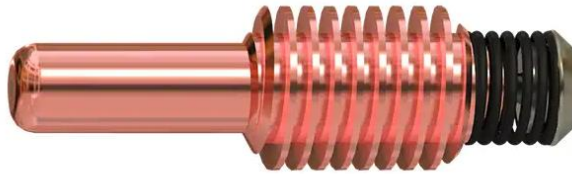
3.5.2. Gorionik plazma rezača

Dobar gorionik omogućuje visoko suženje plazmenog luka, čime se postižu veće brzine i kvaliteta rezanja. Glavne komponente gorionika su: sapnica, elektroda i zaštitna kapa (slika 17). Često sadržava i dodatne dijelove poput deflektora i vrtložnog prstena. Sapnica i elektroda su komponente s ograničenim vijekom trajanja i pogrešan izbor ili nepravilna uporaba sapnice, odnosno elektrode može značajno skratiti njihov životni vijek i oštetiti rezač. Životni vijek potrošnih dijelova određen je intenzitetom struje rezanja, brojem paljenja i vrstom korištenog plazma plina. Pravilnim upravljanjem plazmenim plinom i snagom na početku i na kraju rezanja, kao i odvođenjem topline s elektrode, može se produžiti vijek trajanja potrošnih dijelova [7].



Slika 17. Glavni dijelovi gorionika plazma rezača [12]

Glavni zadatak elektrode je osigurati postojanje plazma luka, spajajući se na negativni izlaz napajanja. Najčešće se koriste elektrode izrađene od volframa, hafnija ili cirkonija. Zbog svoje sklonosti erodiranju, volframove elektrode mogu se koristiti samo s inernim plazma plinovima i njihovim mješavinama. Kod korištenja čistog kisika ili plazma plinova koji sadrže kisik, značajno povećanje vijeka trajanja elektroda može se postići korištenjem elektroda izrađenih od cirkonija ili hafnija. Spomenuti materijali prirodno tvore zaštitni sloj na visokim temperaturama. Pri plazma rezanju pomoću kisika, produljenje vijeka trajanja elektrode može se postići uporabom dva plina: proces paljenja provodi se korištenjem inertnog plina, a proces rezanja nastavlja se kisikom. Primjer elektrode za plazma rezanje nalazi se na slici 18 [7].



Slika 18 Elektroda za plazma rezanje [11]

Sapnica je konstruirana na način da njen otvor lagano premašuje promjer fokusiranog ioniziranog plina. Ovakav dizajn omogućuje sapnici da precizno usmjerava plazmeni mlaz bez negativnih posljedica po samu sapnicu. Kvaliteta rezanja pada kada su vanjski ili unutarnji dijelovi otvora sapnice oštećeni. Oštećenje unutarnjeg dijela sapnice može proizaći iz različitih uzroka, kao što su pregrijavanje elektrode, problemi s paljenjem luka ili protokom plina te neispravna jakost struje. Oštećenje vanjskog dijela sapnice može se dogoditi zbog prekomjernog prskanja metala, što se često javlja ako gorionik nije dovoljno udaljen od radnog komada ili tijekom rezanja debljih materijala. Oštećenje vanjskog dijela također može proizaći iz problema pri uspostavljanju električnog luka između elektrode i radnog komada. Učinkovita zaštitna navlaka štiti sapnicu tijekom procesa rezanja. Ključni element zaštite je otvor na navlaci i oštećenje tog otvora može negativno utjecati na protok plazme ili zaštitnog plina, što rezultira lošom kvalitetom reza. Na slici 19 lijevo je prikazana nova sapnica, a s desne strane nalazi se istrošena sapnica koju je potrebno zamijeniti.



Slika 19. Nova i istrošena sapnice [13]

Zaštitna kapa štiti sve ostale potrošne materijale od iskrenja i rastaljenog metala. Uglavnom se izrađuje od bakra i također osigurava odgovarajuću udaljenost između mlaznice i radnog komada.

Oštećena ili neodgovarajuća zaštitna kapa također može uzrokovati lošu kvalitetu rezne površine i nepravilni nagib reza.

3.5.3. Sustav za vođenje

Vođenje plazma rezača tijekom rezanja ostvaruje se ručnim ili mehaniziranim upravljanjem. Ručno rezanje plazmom je vrlo učinkovito za brzo rezanje raznih materijala gdje nije potrebna visoka preciznost, točnost ili ponovljivost. Ručni plazma rezači često se primjenjuju za popravak neispravnih zavara ili za izradu utora u spojevima.

Mehanizirani plazma sustavi koriste drugačiju vrstu plazma sustava u odnosu na ručno rezanje. Kod mehaniziranih sustava koriste se veći izvori struje i plazma rezači većih dimenzija te imaju sučelje koje omogućuje automatsko upravljanje putem CNC-a. CNC sustavi značajno povećavaju brzinu, produktivnost i preciznost rezanja. Kod rezanja tankih i srednjih debljina limova, ostvaruje se visokokvalitetan rez pri iznimno visokim brzinama, uz relativno niske troškove. Napredne rotirajuće jedinice omogućuju i 3D obradu. Moderni CNC strojevi mogu obrađivati različite oblike materijala, a višenamjenski strojevi za rezanje plazmom pružaju mogućnosti za dodatne operacije kao što su označavanje, bušenje, urezivanje i izradu navoja. Na slici 20 prikazan je primjer CNC sustava za plazma rezanje [9].



Slika 20. CNC sustav za plazma rezanje [13]

Automatiziranje plazma rezanja u trodimenzionalnom prostoru zahtijeva upravljanje robotom. Robot omogućuje vođenje gorionika pod različitim kutovima i brzinama, čime se postižu stabilne krivulje i glatke kosine, u tri dimenzije istovremeno. Jedna od glavnih prednosti korištenja robota je značajno smanjenje trošenja potrošnog materijala.

Potrošni materijal, poput elektroda, troši se brže kada se gorionik nalazi na pogrešnoj udaljenosti od obratka ili kod prebrzog rezanja. Robot uvijek izvršava rezanje na isti način i tako kontinuirano osigurava visoku kvalitetu reza te dugotrajnost sapnice i elektrode. Uz preciznu kontrolu kretanja i napredne senzorske sustave, roboti za plazma rezanje mogu precizno i sljedivo rezati različite materijale, proizvodeći dijelove koji udovoljavaju strogim industrijskim standardima kvalitete i preciznosti. Na slici 21 prikazan je primjer robotom upravljano plazma rezanja [14].



Slika 21. Plazma rezanje robotom [14]

4. Plazma rezanje aluminija

Rezanje aluminija plazmom može ponuditi značajne prednosti u odnosu na lasersko rezanje, posebno kada je u pitanju debljina, budući da se laserom režu samo metale debljine do oko 25 mm, dok plazma može rezati aluminij do 160 mm. Rezanje plazmom također pruža niže troškove opreme i operativne troškove. S druge strane, laser ima prednost kada je u pitanju precizno rezanje, ali točnija tolerancija koju pruža lasersko rezanje važna je samo kod projekata kod kojih se zahtijevaju izuzetno precizna obrada, npr. u zrakoplovnoj industriji. Kvaliteta rezanja koju pruža plazma rezanje dovoljna je za većinu primjena. Moderni sustavi za plazma rezanje mogu precizno rezati aluminij debljine do 38 mm pri probijanju te 50 mm počevši od ruba [15].

4.1. Tehnički plinovi

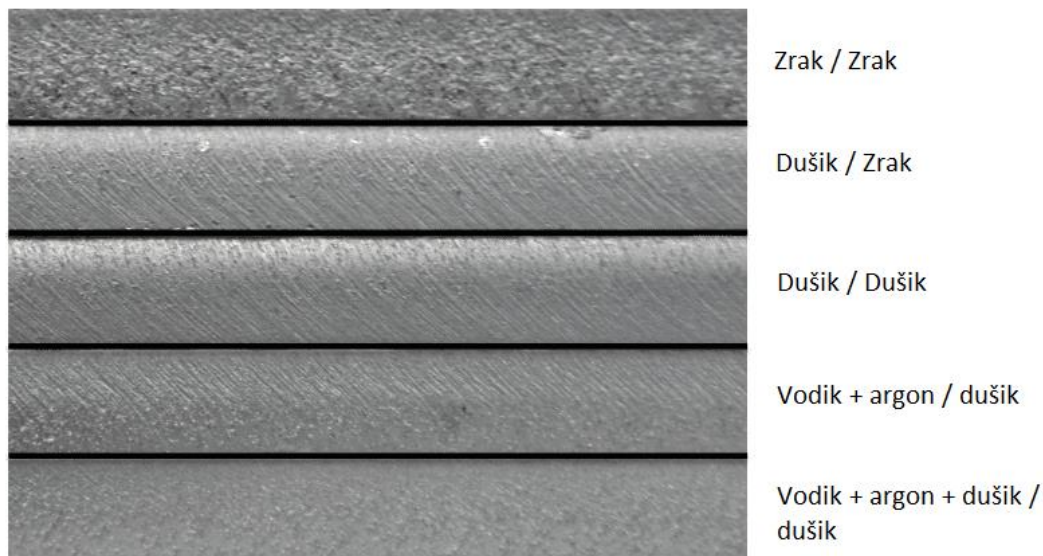
Jeftiniji plazma sustavi ograničeni su na uporabu komprimiranog zraka kao plina za rezanje, što obično rezultira manjom kvalitetom rubova u usporedbi s industrijskim plazma sustavima. Industrijski sustavi mogu koristiti specijalne mješavine plinova poput argon-vodika, pružajući time znatno bolju kvalitetu reza. Tablica 2 prikazuje parametre za rezanje aluminija korištenjem argon-vodik mješavine.

Tablica 2. Parametri rezanja za aluminij [16]

Materijal	Debljina mm	Struja A	Širina reza mm	Optimalna brzina mm/min	Protok Ar l/min	Protok H2 l/min
Aluminij	5	50	2,0	1500	12	8
	5	100	3,0	2500	12	8
	10	100	3,0	1200	12	8
	20	100	3,0	600	12	8
	40	250	4,5	500	15	12
	85	250	4,5	150	15	12

Kod debljih ploča (> 12 mm), upotrebom mješavine plinova (obično argon, vodik i dušik) uz veću jakost struje i velike brzine rezanja, postiže se brz i jednostavan proces rezanja s izrazito glatkom površinom. U slučaju rezanja tanjeg aluminija (< 12 mm), često se koristi dušik kao plazmeni plin u kombinaciji s zrakom, ugljičnim dioksidom ili dušikom kao zaštitnim plinom. Ukoliko sustav to dopušta, može se koristiti i vodena zaštita jer pruža visoku kvalitetu rubova i

produžuje vijek trajanja potrošnog materijala. Na slici 22 prikazane su dobivene rezne površine aluminija pri korištenju različitih kombinacija plazmenih i sekundarnih plinova.



Slika 22. Rezna površina aluminija za različite kombinacije plinova [15]

4.2. Sigurnost kod plazma rezanja aluminija

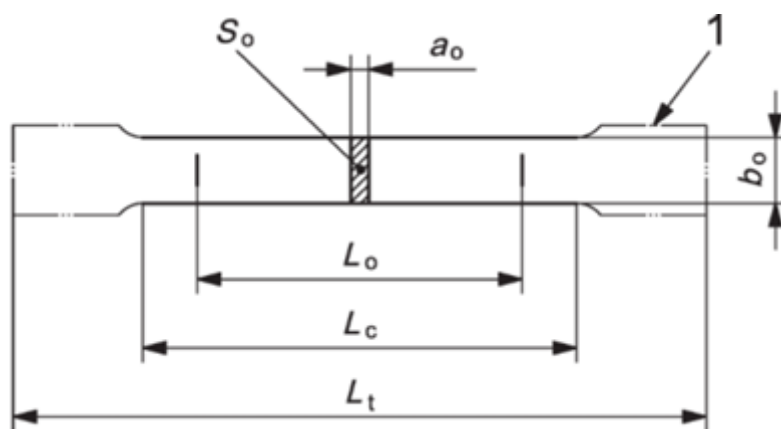
Prilikom rezanja plazmom provode se određene mjere sigurnosti kao što su: zaštita od požara, sigurna uporabe električne energije, zaštita operatera, kontrola ispušnih plinova i upravljanje bukom. Međutim, postoje i određene opasnosti koje se posebno odnose na rad s aluminijem. Prašina koja nastaje tijekom rezanja aluminija ne smije se miješati s prašinom niskougličnog čelika, npr. u filtracijskom sustavu, jer može doći do spontanog zagrijavanja. U rijetkim slučajevima može doći do egzotermne reakcije prašine aluminija i željeznih oksida iz niskougličnog čelika. Zbog toga je od visoke važnosti pravilna kontrola filtracijskog sustava i pravilno upravljanje radnom okolinom. Nadalje, prilikom rezanja aluminija ispod površine vode postoji rizik od eksplozije zbog proizvodnje vodika. Rizik je manji kod malih dijelova potopljenih na kratko vrijeme, ali kod većih površina poput ploča može doći do nakupljanja mjehurića vodika ispod ploče. Uporaba aeratora ili kvalitetnog sustava filtracije na reznom stolu znatno smanjuje rizik od nakupljanja vodika [15].

5. Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovna mehanička svojstva materijala. Kako bi se dobiveni rezultati mehaničkih svojstava mogli međusobno uspoređivati, potrebno je ispitivanje provoditi prema važećim standardima. Statičko vlačno ispitivanje pri sobnoj temperaturi provodi se u skladu s normom EN ISO 6892-1:2019. Norma propisuje oblik i mjere ispitnog uzorka, brzinu opterećenja, temperaturu prostora u kojem se izvodi ispitivanje te način provođenja ispitivanja i izračunavanja rezultata. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima (epruvetama) okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka [17].

5.1. Postupak ispitivanja prema normi EN ISO 6892-1:2019

Vlačno ispitivanje materijala obavlja se na specijalnom uređaju koji se naziva kidalica. Prvi korak ispitivanja je priprema uzorka. Uzorak treba imati određene dimenzije i geometriju prema normi, kako bi se osigurala reprezentativnost rezultata. Slika 23 prikazuje pravokutni uzorak za statičko vlačno ispitivanje prema normi ISO 6892-1:2019, a standardne dimenzije prikazane su u tablici 3.



Slika 23. Pravokutni uzorak za ispitivanje prema normi EN ISO 6892-1 [18]

Tablica 3. Standardne dimenzije uzorka prema normi EN ISO 6892-1 [18]

Dimenzija	mm
L_0	80,0
L_C	90,0
L_T	120,0

Nakon pravilne pripreme, uzorak materijala stavlja u mehanički sustav kidalice, gdje se pričvršćuje pomoću stezaljki ili čeljusti. Nakon što je uzorak pravilno postavljen i centriran, počinje se primjenjivati vlačna sila koja se postepeno pojačava. Promjena naprezanja za materijale s modulom elastičnosti manjim od 150 000 MPa (magnezij, aluminijske legure, mjed, titan itd.) iznosi između 1 i 20 MPa/s. Za materijale koji imaju modul elastičnosti veći od 150 000 MPa (kovano željezo, čelik, volfram, legure na bazi nikla...) promjena naprezanja iznosi između 6 i 60 MPa/s. Uzorak se kontinuirano opterećuje vlačnom silom sve dok ne dosegne točku loma. Tijekom primjene sile, istovremeno se kontinuirano mjere i bilježe vrijednosti primijenjene sile i istežanja uzorka, pomoću senzora za mjerenje sile i senzora za mjerenje istežanja. Dobiveni podaci se prikazuju grafički u dijagramu sila (F) - produljenje (ΔL), automatski pomoću računalnog programa. Ovaj dijagram omogućava vizualno praćenje ponašanja materijala tijekom ispitivanja.

5.2. Definiranje veličina

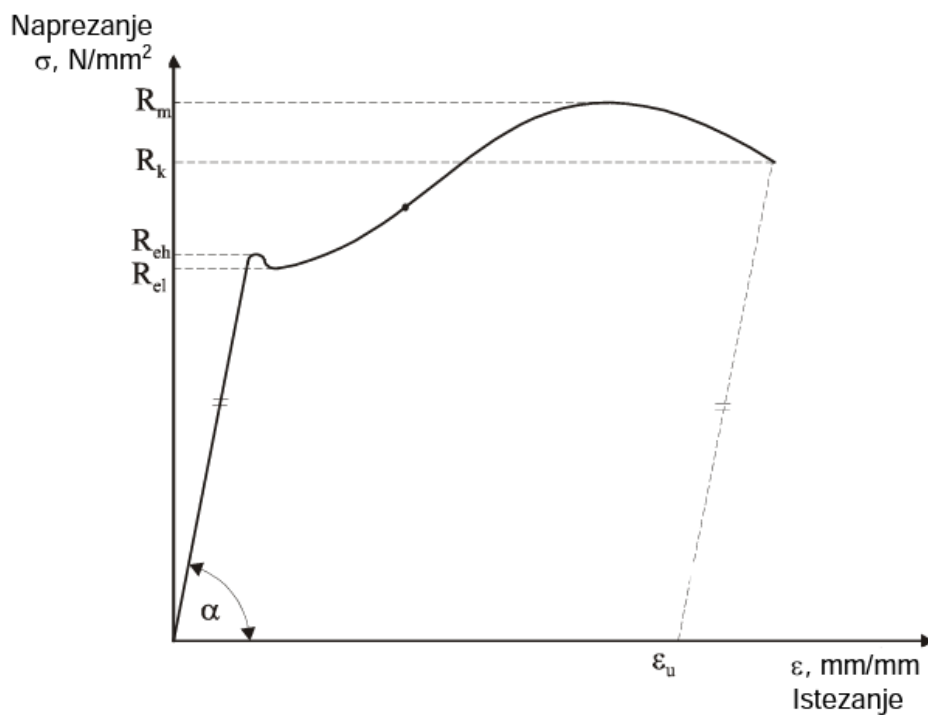
Iznosi sila kod statičkog vlačnog ispitivanja ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala. Za to je potrebno uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka epruvete pa se umjesto sile F uvodi naprezanje σ , koje se određuje izrazom (1) [17]:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Ukoliko se produljenje ΔL podijeli s početnom mjernom duljinom L_0 dobiva se relativno produljenje ili istežanje ε prema izrazu (2) [17]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [\text{mm/mm}] \quad (2)$$

Grafički prikaz odnosa između naprezanja i istežanja za određeni materijal naziva se konvencionalni dijagram naprezanja (σ) i istežanja (ε). Ovaj dijagram pruža uvid u ponašanje materijala pod različitim opterećenjima i omogućuje analizu mehaničke otpornosti materijala. Na slici 24 prikazan je dijagram naprezanje – istežanje za konstrukcijski normalizirani čelik.



Slika 24. Konvencionalni dijagram naprezanje σ - istezanje ε [17]

Konvencionalni dijagram naprezanje (σ) - istezanje (ε) počinje u ishodištu kao Hookeov pravac za koji vrijedi Hookeov zakon (3):

$$\sigma = E * \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

gdje je E modul elastičnosti (Youngov modul). Što je modul elastičnosti materijala veći, za isto će istezanje ε biti potrebno veće naprezanje σ , odnosno nagib Hookeova pravca biti će strmiji. Modul elastičnosti E je elastična konstanta materijala koja ovisi o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi [17].

Svako naprezanje u području gdje vrijedi Hookeov zakon izaziva samo elastičnu deformaciju. Hookeov pravac je s gornje strane ograničen granicom razvlačenja R_e , odnosno onim naprezanjem kod kojeg se epruveta produljuje uz konstantno ili uz čak privremeno smanjenje naprezanja. Karakteriziraju je dvije vrijednosti: gornja granica razvlačenja R_{eh} i donja granica razvlačenja R_{el} . U pravilu predstavlja dopuštenu vrijednost naprezanja pri radu strojnih dijelova i dijelova uređaja u eksploataciji uz određeni stupanj sigurnosti. Kod materijala kod kojih nije izražena granica razvlačenja R_e , određuje se tehnička ili konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, odnosno ono naprezanje koje u materijalu izaziva trajnu deformaciju od 0,2%. Granica razvlačenja R_e utvrđuje omjerom sile tečenja F_e i površine početnog presjeka S_0 , prema izrazu (4) [17]:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Vlačna čvrstoća R_m predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Važno je napomenuti da vlačna čvrstoća R_m nije maksimalno naprezanje, nego naprezanje pri maksimalnoj sili. Nakon dostignutog naprezanja R_m , deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj epruveti, već je lokalizira na jednom mjestu i dolazi do suženja epruvete. Vlačna čvrstoća jednaka je omjeru maksimalne sile F_m i površine početnog presjeka S_0 , prema izrazu (5) [18]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Naprezanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se konačno naprezanje R_k , a računa se kao omjer konačne sile F_k i početnog poprečnog presjeka S_0 , prema izrazu (6):

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

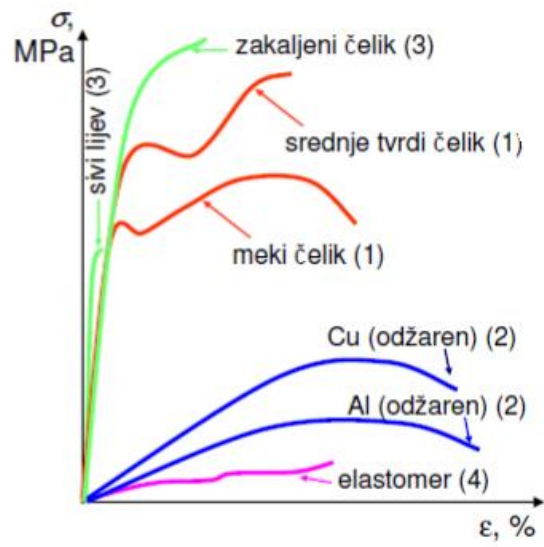
Statičkim vlačnim pokusom utvrđuje se i konačno relativno produljenje (konačno istezanje) ε_u prema izrazu (7):

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad [\text{mm/mm}] \quad (7)$$

Istezljivost A definira se izrazom (8):

$$A = \varepsilon_u * 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Materijali imaju različita mehanička svojstva pa se samim time razlikuju i njihove krivulje u σ - ε dijagramu (slika 25). Niskouglični čelici imaju jasno definiranu točku granice razvlačenja, odnosno trenutak kada materijal prelazi iz elastičnog u plastično područje deformacije. Kod bakra i aluminija nema izražene granice razvlačenja i karakterizira ih glatki prijelaz između elastičnog i plastičnog područja deformacije. Ovi materijali imaju izrazito visoku duktilnost.. Krhki materijali poput sivog lijeva ili zakaljenog čelika uglavnom se lome bez uočljive plastične deformacije. Dijagrami s entropijskom elastičnom deformacijom karakteristični su za određene organske materijale i elastomere, kod kojih se pod opterećenjem manifestiraju specifične promjene u strukturi materijala.



Slika 25. Dijagram naprezanje - istezanje za različite materijale [19]

6. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u sklopu laboratorija Sveučilišta Sjever. Cilj eksperimenta je bio ispitati utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću lima aluminijskog. Za rezanje je korištena zračna plazma bez sekundarnog medija, s automatskim vođenjem. Rezanje je provedeno u 9 prolaza, pri različitim parametrima brzine rezanja i jakosti struje. Zatim je provedeno ispitivanje vlačne čvrstoće na dobivenim uzorcima. Korištena metoda ispitivanja je statičko vlačno ispitivanje prema normi EN ISO 6892-1:2019. Nakon provedenih ispitivanja i analize rezultata, iznesen je zaključak o izvršenom eksperimentu.

6.1. Osnovni materijal

Za potrebe eksperimenta korišten je lim aluminijski EN AW 1050A, debljine 3 mm. Karakterizira ga visoka otpornost na koroziju, vrlo dobra sposobnost zavarivanja i svojstva lakog oblikovanja te zbog toga ima vrlo široku primjenu. Isporučuje se u obliku valjanog poluproizvoda različitih dimenzija. U tablici 4 prikazan je kemijski sastav materijala, a u tablici 5 svojstva materijala prema atestu proizvođača.

Tablica 4. Kemijski sastav materijala

	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ti (%)
Min	99,50	-	-	-	-	-	-	-
Max	-	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05

Tablica 5. Svojstva materijala

Svojstvo:	Vrijednost:	Jedinica:
Vlačna čvrstoća	100 – 135	MPa
Granica tečenja	~ 75	MPa
Smična čvrstoća	70	MPa
Istezljivost	4 - 8	%
Tvrdoća prema Brinellu	35	HB
Toplinska vodljivost	229	W/m·K
Temperaturni taljenja	645 - 657	°C
Električna vodljivost	58,4	% IACS
Koeficijent toplinskog širenja	$23,5 \cdot 10^{-6}$	1/K
Modul elastičnosti	69000	MPa

6.2. Plazma rezanje

Rezanje uzoraka izvedeno je pomoću ručnog plazma rezača Hypertherm Powermax30 AIR (slika 26). Uređaj je opremljen ugrađenim kompresorom zraka, čime se olakšava njegova mobilnost i postiže se neovisnost o vanjskim izvorima plazmenog plina. Omogućava rezanje niskougličnog čelika debljine do 16 mm te nehrđajućeg čelika i aluminija debljine do 13 mm. Maksimalna jakost struje iznosi 30 A, a ulazni napon se automatski prilagođava, čime se osigurava optimalna snaga tijekom procesa rezanja. Time se znatno olakšava rukovanje jer se smanjuje potreba za ručnim podešavanjem. Ugrađeni kompresor prilagođava tlak i uklanja vlagu iz plazmenog mlaza tokom svih faza rezanja. Svi potrošni dijelovi uređaja nalaze se u plazma pištolju, a to su: zaštitna kapa, deflektor, vrtložni prsten, sapnica i elektroda. U tablici 6 nalaze se karakteristike uređaja.

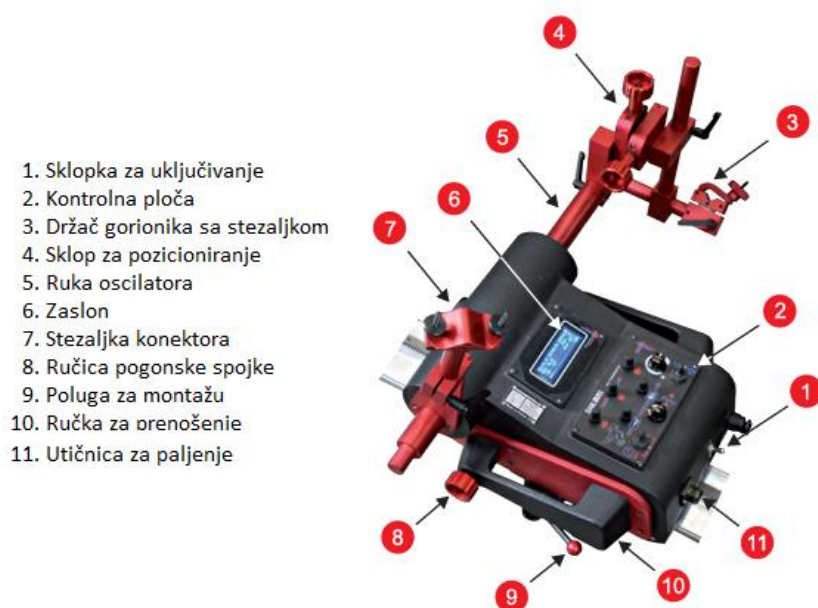


Slika 26. Plazma uređaj Hypertherm Powermax 30 AIR [11]

Tablica 6. Specifikacije uređaja Hypertherm Powermax 30 AIR [11]

Parametar	Vrijednost
Ulazni napon	120 – 240 V, 50/60 Hz
Ulazna struja	120 – 240 V, 29 – 15 A
Izlazna struja	15 – 30 A
Nazivni izlazni napon	83 VDC
Napon otvorenog kruga	256 VDC
Radni ciklus 40°C	35%, 240 V 20%, 120 V
Vrsta napajanja	IGBT inverter
Zahtjev za pogon motora	5,5 kW za puni izlaz od 30 A
Dimenzije	(D) 420 mm × (Š) 195 mm × (V) 333 mm
Težina	13,5 kg
Radni tlak	Zrak 5,5 bar
Sapnica	30 A

Kako bi se osiguralo automatizirano linearno kretanje po reznoj dužini, pištolj za plazma rezanje bio je povezan s uređajem „Rail Bull“ tvrtke Promotech (slika 27). Ovaj uređaj je konstruiran za horizontalno i vertikalno pravocrtno vođenje alata tijekom zavarivanja ili rezanja. Također, sadrži ugrađeni sustav osciliranja, što znači da se može njihati duž putanje zavarivanja ako je to potrebno. Posebno se koristi u procesima koji zahtijevaju dugotrajne i kontinuirane zavare ili rezove. Za ostvarivanje preciznog ravnotežnog kretanja pištolja, *Rail Bull* koristi zupčastu letvu. Zupčasta letva je stabilno pričvršćena na radni stol pomoću magnetskih ili vakuumskih jedinica, osiguravajući pouzdano i sigurno pozicioniranje cijelog sustava. Precizan razmak između pištolja i radnog komada osigurava dosljednost u rezultatima i jednaku kvalitetu po cijeloj dužini rezanja.



1. Sklopka za uključivanje
2. Kontrolna ploča
3. Držač gorionika sa stezaljkom
4. Sklop za pozicioniranje
5. Ruka oscilatora
6. Zaslon
7. Stezaljka konektora
8. Ručica pogonske spojke
9. Poluga za montažu
10. Ručka za prenošenje
11. Utičnica za paljenje

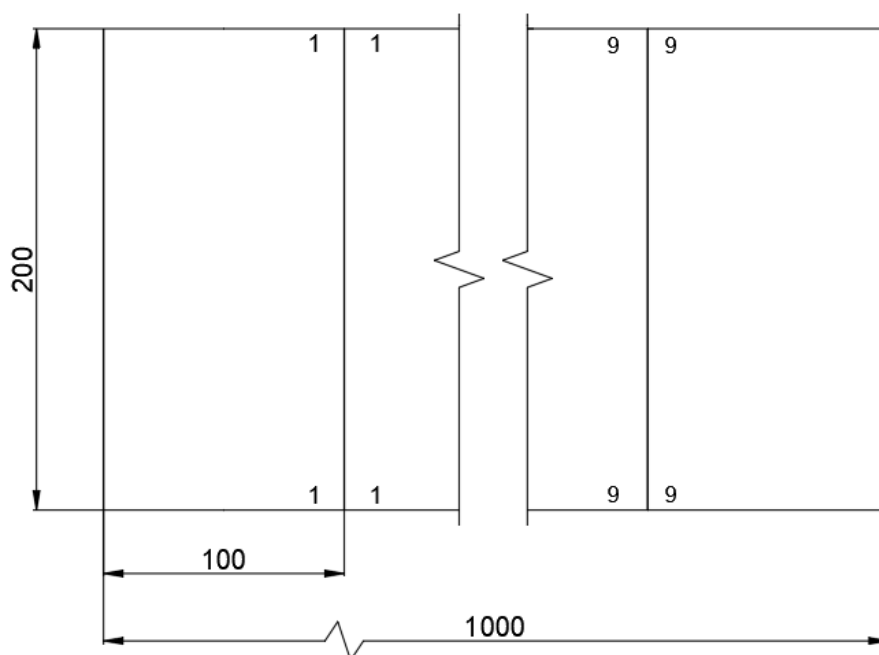
Slika 27. Rail bull automat [20]

Tablica 7. Specifikacije Rail bull uređaja [20]

Parametar	Vrijednost
Napon	115 – 230 V, 50/60 Hz
Snaga	100 W
Položaj (Zavarivanje)	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
Promjer pištolja	16 – 22 mm
Horizontalna vučna sila	350 N
Vertikalna vučna sila	150 N
Raspon podešavanja poprečnog prekidača	0 – 35 mm (gore/dolje, lijevo/desno)
Maksimalna horizontalna brzina	120 cm/min
Maksimalna vertikalna brzina	110 cm/min
Hod zupčaste letve	0 – 190 mm
Težina	20 kg

6.2.1. Postupak plazma rezanja

Na radnom komadu označeni su uzorci u obliku pločice, dimenzija 100 x 200 mm. Na svakom uzorku je ugraviran broj od 1 do 9, radi identifikacije. Redoslijed rezanja je odabran tako da se omogući optimalno odvođenje topline s dijela uzorka gdje se izvodi rez. Na taj način izbjegavaju se potencijalne deformacije materijala zbog prekomjernog unosa topline i sprječavaju se moguća oštećenja rubova uzoraka. Prikaz dimenzija označenih uzoraka nalazi se na slici 28. Rezanje uzoraka je izvršeno dostupnom opremom za plazma rezanje sa zrakom, pri različitim parametrima brzine rezanja i jakosti struje koji se nalaze u tablici 8.



Slika 28. Dimenzije ispitnih uzoraka

Tablica 8. Parametri eksperimenta

Broj uzorka	Brzina rezanja, v [cm/min]	Jakost struje, I [A]
1.	50	20
2.	60	20
3.	70	20
4.	80	20
5.	50	25
6.	60	25
7.	70	25
8.	80	25
9.	90	25

Tijekom procesa rezanja, održavan je konstantan razmak od 1 mm između pištolja i površine radnog komada. Radni komad je čvrsto pritegnut za radni stol uz pomoć dva vijka i dvije matice, kao što se vidi na slici 29. Nakon svakog rezanja, slijedi okretanje radnog komada i rezanje sa suprotnog kraja, kako bi se radni komad potpuno ohladio između svakog prolaza.



Slika 29. Plazma rezanje rezanja ispitnih uzoraka [21]

Prilikom rezanja četvrtog uzorka, došlo je do nepotpune penetracije materijala. Ustanovljeno je da zbog kombinacije previsoke brzine i preniske struje, plazma rezač ne može potpuno izrezati uzorak u jednom prolazu. Parametri četvrtog rezanja ranije su prikazani u tablici 8, a prikaz nepotpuno izrezanog uzorka je na slici 30. Zbog neispravnih parametara, četvrti uzorak nije uzet u obzir kasnije tijekom statičkog vlačnog ispitivanja.

Prednja strana



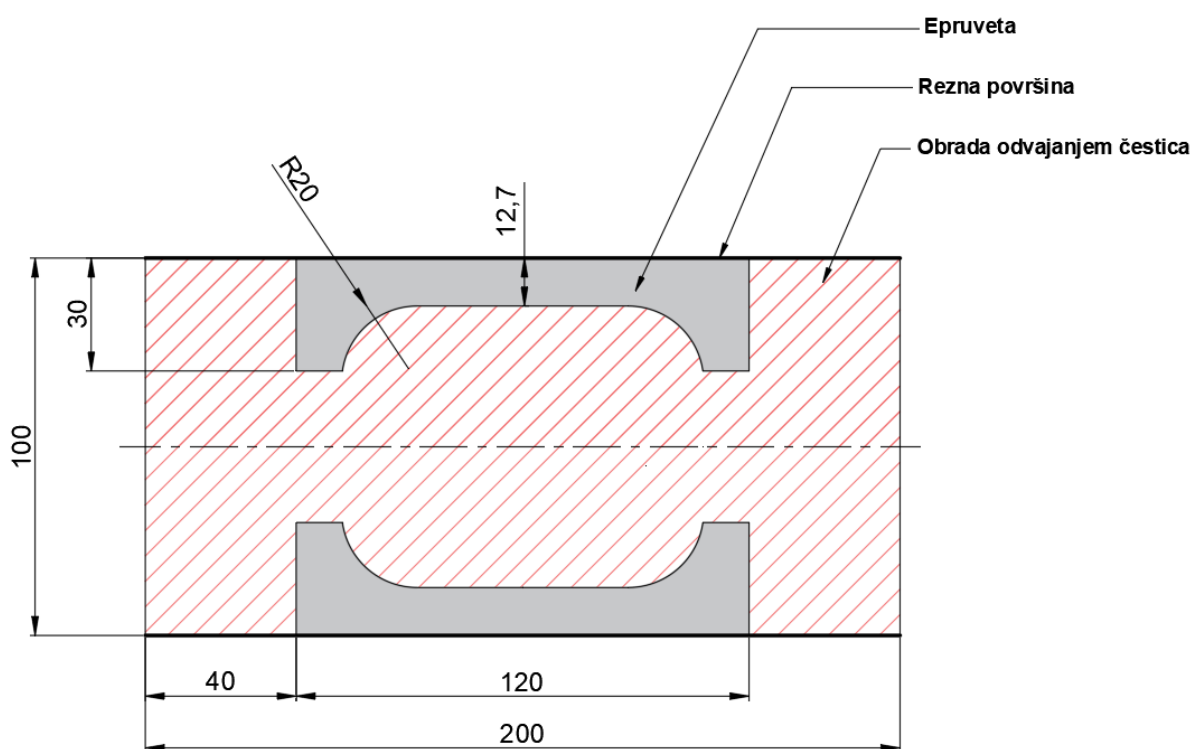
Stražnja strana



Slika 30. Djelomično izrezani uzorak [21]

6.3. Statičko vlačno ispitivanje

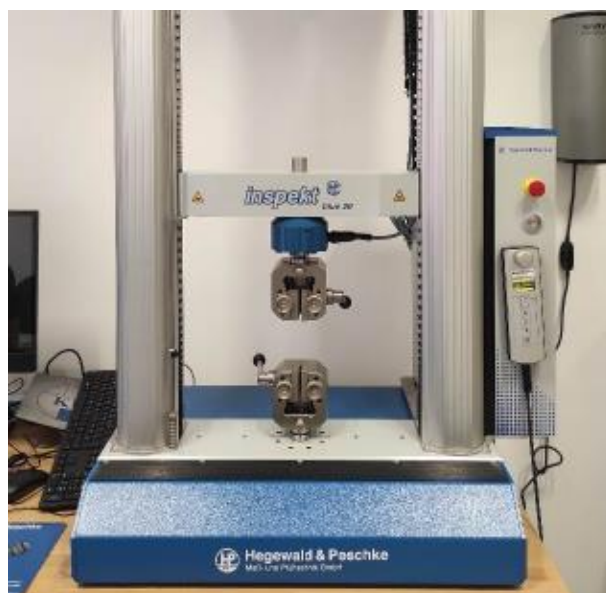
Nakon postupka plazma rezanja, iz svakog uzorka izrađene su dvije epruvete (sa svake strane reza) prema standardnim dimenzijama za statičko vlačno ispitivanje. Zbog prirode eksperimenta, oblik epruvete nije mogao biti izrađen simetrično. Umjesto toga, odabran je modificirani oblik koji omogućava ispitivanje mehaničkih svojstva u blizini rezne površine, kao što se može vidjeti na slici 31. Konačan oblik epruvete dobiven je pomoću obrade odvajanjem čestica.



Slika 31. Dimenzije ispitne epruvete

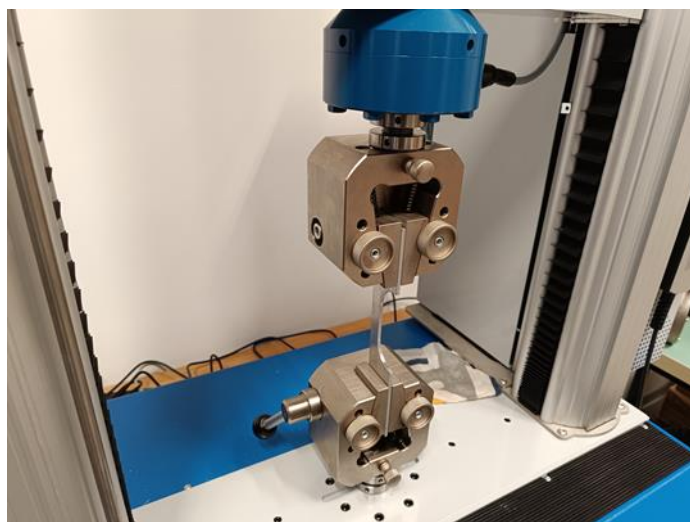
6.3.1. Provođenje ispitivanja

Ispitivanje se provodilo na sobnoj temperaturi u laboratoriju Sveučilišta Sjever pomoću univerzalne kidalice „Inspekt blue 20“, tvrtke Hegewald&Peschke (slika 32). Kidalica ima maksimalnu silu razvlačenja 20 kN i koristi se za ispitivanje rastezanja, kompresije, guljenja (adhezije) i savijanja raznih materijala. Računalni program koji se koristi za upravljanje kidalicom naziva se „LabMaster“.



Slika 32. Univerzalna kidalica „Inspekt blue 20“ [21]

Nakon što je svaka epruveta pažljivo pripremljena za ispitivanje, slijedi postavljanje epruveta u kidalicu (slika 33). Kidalica ima dvije čeljusti koje se koriste za pričvršćivanje epruveta. Čeljusti se mogu gibati po vertikalnoj osi pomoću upravljača i pozicioniraju se prema visini epruvete. Zatezanje epruvete obavlja se pomoću zateznih ručki koje se nalaze pokraj čeljusti.

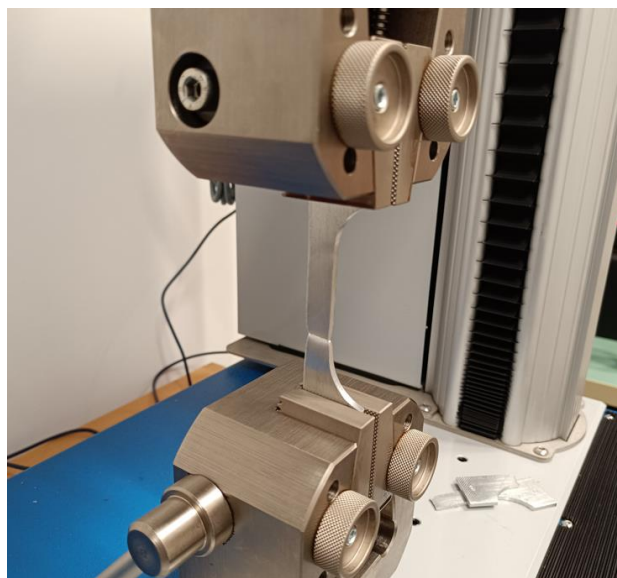


Slika 33. Kidanje epruvete [21]

Tijekom statičkog vlačnog ispitivanja određuje se vrijednost vlačne čvrstoće. Vlačna čvrstoća je omjer maksimalne sile i površine poprečnog presjeka, stoga se bilježi maksimalna vrijednost sile F_m , a površinu poprečnog presjeka S_0 potrebno je izračunati kao umnožak debljine materijala a_0 i širine epruvete b_0 :

$$S_0 = a_0 * b_0 = 3 \text{ mm} * 12,7 \text{ mm} = 38,1 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

U računalnom programu „LabMaster“ postavlja se brzina opterećenja epruvete (2 MPa/s), unosi se modul elastičnosti materijala ($E = 69 \text{ GPa}$) i izračunati poprečni presjek ($S_0 = 38,1 \text{ mm}^2$). Za vrijeme kidanja, računalni program automatski bilježi rezultate. Na slici 34 prikazana je epruveta nakon izvršenog procesa kidanja.



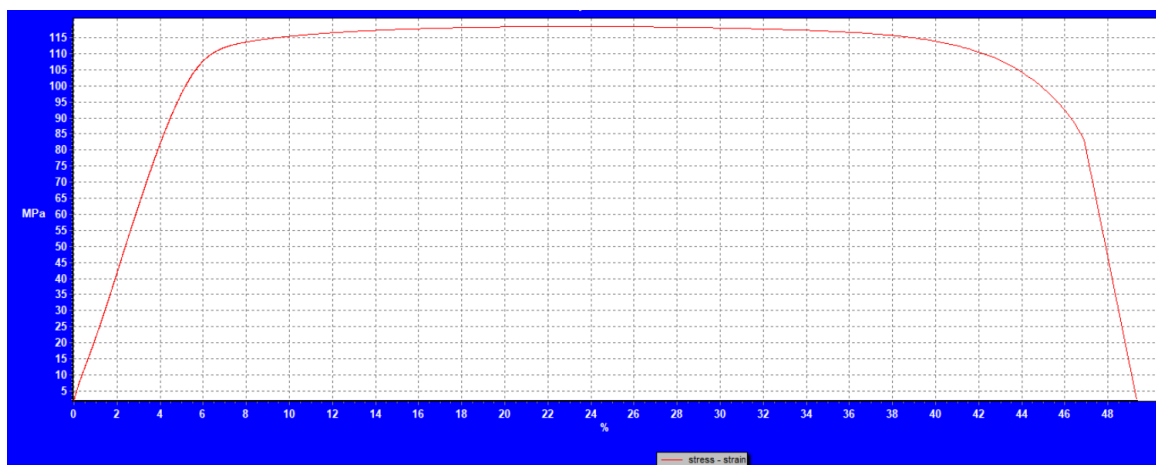
Slika 34. Epruveta nakon kidanja [21]

6.3.2. Rezultati ispitivanja

Najprije je provedeno ispitivanje epruveta izrađenih od osnovnog materijala koji se nije rezao plazmom, kako bi se utvrdila vlačna čvrstoća za početno stanje materijala. Ispitane su ukupno tri nominalno iste epruvete radi postizanja točnijeg rezultata. U tablici 9 je prikazana srednja vrijednost izmjerenih veličina. Budući da se na kidalicu nije montirao ekstenzometar, nije se mjerilo istežanje uzoraka, nego pomak kidalice. Dijagram naprežanje-pomak kidalice također se iscrtava u programu, a na slici 35 nalazi se primjer dijagrama jednog od ispitanih uzoraka.

Tablica 9. Svojstva osnovnog materijala

Broj uzorka	S_0 [mm ²]	F_{\max} [kN]	A [%]	R_m [MPa]
Početni uzorak	38,1	4,55	50,28	119,52



Slika 35. Dijagram naprezanje – pomak kidalice

Slijedi ispitivanje epruveta izrađenih od materijala nakon rezanja plazmom. Za svaki plazma rez izrađene su dvije epruvete, tako da je ispitivanje provedeno na ukupno 16 epruveta (slika 36.). Kao što je već ranije spomenuto, četvrti uzorak se nije ispitivao zbog nepotpunog protaljivanja plazmom. Tablica 10 prikazuje parametre rezanja i srednju vrijednosti izmjerenih veličina za svaki uzorak.



Slika 36. Epruvete nakon ispitivanja [21]

Tablica 10. Rezultati ispitnih uzoraka

Broj uzorka	v [cm/min]	I [A]	S_0 [mm ²]	F_{max} [kN]	A [%]	R_m [MPa]
Uzorak 1	50	20	38,1	4,29	50,42	112,58
Uzorak 2	60	20	38,1	4,33	49,02	113,58
Uzorak 3	70	20	38,1	4,36	57,13	114,41
Uzorak 5	50	25	38,1	4,22	53,39	110,71
Uzorak 6	60	25	38,1	4,34	47,86	113,70
Uzorak 7	70	25	38,1	4,38	54,98	114,94
Uzorak 8	80	25	38,1	4,38	53,59	114,79
Uzorak 9	90	25	38,1	4,39	49,14	115,23

6.4. Analiza rezultata

Usporedbom rezultata mjerenja ispitnih uzoraka s početnim uzorkom, može se zaključiti da plazma rezanje znatno utječe na vlačnu čvrstoću aluminijskog EN AW 1050A. Prosječna vlačna čvrstoća za početni uzorak iznosi 119,52 MPa, dok za ispitne uzorke iznosi 113,74 MPa, što znači da je vlačna čvrstoća u prosjeku manja za 5,78 MPa.

Analizom rezultata ispitivanih uzoraka utvrđeno je da se povećanjem brzine rezanja smanjuje unos topline u materijal, što rezultira boljom vlačnom čvrstoćom u odnosu na niže brzine rezanja. Pri tome treba imati na umu da veća brzina može negativno utjecati na kvalitetu rezanja.

Povećanjem jakosti struje unosi se više topline u materijal, ali se također omogućuje i povećanje brzine rezanja što u konačnici može smanjiti unos topline. Dokaz tome jest što je najviša vrijednost vlačne čvrstoće postignuta na uzorku 9, pri najvišoj ispitanoj jakosti struje ($I = 25 \text{ A}$) i najvišoj ispitanoj brzini rezanja ($v = 90 \text{ cm/min}$). S druge strane, najniža vrijednost dobivena je na uzorku 5, a razlog je visoka jakost struje ($I = 25 \text{ A}$) pri najnižoj ispitanoj brzini rezanja ($v = 50 \text{ cm/min}$). Rezultati vlačne čvrstoće u skladu su s očekivanjima.

7. Zaključak

U radu su izneseni teoretski podaci o toplinskim postupcima rezanja, detaljno je objašnjen postupak plazma rezanja, opisana je problematika rezanja aluminijskog materijala i postupak statičkog vlačnog ispitivanja. Toplinski postupci rezanja koriste toplinu kao glavni izvor energije za rezanje materijala. Postoje dvije vrste postupaka toplinskih rezanja: rezanje izgaranjem u struji kisika i rezanje taljenjem. Plazma rezanje svrstava se u postupak rezanja taljenjem, pri čemu se za rezanje koriste ionizirani plinovi zagrijani na visoku temperaturu. Isplativo je za rezanje debljih materijala, fleksibilno je i precizno, ali može rezultirati većom širinom reza. Postoje različite metode plazma rezanja. Svaka metoda ima svoje prednosti i primjenu ovisno o vrsti i debljini materijala koji se reže. Stabilnost luka tijekom plazma rezanja, brzina rezanja i kvaliteta rezanih površina značajno ovise o vrsti plazmenih i zaštitnih plinova koji se koriste u procesu. Pravilnim odabirom tehničkog plina ili kombinacije plinova, može se postići ravnoteža između ekonomske isplativosti i visoke kvalitete rezanja, pri čemu je također važno pravilno podesiti parametre rezanja. To uključuje jakost struje izvora, brzinu rezanja i udaljenost sapnice od radnog komada. Rezanje aluminijskog materijala plazmom nudi značajne prednosti u odnosu na lasersko rezanje, posebno kod većih debljina. Plazma rezanje također ima niže troškove opreme i operativne troškove, u odnosu na lasersko rezanje koje se ističe po preciznosti. Postupak statičkog vlačnog ispitivanja služi za utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava materijala. Glavna veličina koja se ispituje ovim postupkom je vlačna čvrstoća.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je plazma rezanje aluminijskog materijala EN AW 1050A pri različitim parametrima, zatim je provedeno statičko vlačno ispitivanje uzoraka te analiza istraživanja. Rezanje aluminijskog materijala je izvršeno pomoću zračne plazme s automatskim vođenjem korištenjem „Rail Bull“ automata. Tijekom postupka rezanja utvrđeno je da uz jakost struje od 20 A nije moguće postići potpuni rez za brzine veće od 70 cm/min. Povećanje jakosti struje na 25 A omogućilo je daljnje povećanje brzine rezanja. Izvođenje statičkog vlačnog ispitivanja provodilo se prema normi EN ISO 6892-1:2019. Međutim, bilo je potrebno djelomično izmijeniti oblik epruvete prema reznoj površini. Najprije je izvedeno ispitivanje početnog materijala na kidalici i zatim ispitivanje materijala koji se rezao plazmom. Analizom rezultata istraživanja utvrđeno je da plazma rezanje smanjuje vlačnu čvrstoću aluminijskog materijala, a taj zaključak je donesen uspoređujući rezultate početnih uzoraka s rezultatima uzoraka koji su rezani plazmom. Parametar brzine rezanja je imao veći utjecaj na vlačnu čvrstoću od parametra jakosti struje, no veća jakost struje istovremeno je omogućila povećanje brzine rezanja, pri čemu se postigla bolja vlačna čvrstoća.

8. Literatura

- [1] Nikola Jelić: Klasifikacija nepravilnosti pri toplinskom rezanju, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2017.
- [2] <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30498769/185895.pdf> (dostupno 3.8.2023.)
- [3] Antonio Arih: Utjecaj brzine rezanja i položaja žarišta na kvalitetu laserskog rezanja aluminijeve legure EN AW 5754, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin 2023.
- [4] Petra Mišković: Primjena visokonaponskog električnog pražnjenja pri inaktivaciji kvasca *Rhodotorula spp.*74, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2016.
- [5] <https://www.rapiddirect.com/blog/what-is-plasma-cutting/> (dostupno 4.8.2023.)
- [6] Matija Pintarić: Utjecaj parametara rezanja plazmom na kvalitetu rezne površine austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin 2023.
- [7] BOC: Facts about Plasma Technology, A Member of The Linde Group, časopis
- [8] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051> (dostupno 10.8.2023.)
- [9] Josip Mioč: Optimizacija parametara pri rezanju plazmom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [10] Luka Božićević: Plazma rezanje, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2017.
- [11] <https://www.hypertherm.com/en-US/resources/articles/guide-to-plasma-gas-selection/?region=NART> (dostupno 15.8.2023.)
- [12] <https://www.sino-welding.com/news/17368.html> (dostupno 22.8.2023.)
- [13] <https://torchmate.com/news/replacing-consumables> (dostupno 22.8.2023.)
- [14] <https://howtorobot.com/expert-insight/integrating-plasma-cutting-robots> (dostupno 22.8.2023.)
- [15] <https://espritautomation.com/plasma-cutting-aluminium/> (dostupno 23.8.2023.)
- [16] Matija Bušić: Suvremene proizvodne tehnologije, predavanje, Sveučilište Sjever, Varaždin 2021./2022.

- [17] Franz M., Ćorić D. : Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Predavanje, FSB, Zagreb 2016./2017.
- [18] H. Dizdar, B. Aydemir, C Vatan: Differences of Latest Versions of ISO 6892-1 and ASTM E8 Tensile Testing Standards, znanstveni članak
- [19] Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, Predavanje, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli 2019./2020.
- [20] <https://www.promotech.eu/en/product/rail-bull-welding-cutting-track-carriage-2/>
(dostupno 25.8.2023.)
- [21] Vlastita arhiva fotografija autora Alena Cepanca, snimljena 2023. godine.

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz plinskog rezanja	3
Slika 2. Shematski prikaz rezanja laserom	4
Slika 3. Agregatna stanja tvari	5
Slika 4. Preneseni i nepreneseni električni luk	6
Slika 5. Standardna metoda plazma rezanja	8
Slika 6. Plazma rezanje sa sekundarnim plinom	9
Slika 7. Podvodno plazma rezanje sa sekundarnim plinom	10
Slika 8. Zračno plazma rezanje	11
Slika 9. Plazma rezanje s injektiranom vodom	12
Slika 10. Rezanje plazmom pod vodenim štitom	12
Slika 11. Precizno rezanje plazmom	13
Slika 12. Strmo padajuća karakteristika	14
Slika 13. Karakteristika konstantne struje	14
Slika 14. Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala	15
Slika 15. Kretanje plazma rezača prilikom CNC upravljanog plazma rezanja.....	16
Slika 16. Izvor napajanja za plazma rezanje	21
Slika 17. Glavni dijelovi gorionika plazma rezača	22
Slika 18. Elektroda za plazma rezanje	23
Slika 19. Nova i istrošena sapnice	23
Slika 20. CNC sustav za plazma rezanje	24
Slika 21. Plazma rezanje robotom	25
Slika 22. Rezna površina aluminija za različite kombinacije plinova	27
Slika 23. Pravokutni uzorak za ispitivanje prema normi EN ISO 6892-1	28
Slika 24. Konvencionalni dijagram naprezanje σ - istezanje ε	30
Slika 25. Dijagram naprezanje - istezanje za različite materijale	32
Slika 26. Plazma uređaj Hypertherm Powermax 30 AIR	34
Slika 27. Rail bull automat	35
Slika 28. Dimenzije ispitnih uzoraka	36
Slika 29. Plazma rezanje rezanja ispitnih uzoraka.....	37
Slika 30. Djelomično izrezani uzorak	37
Slika 31. Dimenzije ispitne epruvete	38
Slika 32. Univerzalna kidalica „Inspekt blue 20“	39
Slika 33. Kidanje epruvete	39
Slika 34. Epruveta nakon kidanja	40
Slika 35. Dijagram naprezanje – pomak kidalice	41
Slika 36. Epruvete nakon ispitivanja	41

Popis tablica

Tablica 1. Plazmeni i zaštitni plinovi	20
Tablica 2. Parametri rezanja za aluminij	26
Tablica 3. Standardne dimenzije uzorka prema normi EN ISO 6892-1	28
Tablica 4. Kemijski sastav materijala	33
Tablica 5. Svojstva materijala	33
Tablica 6. Specifikacije uređaja Hypertherm Powermax 30 AIR	34
Tablica 7. Specifikacije Rail bull uređaja	35
Tablica 8. Parametri eksperimenta.....	36
Tablica 9. Svojstva osnovnog materijala	40
Tablica 10. Rezultati ispitnih uzoraka	41



IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Alen Cepanec (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću aluminijske legure EN AW 1050A (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

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

Alen Cepanec

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Alen Cepanec (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Utjecaj parametara plazma rezanja na vlačnu čvrstoću aluminijske legure EN AW 1050A (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

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

Alen Cepanec

(vlastoručni potpis)