

Usporedba plinskog rezanja u odnosu na rezanje abrazivnim vodenim mlazom i plazma rezanje

Martinović, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:190:270815>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**USPOREDBA PLINSKOG REZANJA U ODNOSU NA REZANJE
ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM I PLAZMA REZANJE**

Rijeka, rujan 2022.

Antonio Martinović
0069080435

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**USPOREDBA PLINSKOG REZANJA U ODNOSU NA REZANJE
ABRAZIVNIM VODENIM MLAZOM I PLAZMA REZANJE**

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

Rijeka, rujan 2022.

Antonio Martinović
0069080435

Rijeka, 15. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Antonio Martinović (0069080435)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Usporedba plinskog rezanja u odnosu na rezanje abrazivnim vodenim mlazom i plazma rezanje / Comparison of gas cutting versus abrasive water jet cutting and plasma cutting**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu treba opisati principe rada, elemente obradnih sustava te prednosti i nedostatke plinskog rezanja, rezanja abrazivnim vodenim mlazom i plazma rezanja. Konstruirati testni radni komad koji će se rezati prethodno navedenim postupcima. Odrediti putanje kretanja (ulaz mlaza i izlaz) i svih ostalih parametara rezanja uz pomoć CAD/CAM softvera EnRoute. Provjeriti program na upravljačkoj jedinici CNC stroja. Izmjeriti hrapavost odreza i izračunati trošak, vrijeme, volumen odnesenog materijala u jedinici vremena i sve ostale bitne parametre za sva tri postupka. Na temelju izmjerene hrapavosti odreza i izračunatih podataka rangirati postupke.

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

Antonio Martinović

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Goran Cukor

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Ovim putem izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i dobiveno znanje tijekom studiranja na Tehničkom fakultetu, Sveučilišta u Rijeci pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Gorana Cukora.

ZAHVALA

Ovim putem zahvaljujem se prof. dr. sc. Goranu Cukoru na prihvaćenom zahtjevu mentorstva, izdvojenom vremenu i savjetima pri izradi rada.

Zahvaljujem se zaposlenicima tvrtke MIPEK d.o.o. na nesebičnim savjetima i pruženoj pomoći pri programiranju i izradi testnog dijela, posebice direktoru Mariu Peteku, poslovođi Josipu Đereku, CNC operateru Stjepanu Biri, te glavnom inženjeru Nikoli Blažinoviću, koji su mi osigurali materijal i sva sredstva potrebna za izradu praktičnog dijela rada.

Također zahvaljujem se i svojoj obitelji na konstantnoj podršci tijekom svih godina studiranja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ NEKONVENCIONALNIH PROIZVODNIH POSTUPAKA	2
2.1. Klasifikacija nekonvencionalnih proizvodnih postupaka	3
3. ABRAZIVNI VODENI MLAZ (AWJM).....	4
3.1. Obradni sustav (AWJM)	8
3.2. Odnosenje materijala i parametri obrade	9
3.3. Prednosti i nedostaci obrade abrazivnim vodenim mlazom.....	10
4. OBRADA MLAZOM PLAZME (PBM)	11
4.1. Postupci plazma rezanja	14
4.1.1. Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija.....	14
4.1.2. Plazma rezanje uz pomoć suženog luka	16
4.1.3. Plazma rezanje uz prisutnost sekundarnog medija.....	16
4.2. Plazma rezanje nehrđajućih čelika	18
4.3. Obradni sustav	21
4.3.1. Plazmeni plinovi.....	21
4.3.2. Plazmeni gorionik	22
4.4. Odnosenje materijala i parametri obrade	23
4.5. Prednosti i nedostaci obrade mlazom plazme	23
5. OBRADA MLAZOM PLINA	25
5.1. Vrste plinova	29
5.1.1. MAPP	29
5.1.2. Acetilen	29
5.1.3. Propan.....	30
5.1.4. LPG (Tekući naftni plin)	31
5.1.5. Prirodni plin.....	31
5.2. Mlaznice za rezanje	31
5.3. Utjecajni parametri na kvalitetu odreza	33
5.4. Prednosti i nedostaci.....	33
6. KONSTRUKCIJA TESTNOG UZORKA I IZRADA PROGRAMA ZA REZANJE	35
6.1. Konstrukcija testnog uzorka.....	35
6.2. Odabir materijala za testni uzorak.....	35
6.3. Izrada programa u softverskom programu EnRoute	36
6.3.1. Izrada programa za plazma rezanje	37
6.3.2. Izrada programa za plinsko rezanje.....	47

6.3.3. Izrada programa za rezanje uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza (AWJM)	49
7. PROCES REZANJA TESTNOG UZORKA I USPOREDBA POSTUPAKA	51
7.1. Izrada testnog uzorka uz pomoć mlaza plazme.....	51
7.1.1. Izračuni za proces plazma rezanja.....	56
7.1.2. Mjerenje hrapavosti (plazma rezanje)	58
7.2. Izrada testnog uzorka uz pomoć mlaza plina	60
7.2.1. Izračuni za proces plinskog rezanja	64
7.2.2. Mjerenje hrapavosti (plinsko rezanje).....	66
7.3. Izrada testnog uzorka uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza.....	66
7.3.1. Izračuni za proces rezanja uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza.....	73
7.3.2. Mjerenje hrapavosti (AWJM)	74
8. ZAKLJUČAK	76
LITERATURA.....	77
POPIS SLIKA	79
POPIS TABLICA.....	82
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLLESKOM JEZIKU	83
PRILOZI.....	84

1. UVOD

Proizvodnja predstavlja primjenu fizikalnih i kemijskih procesa za promjenu svojstava, geometrije, izgleda nekog zadanog početnog materijala u svrhu izrade proizvoda. Gotovo se uvijek izvodi kao slijed operacija.

Najveći uzlet nekonvencionalnih postupaka obrade dogodio se nakon drugog svjetskog rata zahvaljujući naglom razvoju elektroničke i zrakoplovne industrije.

Uz pomoć nekonvencionalnih proizvodnih postupaka omogućena je obrada novih, teško obradivih materijala, stvaranje kompleksnih oblika, te postizanje strogih konstrukcijskih zahtjeva. Za razliku od konvencionalnih postupaka obrade koji za obradu koriste oštre i tvrde alate kako bi uz pomoć mehaničkih metoda odvojile čestice materijala s obratka, kod nekonvencionalnih postupaka ne koriste se nikakvi oštri i tvrdi alati, već određenom energijom odnose višak materijala.

U ovom diplomskom radu prikazati će se osnovne karakteristike i podjele nekonvencionalnih proizvodnih postupaka s posebnim osvrtom na abrazivni vodeni mlaz, rezanje mlazom plazme, te autogeno/plinsko rezanje. Nakon toga prikazati će se i navesti bitne karakteristike alatnih strojeva na kojima će se sprovesti praktični dio rada.

U drugom poglavlju navesti će se povijesni razvoj nekonvencionalnih proizvodnih postupaka, zatim će se unutar trećeg poglavlja detaljnije objasniti abrazivni vodeni mlaz, slijedi objašnjenje plazma, te plinskog/autogenog postupka obrade odvajanjem čestica u četvrtom i petom poglavlju.

Nakon objašnjenih postupaka, unutar šestog poglavlja izvršiti će se konstruiranje testnog uzorka te će se prikazati detaljan proces programiranja za sva tri nekonvencionalna postupka obrade odvajanjem čestica u softverskom programu *EnRoute*.

U sedmom poglavlju prikazati će se rezanje testnog uzorka, izračun parametara zadanih u zadatku i ukupnog troška izrade za sva tri postupka pojedinačno, te mjerenje hrapavosti.

Na kraju u zaključku će se navesti koji postupak je najoptimalniji s obzirom na trošak, kvalitetu odreza i vrijeme izrade.

2. POVIJESNI RAZVOJ NEKONVENCIONALNIH PROIZVODNIH POSTUPAKA

Nekonvencionalni/aditivni proizvodni postupci obrade odvajanjem čestica ne mogu zamijeniti konvencionalne proizvodne postupke obrade odvajanjem čestica, već se koriste u slučaju kada je nemoguće koristiti konvencionalne postupke. [1]

Kod nekonvencionalnih proizvodnih postupaka oprema koja se koristi je skuplja i kompliciranija u odnosu na konvencionalne proizvodne postupke, također volumen odnesenog materijala u jedinici vremena je manji kod nekonvencionalnih postupaka. [1]

Neke od karakteristika:

- Kontakt između alata i obratka ne postoji, pa samim time nema nikakvih mehaničkih sila
- Na proizvodnost obrade ne utječu mehanička svojstva obratka (npr. čvrstoća, tvrdoća), ali utječu fizikalna svojstva (npr. toplinska vodljivost obratka)
- Alat koji se primjenjuje za obradu nije tvrđi od obratka
- Kod nekonvencionalnih proizvodnih postupaka ne koristi se nužno mehanička energija u procesu odnošenja materijala već se koriste različite vrste energije (npr. kod elektroerozijske obrade koristi se toplinska energija za odnošenje materijala)
- Kod nekonvencionalnih proizvodnih postupaka ne mora biti prisutan fizički alat [2]

Prednosti nekonvencionalnih u odnosu na konvencionalne proizvodne postupke:

- Budući da nema međusobnog kontakta između alata i obratka, tako i tvrdoća alata nema nikakvog utjecaja na proces rezanja/obrade
- Mogućnost završne obrade složenih oblika uz visoku kvalitetu obrađene površine u vrlo tvrdim materijalima
- Oprema koja se koristi u procesu rezanja, često je izložena relativno umjerenim i jednostavnim kinematičkim gibanjima
- Obrada širokog spektra nemetalnih i metalnih materijala bez obzira na njihovu tvrdoću, čvrstoću i krutost
- Završna obrada šupljina, te mikro rupa [1]

Osnovna definicija nekonvencionalnih proizvodnih postupaka – grupa postupaka koji primjenom kemijske, mehaničke, toplinske i elektrokemijske energije odnose višak materijala pri čemu ne

koriste rezni alat i njegov fizički kontakt s obratkom kao što je slučaj kod konvencionalnih proizvodnih postupaka. [1]

Upravo zbog odsustva fizičkog kontakta između alata i obratka, ovi postupci se karakteriziraju netradicionalnim (nekonvencionalnim). [1]

2.1. Klasifikacija nekonvencionalnih proizvodnih postupaka

Nekonvencionalni proizvodni postupci često se klasificiraju prema vrsti energije koja se koristi u procesu odnošenja materijala:

1. Mehanički postupci

- AJM – obrada abrazivnim mlazom
- USM – obrada ultrazvukom
- WJM – obrada vodenim mlazom
- AWJM – obrada abrazivnim vodenim mlazom
- IJM – obrada ledenim mlazom

2. Toplinski postupci

- PBM – obrada mlazom plazme
- IBM – obrada ionskim snopom
- EBM – obrada elektronskim snopom
- LBM – obrada laserskim snopom
- EDM – elektroerozijska obrada

3. Kemijski postupci

- CHM – kemijska obrada
- PCM – fotokemijska obrada

4. Elektrokemijski postupci

- ECM – elektrokemijska obrada
- ECJM – elektrokemijska obrada uz pomoć mlaza
- STEM – elektrolitska obrada uz pomoć posebno oblikovane cijevi [1]

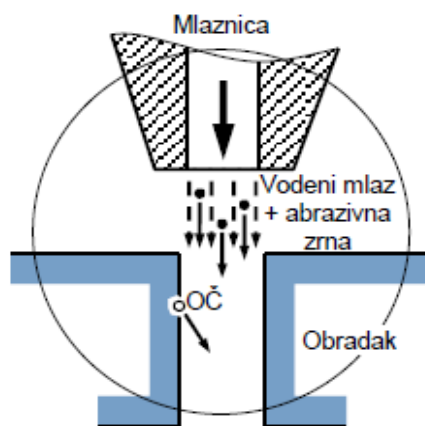
3. ABRAZIVNI VODENI MLAZ (AWJM)

Spada u grupu mehaničkih postupaka gdje se odnošenje materijala u procesu rezanja odvija uz pomoć mehaničke energije.

Obrada vodenim mlazom (WJM) je pogodna za rezanje plastike, hrane, gumenih izolacija i mnogih tekstila. Tvrđi materijali kao što su staklo, beton, keramika i čvrsti kompoziti mogu se rezati samo ako se izvrši dodavanje abraziva u vodeni mlaz, pri čemu nastaje abrazivni vodeni mlaz (AWJM). [3]

Takav postupak prvi put je upotrebljen 1974. godine za čišćenje metala prije površinskih obrada. Dodavanjem abrazivnih zrna u vodeni mlaz dovelo je do povećanja brzine uklanjanja materijala i povećanja brzine rezanja koja se kretala u rasponu od 51 do 460 mm/min. [3]

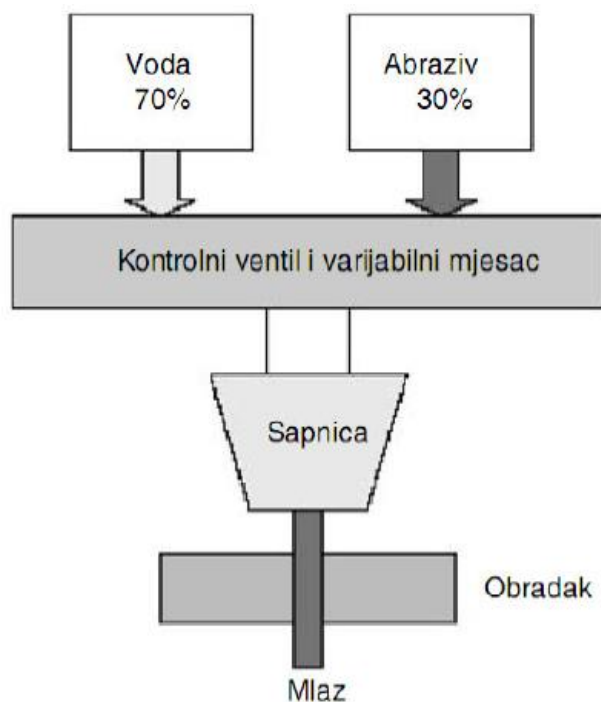
Kod obrade abrazivnim vodenim mlazom, materijal se odnosi erozivnim djelovanjem abrazivnih zrna nošenih u vodenom mlazu, te fokusiranih na površinu obratka. Spada u grupu hibridnih postupaka budući da se radi o integraciji postupaka obrade vodenim mlazom i abrazivnim mlazom. Dodatak koji se dodaje vodenom mlazu (abraziv) omogućava obradu širokog spektra materijala uz istodobno povećanje brzine odstranjivanja/skidanja materijala. [1]



Slika 3.1. AWJM [4]

Prilikom rezanja kompozitnih materijala, AWJM je čak 10 puta brži u odnosu na konvencionalne proizvodne postupke. Kinetička energija abraziva u mlazu određuje brzinu odstranjivanja materijala. U odnosu na AJM postiže se veće ubrzanje, pa samim time veća brzina i erozijsko djelovanje abrazivnih zrna. [1]

Elementi abrazivnog vodenog mlaza (AWJM) prikazani su na slici 3.2.

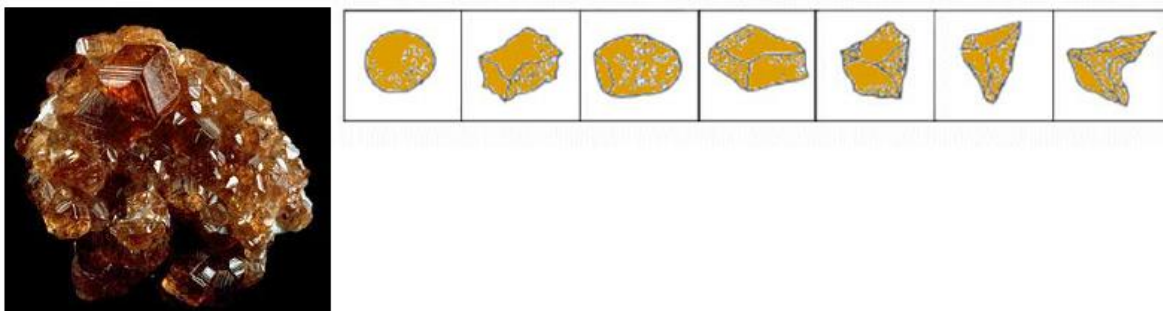


Slika 3.2. Elementi AWJM [3]

Općeniti materijali koji se koriste kao abrazivna zrna su:

- Korund
- Staklene kuglice
- Silikon karbidi

Njihova granulacija se kreće od 10 do 150 μm . Neravnine širine 0,02 mm i visine 0,35 mm preostale u čeličnoj komponenti nakon operacije brušenja uklanjaju se uz pomoć erozivnog učinka abrazivnih zrna, dok voda djeluje kao nosač abrazivnih zrna koji prigušuje, pritiskuje njihov utjecaj na površinu obrade. [3]

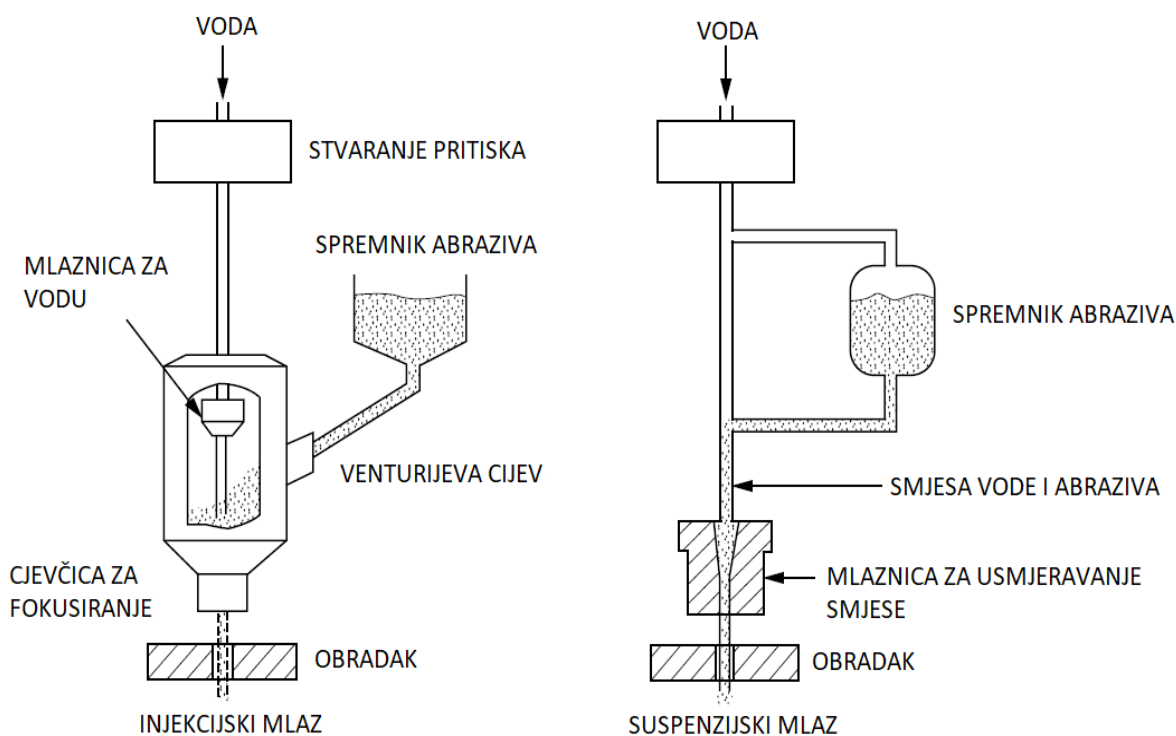


Slika 3.3. Strukture materijala abrazivnih zrna [4]

Dodavanjem komprimiranog zraka u mlaz vode dovodi do boljeg odmašćivanja. [3]

Načini stvaranja abrazivnog vodenog mlaza:

- Injekcijski
- Suspenzijski [4]



Slika 3.4. Injekcijski i suspenzijski načini stvaranja AWJM [3]

Abrazivni vodeni mlaz koristi nizak tlak od 4,2 bara za ubrzavanje velikog volumena vode (70%) i abrazivnih zrna (30%). Da bi se postigao efektivni postupak obrade odvajanjem čestica, nužno je voditi računa o pet bitnih značajki:

- Brzina mlaza određuje sposobnost rezanja
- Jednako kvalitetan rez duž cijelog obratka omogućen je preko vremenski neovisne jednolike strukture mlaza
- Optimalna razina učinkovitosti određena je preko omjera abraziva i vode
- Koherentnost mlaza određuje kvalitetu reza i oblik početka reza
- Sposobnost rezanja u različitim smjerovima određena preko simetrije rotacijskog mlaza [5]

Glavne prednosti ovog procesa u odnosu na obradu vodenim mlazom su:

- Brzina rezanja je za oko 40 puta veća
- Površinska hrapavost je za 30% manja [5]

Glavna prednost kod AWJM obradnog sustava je mogućnost nagibanja mlaznice (Slika 3.5.) te povećanje produktivnosti radom s više mlaznica istovremeno (Slika 3.6.).



Slika 3.5. Nagibanje mlaznice [6]

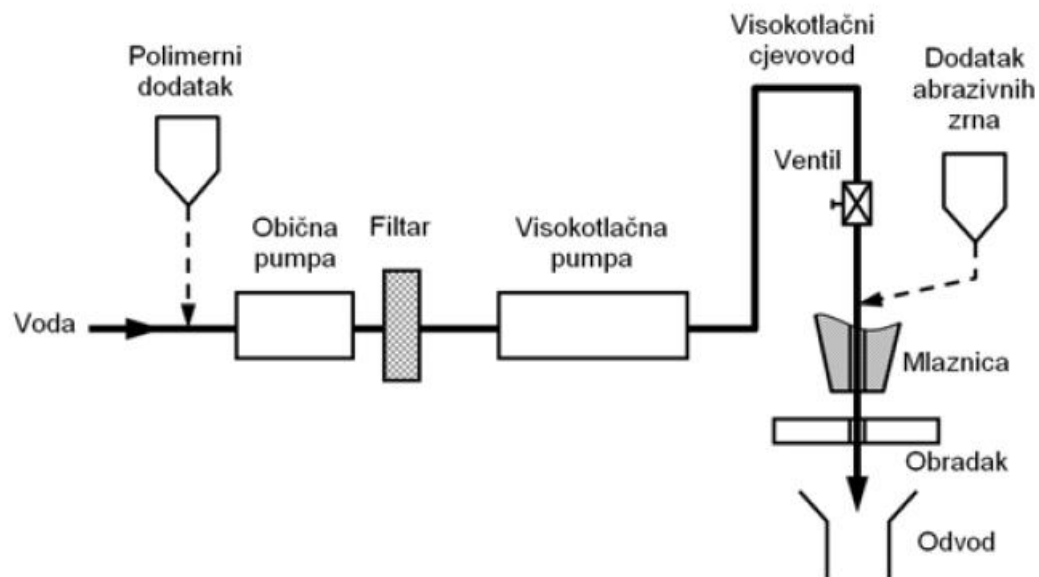


Slika 3.6. Rad s više mlaznica istovremeno [4]

3.1. Obradni sustav (AWJM)

Obradni sustav abrazivnog vodenog mlaza (AWJM) prikazan na slici 3.7. sastoji se od sljedećih elemenata:

- Dovod vode
- Polimerni dodatak
- Obična pumpa
- Filtar
- Visokotlačna pumpa
- Visokotlačni cjevovod
- Ventil
- Dodatak abrazivnih zrna
- Mlaznica
- Obradak
- Odvod [3]

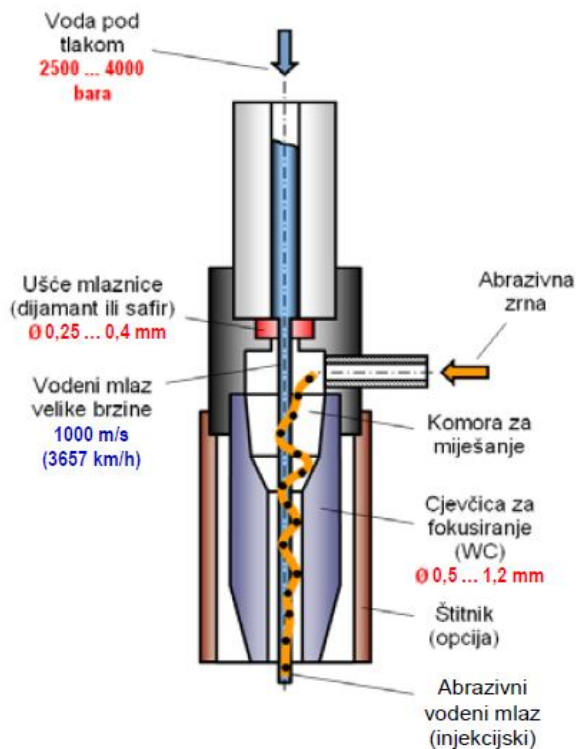


Slika 3.7. Obradni sustav (AWJM) [4]

Polimerni dodatak povećava koherenciju vode na izlazu iz mlaznice. [4]

Glavni element obradnog sustava je mlaznica koja usmjerava mlaz prema površini obratka. U nju ulazi voda pod tlakom od 2500 do 4000 bar – a, abrazivna zrna dodaju se nakon ušća mlaznice promjera 0,25 do 0,4 mm. U komori za miješanje dolazi do stapanja vodenog mlaza i abrazivnih zrna, takav mlaz se usmjerava prema izlazu uz pomoć cjevčice za fokusiranje promjera 0,5 do 1,2

mm. Na izlazu se dobiva abrazivni vodeni mlaz (injekcijski). Prethodno objašnjeno prikazano je na sljedećoj slici.



Slika 3.8. Mlaznica (AWJM) [4]

3.2. Odnosnje materijala i parametri obrade

Najčešći utjecajni parametri na volumen odnesenog materijala u jedinici vremena (V_{MRR}) su:

- Kut rezanja ϕ [°]
- Posmična brzina v_f [mm/min]
- Dubina penetracije, odnosno rezanja h_t [mm]
- Kvaliteta vode
- Tlak vode p_v [Pa]
- Promjer fokusirajuće cjevčice d_f [mm]
- Promjer ušća mlaznice d_o [mm]
- Karakteristike i vrsta abrazivnih zrna
- Udaljenost/zazor između vrha mlaznice i obratka s_{od} [mm]
- Maseni protok abrazivnih zrna \dot{m}_g [kg/s] [4]

Primjena AWJM je česta za rezanje metala (Cu, Pb, Mo, Al, W, Ti), granita, mramora, akrilika, stakla, betona, karbida, keramika, vlaknima armirane plastike i kompozita.

3.3. Prednosti i nedostaci obrade abrazivnim vodenim mlazom

AWJM posjeduje niz prednosti, ali i nedostataka zbog svoje abrazivnosti. Prednosti su:

- ◆ Brzina rezanja se povećala za 10 do 50 puta
- ◆ Postizanje veće kvalitete obrađene površine
- ◆ Mogućnost rezanja tvrdih i teško obradivih materijala
- ◆ Potreban znatno niži tlak vode [4]

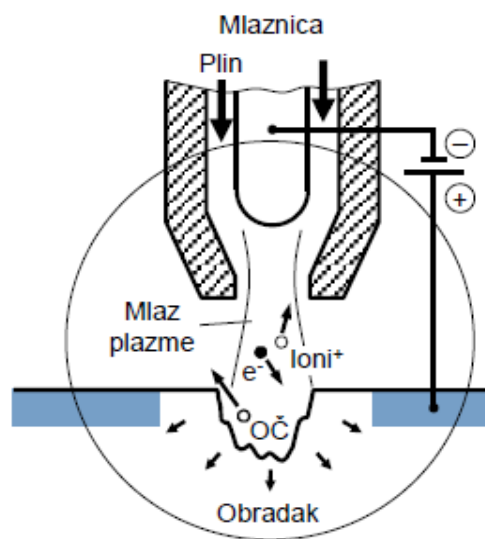
Nedostaci u odnosu na obradu vodenim mlazom (WJM):

- ◆ Ekologija (štetno za okoliš)
- ◆ Povećano trošenje strojnih dijelova/elemenata zbog abrazivnih zrna [4]

4. OBRADA MLAZOM PLAZME (PBM)

Plazma predstavlja visokoionizirani i disocirani plin koji se sastoji od slobodnih elektrona, pozitivno nabijenih iona i neutralnih atoma.

Obrada mlazom plazme (PBM) spada u toplinske postupke obrade odvajanjem čestica kod kojih se materijal odnosi ionizacijom plina (tlačenjem plina kroz električni luk) pri čemu nastaje mlaz plazme koji prolazi nadzvučnom brzinom kroz mlaznicu, te uslijed vrlo visoke temperature lokalno tali i isparuje materijal obratka (Slika 4.1.). [7]



Slika 4.1. PBM [7]

Primjena plazma luka u obradi materijala:

- Žlijebljenje
- Rezanje
- Tokarenje
- Modificiranje površine
- Zavarivanje
- Zagrijavanje teško obradivih materijala za kasniju konvencionalnu obradu u toplom stanju
- Toplinsko – kemijske obrade
- Površinsko toplinske obrade [7]



Slika 4.2. Obrada mlazom plazme (PBM) [8]

Kada se temperatura plina povisi na oko 2000 °C, dolazi do disociranja molekula plina na zasebne/pojedinačne atome. Pri višim temperaturama, oko 30 000 °C, ti zasebni atomi postaju ionizirani. Plin u takvoj fazi naziva se plazma. Usvojena je obrada plazmom ranih 1950 – tih, kao alternativna metoda za plinsko rezanje plamenom kisika nehrđajućeg čelika, ali i drugih obojenih metala. [9]

U to vrijeme postojala su ograničenja procesa u pogledu vrlo niske brzine rezanja, loše kvalitete obrade, te nepouzdanosti opreme. [9]

Rezanje uz pomoć plazme je u današnje vrijeme vrlo popularno zbog svoje jednostavne primjene i efikasnosti, pri čemu se postiže odgovarajuća kvaliteta rezne površine. Rezanje uz pomoć plazme u kombinaciji s CNC tehnologijom osigurava provedbu i najzahtjevnijih rezova. [10]

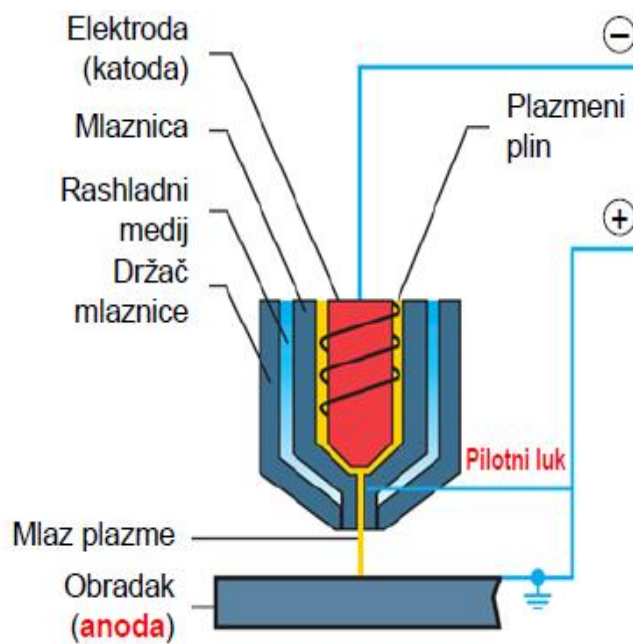
Vrlo važna značajka u obradi plazma snopom (PBM) je da je to jedina proizvodna metoda koja radi brže u nehrđajućem čeliku nego u mekom čeliku. Prilikom obrade stvara se kontinuirani luk između vruće volframove katode i vodom hlađene bakrene anode. Oko volframove katode se pušta plin koji teče kroz anodu. Temperatura oko katode doseže 28 000 °C, te dolazi do stvaranja visokotemperaturnog plazma luka. Pod navedenim uvjetima, dolazi do brzog rastapanja i isparavanja metala koji se obrađuje. [9]



Slika 4.3. Rezanje metala plazma lukom [11]

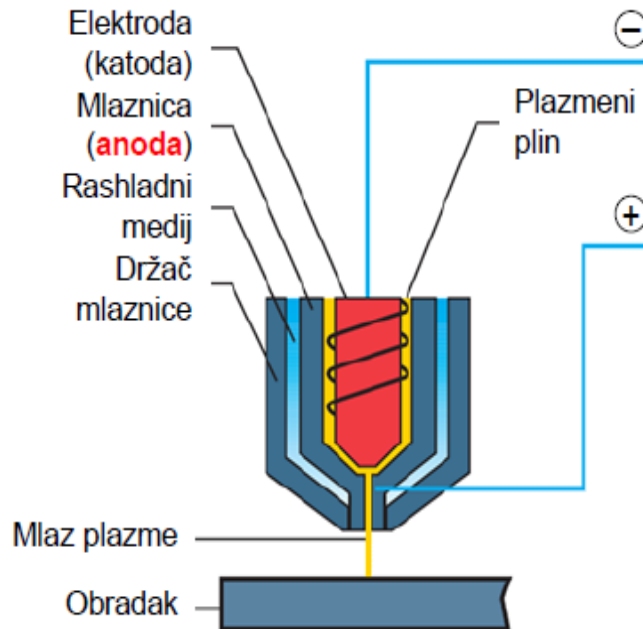
Vrste električnog luka uz pomoć kojih se stvara plazma:

- ◆ Prenosivi luk (Slika 4.4.)
 - dostizanje temperature do oko 33 000 °C
 - koristi se samo za električki provodljive materijale [7]



Slika 4.4. Prenosivi luk [7]

- ◆ Neprenosivi luk (Slika 4.5.)
 - dostizanje temperature do oko 16 000 °C
 - koristi se i za električki neprovodljive materijale [7]



Slika 4.5. Neprenosivi luk [7]

Prenosivi luk se koristi za obradu rezanjem, dok se neprenosivi luk koristi u procesu zavarivanja metala.

4.1. Postupci plazma rezanja

Postupci rezanja plazmom dijele se na:

- Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija
- Plazma rezanje uz pomoć suženog luka
- Plazma rezanje uz prisutnost sekundarnog medija [10]

4.1.1. Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija

Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija se u velikoj mjeri koristi za sljedeće:

- Ručno rezanje (Slika 4.6.)
- Rezanje manjeg broja komponenti
- Rezanje limova malih debljina

- Žlijebljenje
- Niže potrebna kvaliteta reza

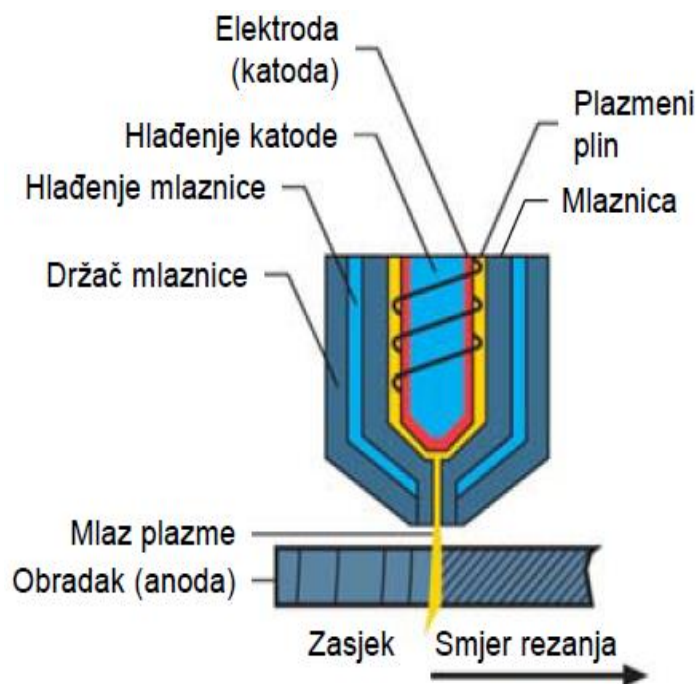


Slika 4.6. Ručno rezanje plazmom [12]

Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija, odnosno pomoćnog plina sve češće se primjenjuje u brodogradnji gdje proces rezanja prethodi procesu zavarivanja. Također primjenjuje se i kod automatiziranih/robotiziranih procesa rezanja profila. Često se primjenjuje i u kombinaciji s CNC tehnologijom. [10]

Najvažnija karakteristika ovakvog postupka plazma rezanja je upotreba samo jednog plina koji posjeduje dvojaku ulogu (rezanje i hlađenje). Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija se koristi za rezanje metala maksimalne debljine do 16 mm. Još se naziva i zračna plazma jer se kao plazmeni plin koristi komprimirani zrak. [10]

Nedostaci ovakvog postupka su brza erozija elektrode, te pojava oksidiranih površina prilikom rezanja nehrđajućeg čelika ili aluminija. [10]



Slika 4.7. Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija [7]

4.1.2. Plazma rezanje uz pomoć suženog luka

Ovaj postupak se naziva još i plazma rezanje s injektiranom vodom, jer se voda ubrizgava radijalno/vrtložno, pri čemu dolazi do sužavanja luka, a ujedno voda služi i za hlađenje. Sužavanjem luka dolazi do naglog povećanja gustoće plazme. [10]

U procesu stvaranja plazme koristi se dušik, međutim često se koriste i drugi jeftiniji plinovi koji ne umanjuju kvalitetu odreza. Ovaj postupak se koristi za rezanje metala u slučajevima kada se zahtjeva izrazito visoka kvaliteta reza. [10]

4.1.3. Plazma rezanje uz prisutnost sekundarnog medija

Koristi se u velikoj mjeri za sljedeće:

- Početak plazma rezanja
- Bušenje metala
- Za postizanje visoke kvalitete reza
- Plazma rezanje rešetki
- Podvodno plazma rezanje (Slika 4.8.)

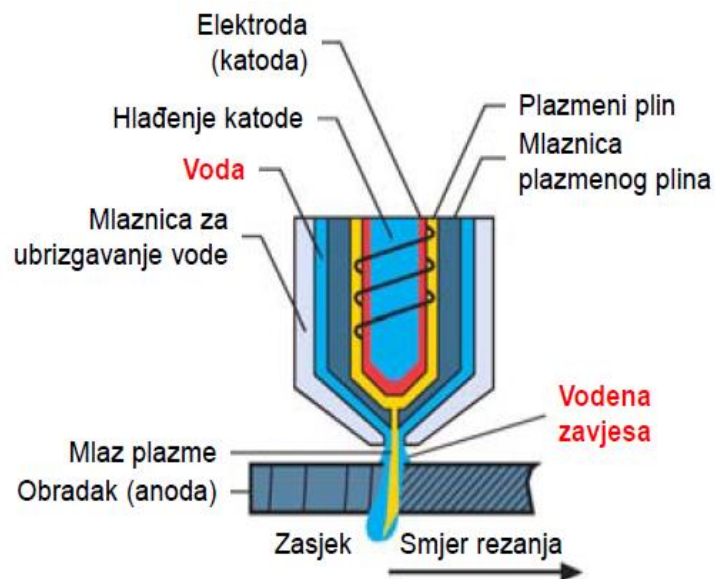


Slika 4.8. Podvodno plazma rezanje [10]

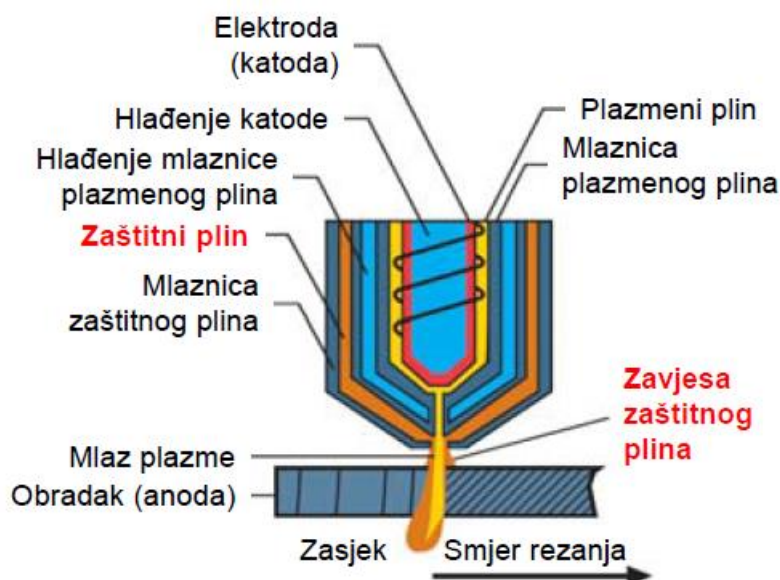
Kod ovog postupka posebna sapnica služi za dovođenje rotirajućeg plina, čija je glavna uloga zaštita plazmenog plina od štetnih utjecaja iz atmosfere. Uloga zaštitnog medija je u najvećoj mjeri zaštita plazmenog luka, hlađenje mlaznice, povećanje kvalitete odreza, te ispuhivanje taljevine.

Postoje dvije varijante zaštite plazmenog luka:

- Zaštita plazmenog luka uz pomoć vode (Slika 4.9.)
- Zaštita plazmenog luka uz pomoć plina (Slika 4.10.) [7]



Slika 4.9. Zaštita plazmenog luka uz pomoć vode [7]

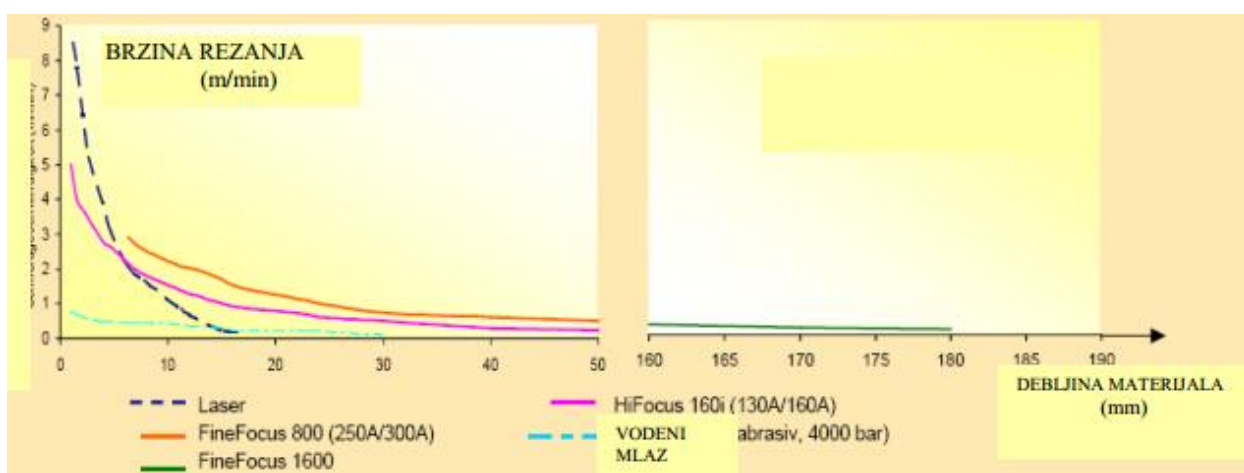


Slika 4.10. Zaštita plazmenog luka uz pomoć plina [7]

Budući da je plazmeni plin zaštićen, ovakav postupak je idealan za podvodno rezanje. [10]

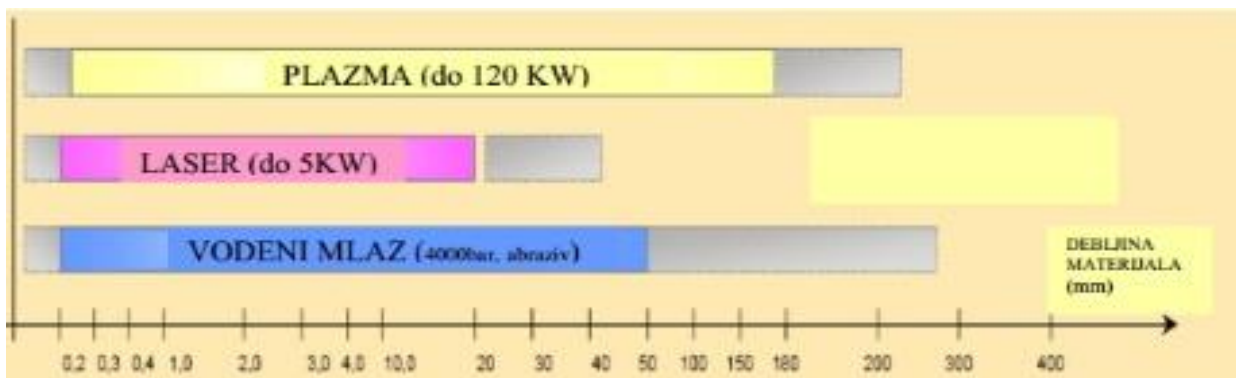
4.2. Plazma rezanje nehrđajućih čelika

U današnje vrijeme sve više je prisutno plazma rezanje nehrđajućih čelika. Kod rezanja najtanjih limova do 6 mm najbrže rezanje se ostvaruje laserom. Plazma rezanje je brže već od debljine od 7 mm, a ovisno o izvoru zadovoljavajuće brzo reže i do debljina od čak 50 mm, a kada se koristi gorionik *FineFocus1600* do debljine od čak 180 mm. [13]

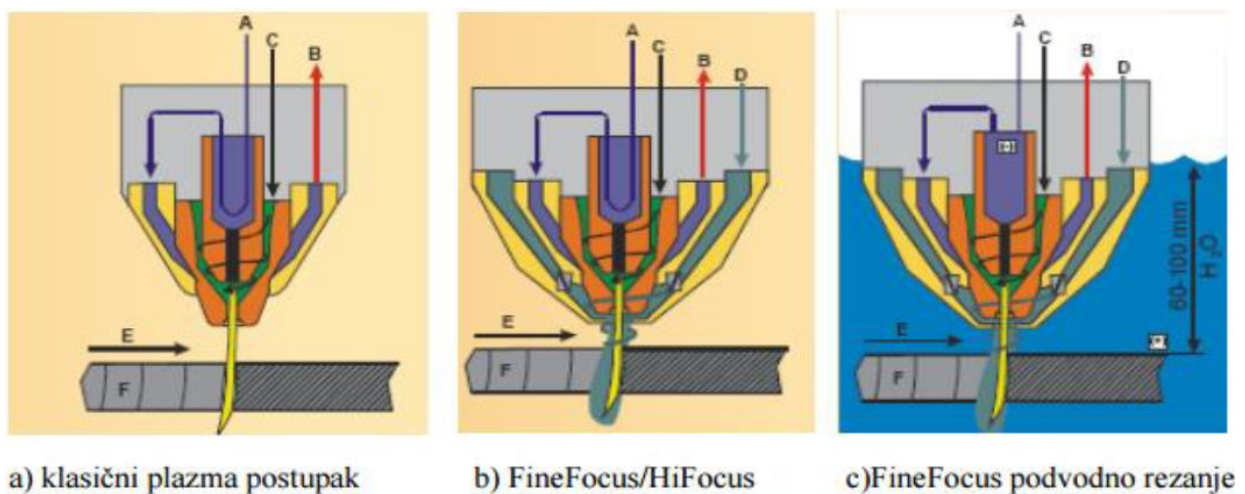


Slika 4.11. Brzine rezanja nehrđajućeg čelika različitim postupcima [13]

Debljine nehrđajućeg čelika koje pojedini postupci mogu rezati prikazane su na sljedećoj slici.



Slika 4.12. Ograničene debljine rezanja nehrđajućeg čelika [13]



Slika 4.13. Varijante plazma rezanja Cr-Ni čelika (nehrđajućeg čelika) [13]

Slika 4.13. sadrži sljedeće oznake:

- A** – Dovod rashladnog medija (vode)
- B** – Odvod rashladnog medija (vode)
- C** – Dovod plazmenog plina
- D** – Dovod plina za vrtloženje
- E** – Smjer rezanja
- F** – Površina odreza

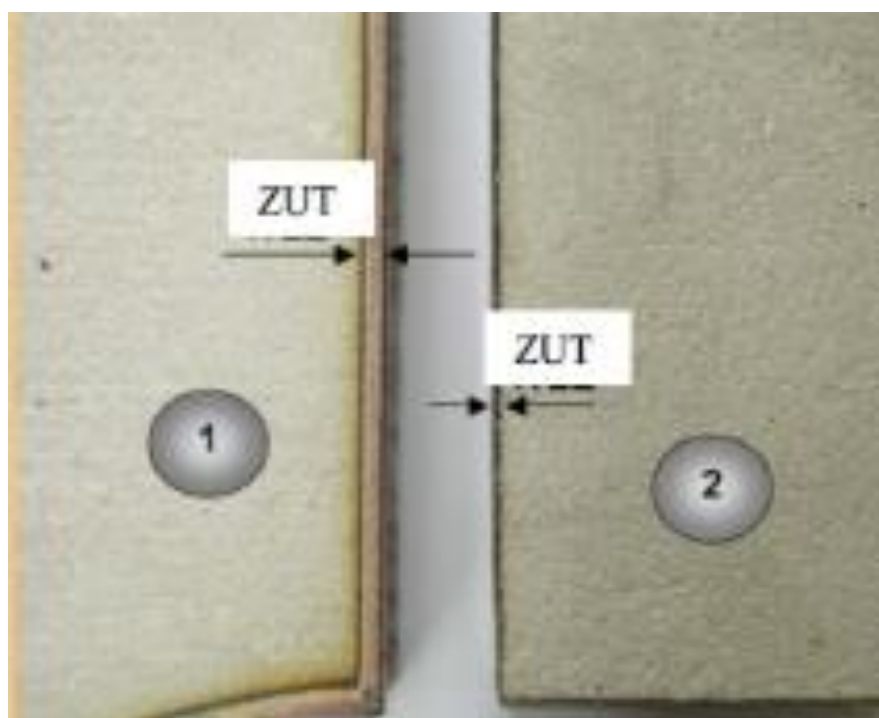
Slika 4.13. prikazuje građu gorionika i čimbenika koji stvaraju plazmeni luk te osiguravaju njegovu zaštitnu atmosferu, a u konačnici utječu na kvalitetu reza i svojstva samog rezanja.

Na slici 4.13. pod a) se nalazi klasičan postupak plazma rezanja, kod kojeg se plazmeni luk ostvaruje preko plazmenih plinova, a gorionik se hladi uz pomoć vode (rashladnog medija). Na slici 4.13. pod b) je prikazan *FineFocus/HiFocus* gorionik, pri čemu se plazmeni luk također

ostvaruje preko plazmenih plinova, no brzina rezanja i stabilnost plazmenog luka se poboljšavaju uz pomoć vrtložnih plinova. Gorionik se također hladi vodom. [14]

Na slici 4.13. pod c) se nalazi *FineFocus/Hifocus* gorionik pod vodom, odnosno njegova primjena pod vodom. Kod takvog postupka rezanja, čelna strana obratka se potapa na dubinu od 60 do 100 mm vode. Podvodno rezanje osigurava niz prednosti, kao što su smanjenje buke i prašine, te zaštita operatera od mogućeg zračenja. [14]

Podvodno rezanje je jeftinije u odnosu na klasični postupak rezanja plazmenim lukom, manji je unos topline u materijal koji je osjetljiv na toplinu, a shodno tome dolazi do stvaranja manje zone utjecaja topline (Slika 4.14.). [14]



Slika 4.14. Zona utjecaja topline [13]

Oznake na slici 4.14.:

ZUT – Zona utjecaja topline

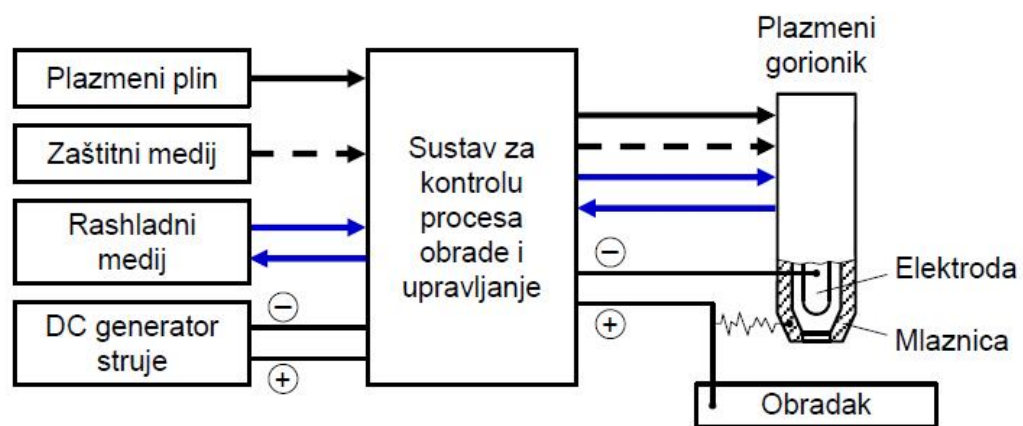
1 – Zona utjecaja topline kod klasičnog plazma rezanja

2 – Zona utjecaja topline kod podvodnog plazma rezanja

4.3. Obradni sustav

Obradni sustav PBM – a sastoji se od sljedećih elemenata:

- Generator istosmjerne struje (izvor)
- Plazmeni gorionik
- Sustav za dovod plazmenog plina
- Sustav za kontroliranje samog procesa obrade te njegovo upravljanje
- Sustav za dovod zaštitnog medija
- Sustav za dovod sredstva za hlađenje [7]



Slika 4.15. Obradni sustav (PBM) [7]

4.3.1. Plazmeni plinovi

U današnje vrijeme najčešće korišteni plazmeni plinovi su: Ar, N_2 , H_2 , O_2 , zrak. Korelacija fizikalnih svojstava plazmenih plinova prikazana je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Korelacija fizikalnih svojstava kod različitih plazmenih plinova [7]

FIZIKALNA SVOJSTVA	Ar	N ₂	O ₂	H ₂	zrak
Atomska masa	40	14	16	1	28,97
Gustoća	1,784	1,251	1,429	0,09	1,225
Koef. toplinske vodljivosti	16,6	24,5	24,7	168	24,5
Energija ionizacije	15,8	14,5	13,6	13,6	34

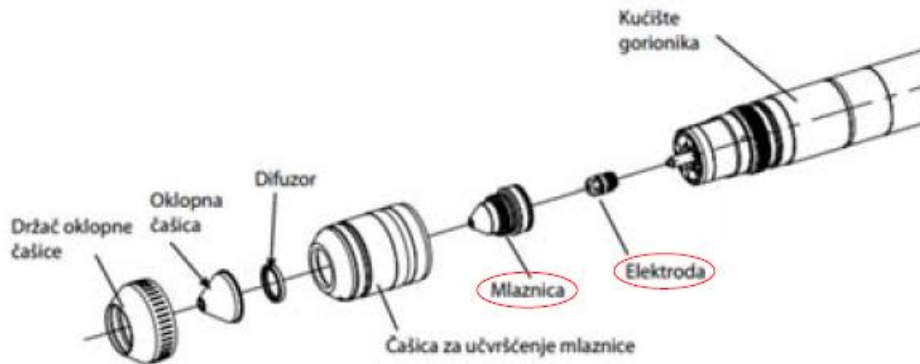
4.3.2. Plazmeni gorionik

Plazmeni gorionik sastoji se od:

- ◆ Mlaznice – izrađuje se od bakra (Cu)
- ◆ Elektrode – izrađuje se od volframa (W)



Slika 4.16. Plazmeni gorionik [15]



Slika 4.17. Dijelovi plazmenog gorionika [7]

Cijena se kreće od 0,7 do 1,1 \$ po komadu, pri čemu je optimalni paket od minimalno 100 komada. [15]

4.4. Odnosnje materijala i parametri obrade

Najčešći utjecajni parametri na volumen odnesenog materijala u jedinici vremena su [7]:

- Materijal obratka – fizikalna svojstva
- Snaga P [W]
- Brzina rezanja v_c [m/s]
- Udaljenost između obratka i plazmenog gorionika (radni zazor) s_{od} [m]
- Protok i vrsta plazmenog plina Q_p [m³/s]

4.5. Prednosti i nedostaci obrade mlazom plazme

Prednosti obrade mlazom plazme su:

- ◆ Relativno brz postupak
- ◆ Vrlo velik unos topline na malu površinu
- ◆ Zona utjecaja topline vrlo uska
- ◆ Neznatno savijanje obratka prilikom rezanja
- ◆ Mogućnost rezanja svih električki provodljivih materijala
- ◆ Ne dolazi do trošenja i loma alata
- ◆ Potrebno manje energije
- ◆ Ne zahtjeva izlaganje radnika štetnim kemikalijama
- ◆ Ne zahtjeva kompliciranu kemijsku analizu ili održavanje

- ◆ Radi čisto, često eliminira potrebu za odmašćivanjem parom, ultrazvučnim čišćenjem ili pjeskarenjem
- ◆ Ne upotrebljava štetne klorirane fluorougljike, otapala ili kemikalije za čišćenje uz pomoć kiselina [3]

Nedostaci obrade mlazom plazme su:

- ◆ Kvaliteta i preciznost odreza znatno manja u usporedbi s LBM
- ◆ Pojava kapljica rastaljenog materijala prilikom rezanja
- ◆ Pojava konusnosti reza
- ◆ Pojava otrovnih para, visoka buka, IR i UV zračenja [3]

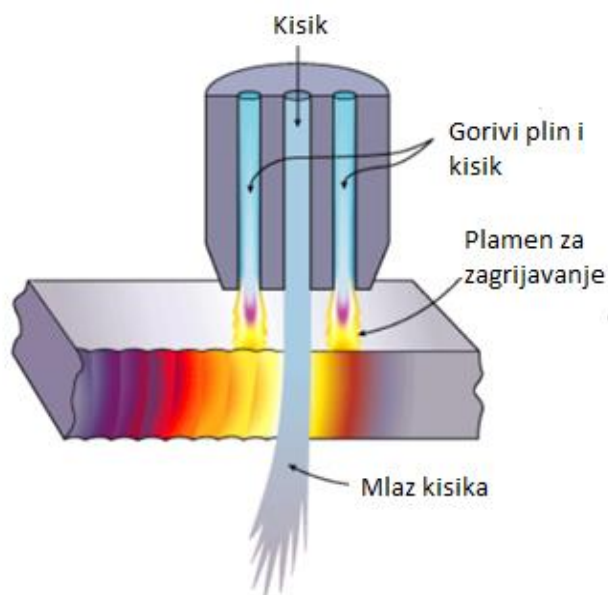
5. OBRADA MLAZOM PLINA

Plinsko rezanje (*Oxyfuel process*) je toplinski postupak obrade odvajanjem čestica koji koristi kisik i goriv plin (MAPP, acetilen, propan, propilen i prirodni plin) za procese rezanja materijala. To je najrasprostranjeniji proces industrijskog termičkog rezanja jer posjeduje mogućnost rezanja materijala debljine od 0,5 do 250 mm. Oprema može biti ručna ili automatizirana. [16]

U današnje vrijeme odgovarajućim dizajnom mlaznice i odabirom gorivog plina, mogu se značajno poboljšati performanse rezanja (brzina rezanja i kvaliteta odreza). [16]

Sam proces koristi smjesu kisika i gorivnog plina koja omogućava predgrijavanje metala koji će se rezati do njegove temperature „paljenja“, koja za čelik iznosi 700 do 900 °C, ali znatno ispod njegovog tališta, odnosno točke taljenja. [16]

Mlaz koji sadrži čisti kisik se usmjerava/fokusira u prethodno zagrijano područje pri čemu dolazi do snažne egzotermne kemijske reakcije između kisika i metala stvarajući željezov oksid ili trosku. Mlaz kisika otpuhuje trosku i na taj način omogućuje mlazu da probije metal, te nastavi proces rezanja dotičnog materijala (Slika 5.1.). [16]



Slika 5.1. Princip plinskog rezanja [16]

Kvalitetan rez s kisikom posjeduje sljedeće karakteristike:

- Lako uklanjanje troske struganjem s donje strane

- Nema podrezivanja (ravan rez od vrha do dna)
- Glatka površina koja se lako čisti [17]

Ovim postupkom rezanja, mogu se rezati samo metali čiji oksidi imaju nižu točku taljenja u odnosu na osnovni metal. Odnosno, čim metal oksidira, dolazi do prekidanja oksidacije stvaranjem zaštitne kore. [17]

Prethodno navedeni uvjet posjeduje čelik s niskim udjelom ugljika i neke niske legure, pa je omogućeno njihovo učinkovito plinsko rezanje (Slika 5.2.). [17]



Slika 5.2. Plinsko rezanje [18]

Kao što je već rečeno, postoje automatizirani strojevi za plinsko rezanje, ali i ručno rezanje plinom. Oprema za takav tip rezanja prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 5.3. Oprema za ručno plinsko rezanje [19]



Slika 5.4. Ručno plinsko rezanje [20]

Baš kao svi ostali postupci, i plinsko rezanje se može s lakoćom automatizirati (Slika 5.5.).



Slika 5.5. Automatizirano plinsko rezanje [21]

U današnje vrijeme nastoji se uvijek smanjiti troškovi, odnosno povećati maksimalno produktivnost. To se najčešće postiže rezanjem s više mlaznica istovremeno. Na slici 5.6. prikazana je izvedba stroja s više mlaznica koje rade simultano.



Slika 5.6. Automatiziran način rada s više mlaznica [22]

Da bi se uopće mogao upotrijebiti proces plinskog rezanja, treba ispuniti sljedeće uvjete/stavke:

- Minimum plinovitih reakcijskih produkata kako ne bi došlo do razrjeđenja kisika za rezanje
- Reakcija oksidacije između metala i mlaza kisika mora biti dovoljna da omogući održavanje temperature paljenja
- Temperatura „paljenja“ materijala mora biti niža od njegove točke taljenja jer u suprotnom bi došlo do otapanja materijala, pa se proces rezanja ne bi ni mogao izvesti
- Točka taljenja oksida mora biti niža u odnosu na točku taljenja okolnog materijala kako bi ga mlaz kisika mogao otpuhati [16]

5.1. Vrste plinova

Za proces rezanja materijala upotrebljavaju se sljedeći plinovi:

- ◆ MAPP
- ◆ Acetilen
- ◆ LPG
- ◆ Propan
- ◆ Prirodni plin [23]

5.1.1. MAPP

MAPP plin je mješavina acetilena i propana, toplinske vrijednosti manje od acetilena. Posjeduje mogućnost skladištenja i transporta. Može se koristiti pri znatno većim tlakovima od acetilena, ponekad do 3 ili 4 bar – a u gorionicima za rezanje uz prisutnost velike količine kisika. Mogućnost rezanja čelika debljine do 30 mm. Curenje ovakvog plina se lako prepoznaje po njegovom karakterističnom mirisu. [23]

Kako se plin MAPP može koristiti pri većem tlaku u odnosu na acetilen, može se koristiti za proces podvodnog rezanja u vodi velike dubine, jer je tada najmanja mogućnost disocijacije na komponente ugljika i vodika koji su eksplozivni. [16]

5.1.2. Acetilen

Plin koji proizvodi najvišu temperaturu plamena u odnosu na ostale plinove. Maksimalna temperatura plamena dostiže vrijednost od čak 3160 °C u odnosu na propan kod kojeg se dostižu

temperature od 2828 °C. Osigurava veću brzinu plamena koja iznosi 7,4 m/s. Pri rezanju ostvaruje se uža zona utjecaja topline, te manji stupanj izobličenja. Karakterističan izgled plamena kojeg stvara acetilen, prikazan je na slici 5.7. [23]



Slika 5.7. Dizajn mlaznice i acetilenski plinski mlaz [16]

5.1.3. Propan

Niža temperatura plamena u odnosu na plamen kojeg stvara acetilen. Karakterističan izgled plamena kojeg stvara propan prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8. Dizajn mlaznice i propan plinski mlaz [16]

Ukoliko se usporede slike 5.7. i 5.8., zaključuje se da je plamen kojeg stvara propan manje fokusiran. Iz tog razloga, probijanje je znatno sporije, ali kako se mlazom kisika vrši izgaranje i stvaranje troske, brzine rezanja su otprilike jednake. Omjer volumena kisika i gorivnog plina iznosi 1,2:1 za acetilen, a za propan taj omjer iznosi 4,3:1. [23]

5.1.4. LPG (Tekući naftni plin)

Kod LPG temperatura plamena se kreće oko 2896 °C. Topliji je od samog propana, ali ne i od acetilena. U vanjskom konusu dolazi do otpuštanja/oslobođanja velike količine topline (72000 kJ/m³). Glavni nedostatak LPG – a je visoka stehiometrijska potreba za samim gorivnim plinom (3,7:1). [23]

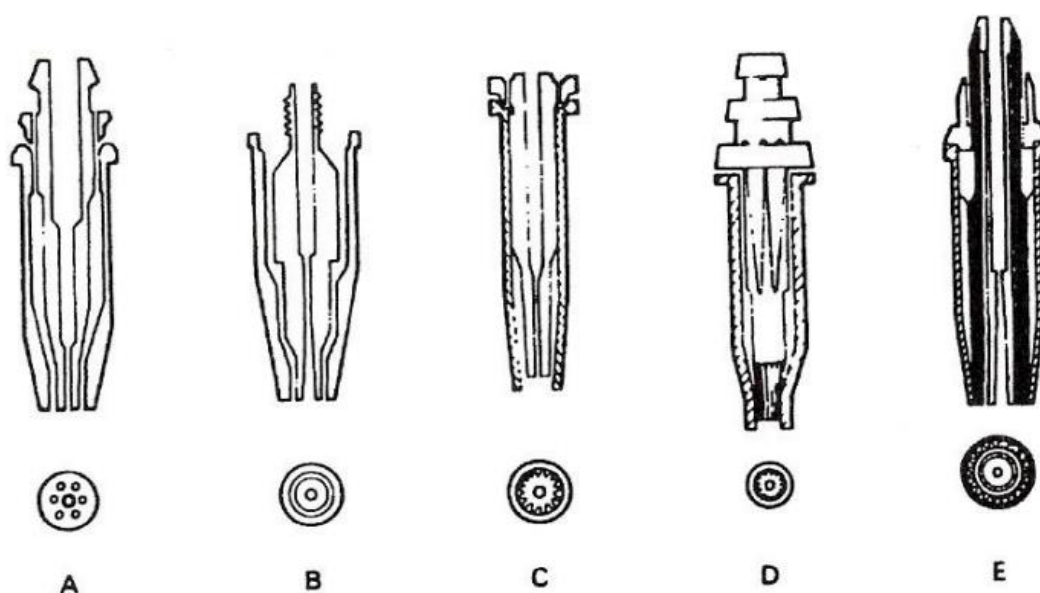
5.1.5. Prirodni plin

U odnosu na ostale gorivne plinove posjeduje najnižu ukupnu toplinsku vrijednost i temperaturu plamena, što za posljedicu ima najsporije probijanje materijala koji će se rezati. [16]

5.2. Mlaznice za rezanje

Dizajn mlaznice gorionika je takav da ima jedan središnji otvor ili više otvora po nekom luku/obodu. Na acetilenskim mlaznicama se izrađuju kružni provrti, a kod propan mlaznica prstenasti prorezi. Smjesa gorivog plina i odgovarajućeg udjela kisika (predgrijavanje materijala) dovodi se kroz manje priključke. Središnji otvor mlaznice varira u ovisnosti o dimenzijama mlaznica. Također, promjer otvora će se povećati u slučaju većih debljina ploča materijala koje će se rezati. [24]

Vrste dizajna mlaznica za rezanje prikazane su na slici 5.9.



Slika 5.9. Dizajn mlaznica [24]

Slika 5.9. sadrži sljedeće oznake:

A – Jednodijelna mlaznica za acetilen koja sadrži tri do devet provrta za predgrijavanje, bez košuljice.

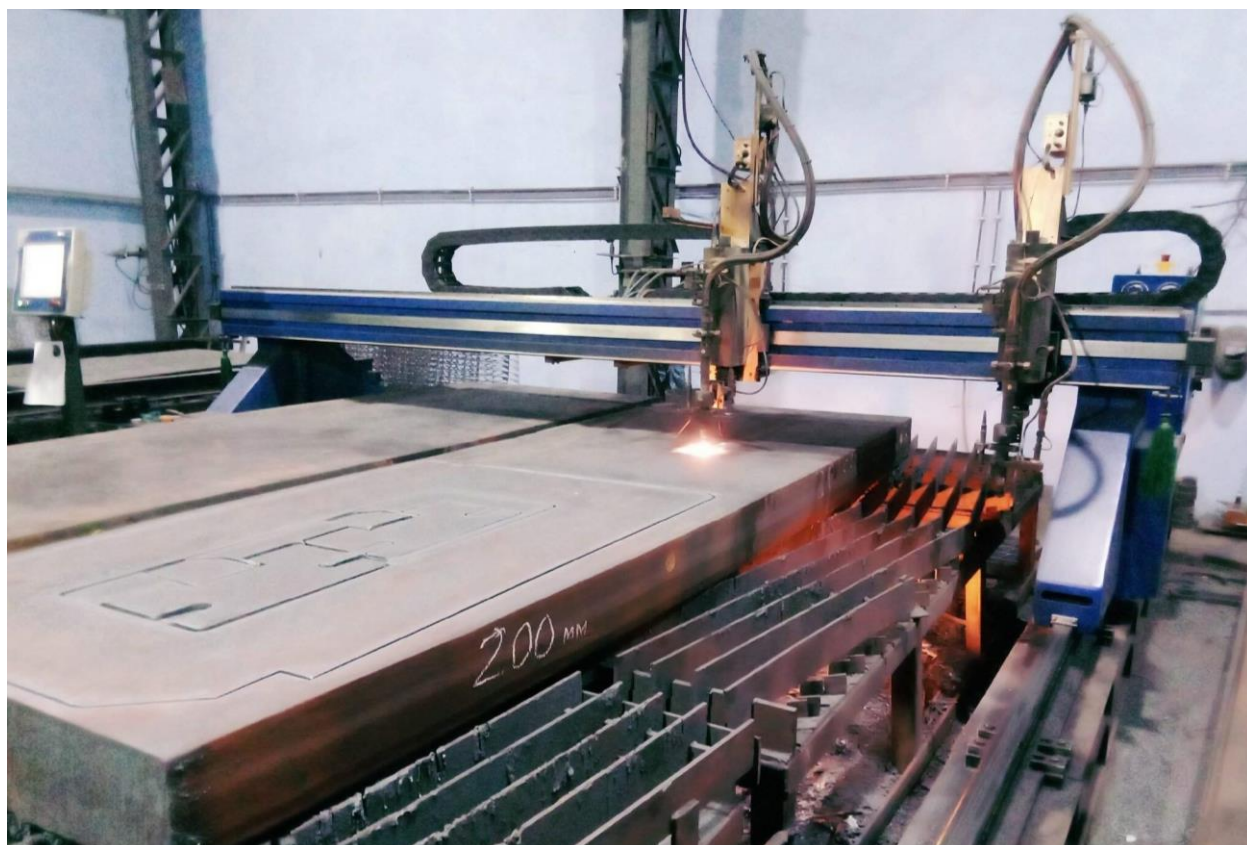
B – Dvodijelna mlaznica za acetilen, sadrži venturijev provrt, te provrt za predgrijavanje, bez košuljice.

C – Dvodijelna mlaznica za prirodni plin koja sadrži venturijev provrt, te žljebove za prethodno zagrijavanje, sa košuljicom.

D – Dvodijelna mlaznica za propan s paralelnim otvorima/provrtima, sadrži proreze za predgrijavanje, duga košuljica.

E – Dvodijelna mlaznica za propan s paralelnim otvorima/provrtima, sadrži žljebove za predgrijavanje i „zavjesu“ kisika. [24]

Glavna karakteristika plinskog rezanja u odnosu na plazma rezanje i rezanje uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza je mogućnost rezanja znatno većih debljina materijala uz osiguranje najbolje kvalitete odreza. Rezanje materijala debljine 200 mm prikazano je na slici 5.10.



Slika 5.10. Plinsko rezanje materijala debljine 200 mm [25]

5.3. Utjecajni parametri na kvalitetu odreza

Kvaliteta odreza ovisi o nizu parametara, a primarni parametar vezan je za kompetenciju gorionika i sposobnost operatera.

Parametri koji utječu na kvalitetu reza su:

- Tlak kisika za rezanje
- Dizajn mlaznice
- Pravilno predgrijavanje
- Omjer kisika i gorivnog plina
- Brzina rezanja
- Vrsta gorivnog plina
- Sustav za opskrbu plinom (kisik i gorivo)
- Fizikalna svojstva materijala obratka
- Radni zazor između vrha mlaznice i predmeta koji se reže [26]

Većina ovih parametara varira u ovisnosti o stanju površine i materijalu koji će se rezati. Sve ove parametre kontrolira/regulira operater, te je važno imati dobro obučenog operatera i dobro održavan stroj. [26]

5.4. Prednosti i nedostaci

Prednosti plinskog rezanja su:

- ◆ Niski kapitalni troškovi
- ◆ Troškovi potrošnog materijala niži u odnosu na ostale postupke/procese rezanja
- ◆ Minimalni zahtjevi za električnom energijom (toplinski postupak)
- ◆ Lak prijenos opreme (kod ručnog plinskog rezanja)
- ◆ Postupak se u potpunosti može automatizirati
- ◆ Mogućnost rezanja materijala vrlo velikih debljina [16]

Nedostaci plinskog rezanja su:

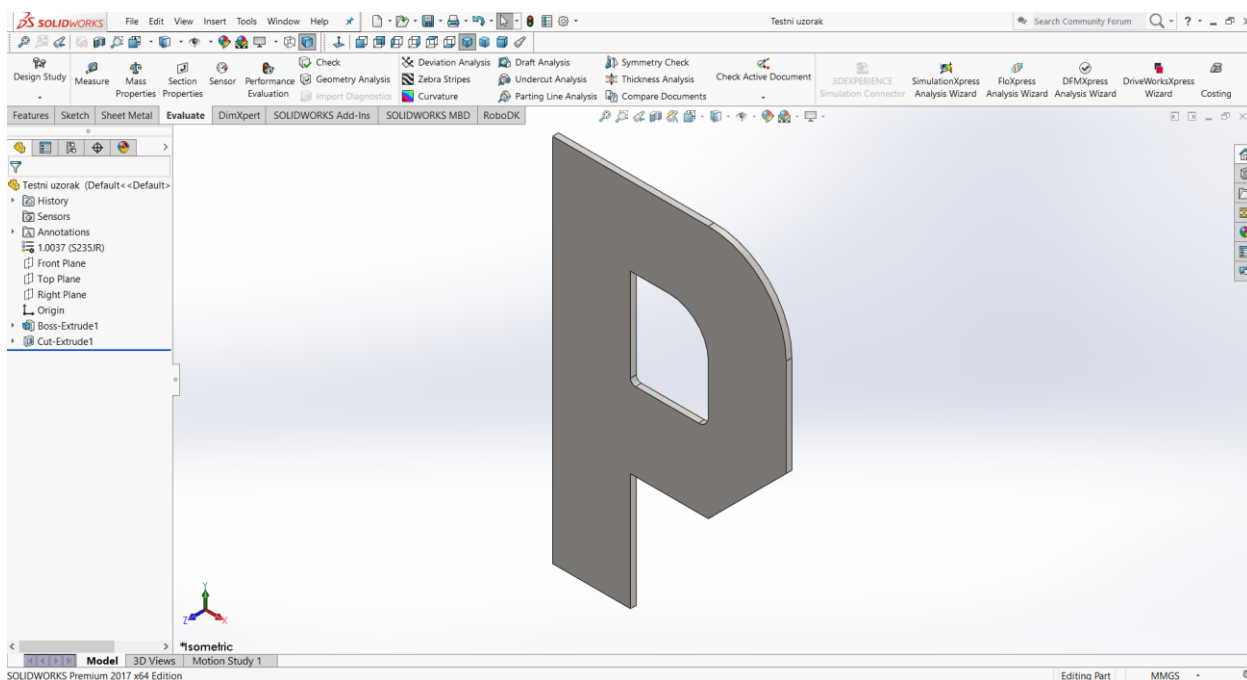
- ◆ Ograničenja pri rezanju niskolegiranih čelika
- ◆ Parametri, oblik mlaznice i početno stanje površine utječu na kvalitetu odreza
- ◆ Loša kvaliteta reza prilikom rezanja materijala debljine ispod 5 do 10 mm

- ◆ Izražene toplinske deformacije prilikom rezanja manjih debljina (potrebno ravnanje)
- ◆ Male brzine rezanja
- ◆ Velik unos topline (odstupanje mjera zbog rastezanja materijala) [16]

6. KONSTRUKCIJA TESTNOG UZORKA I IZRADA PROGRAMA ZA REZANJE

6.1. Konstrukcija testnog uzorka

Za zadatak bilo je potrebno napraviti usporedbu tri različita nekonvencionalna postupka rezanja na osnovu testnog uzorka. Najprije je bilo potrebno modelirati testni uzorak. Taj dio je odrađen u softverskom programu *SolidWorks* (Slika 6.1.).



Slika 6.1. Prikaz testnog uzorka u SolidWorks – u

Testni uzorak debljine 6 mm odabran je prema normi HRN EN 1090-2:2018. Mjerenje hrapavosti odreza vršiti će se na duljinama „A“ i „B“ (Prilog 1.).

6.2. Odabir materijala za testni uzorak

Za materijal testnog uzorka odabran je čelik S235JR. Njegov kemijski sastav naveden je u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Kemijski sastav materijala [27]

STANDARD	EN 10025-2:2004	
Materijal	S235JR	
	1,0038	
C	≤ 40 mm	≤ 0,17
	> 40 mm	≤ 0,20
Mn	≤ 1,40	
P	≤ 0,035	
S	≤ 0,035	
N	≤ 0,012	
Cu	≤ 0,55	

Čelik S235JR je nelegirani strukturni čelik čvrstoće od 235 MPa, kod kojeg se mogu vršiti ispitivanja do 20 °C. Posjeduje dobru plastičnost, zavarljivost, otpornost, čvrstoću. Vrlo dobre performanse hladnog savijanja, te utiskivanja. [27]

6.3. Izrada programa u softverskom programu EnRoute

Softverski program *EnRoute* tvrtke *SAi* predstavlja rješenje za svakodnevno rezanje i kontinuiranu proizvodnju. To je CAD/CAM softver za dizajn koji pruža jedinstvenu kombinaciju 2D i 3D dizajna, te mogućnost programiranja/određivanja putanje alata (plazma, abrazivni vodeni mlaz, laser). [28]

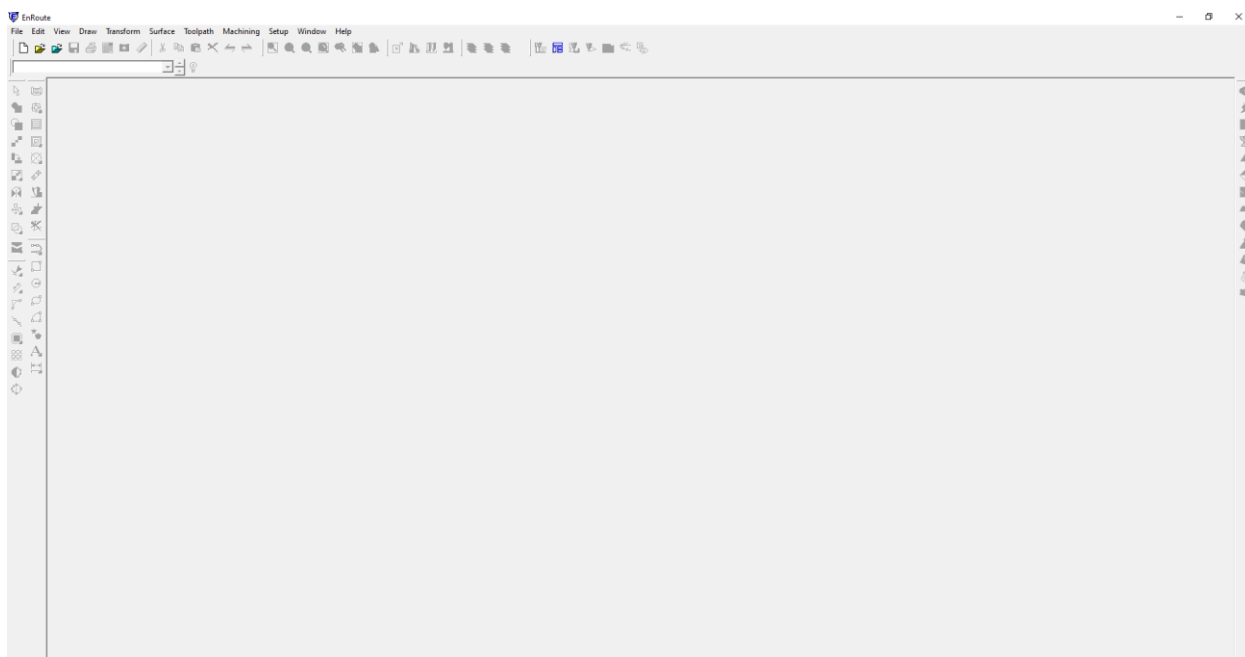
Unos podataka kao što je preklap, širina reza, margine, razmak u odnosu na debljinu ploče/materijala koji se rezao vršio se na temelju tablice 6.2.

Tablica 6.2. Ulazni podaci za EnRoute [28]

Debljina	Ulaz	Izlaz	Preklop	Širina reza	Margina	Razmak
2	3	3	1,5	1,5	5	7
4	3	3	1,5	1,5	5	7
6	3	3	1,8	1,8	5	8
8	3	3	1,8	1,8	5	8
10	3	3	2	2	5	8
12	3	3 plazma 1 plin	2	2	5	8
15	3	1	2	2	5	12
20	3	1	2 – 2,2	2,2	5	12
25	4	1	2,2	2,2	5	12
30	4	1	2,5	2,5	5	14

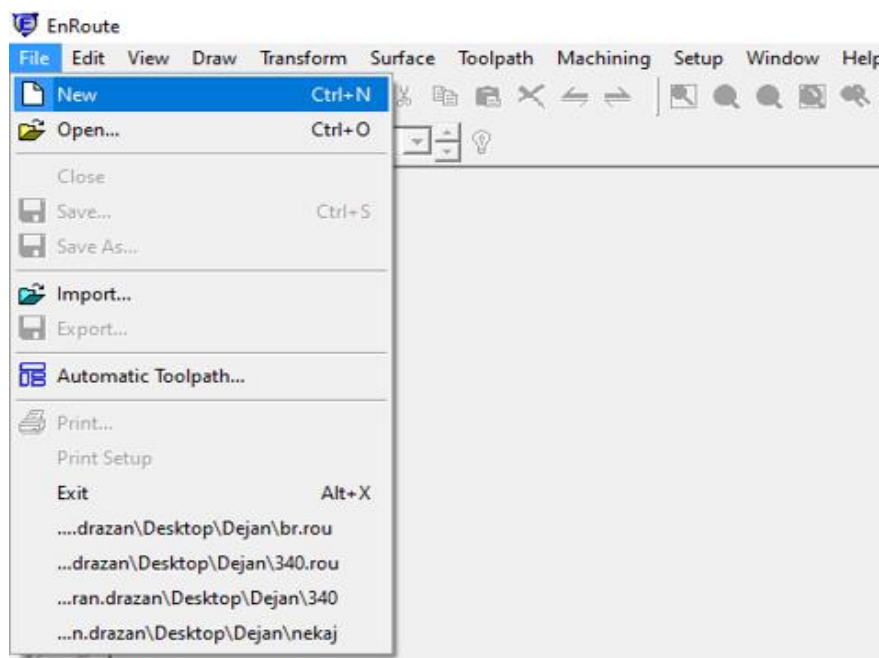
6.3.1. Izrada programa za plazma rezanje

Da bi uopće softverski program prepoznao testni uzorak, najprije je bilo potrebno prebaciti testni uzorak iz dwg u dxf datoteku. Sučelje programa *EnRoute* prikazano je na slici 6.2..

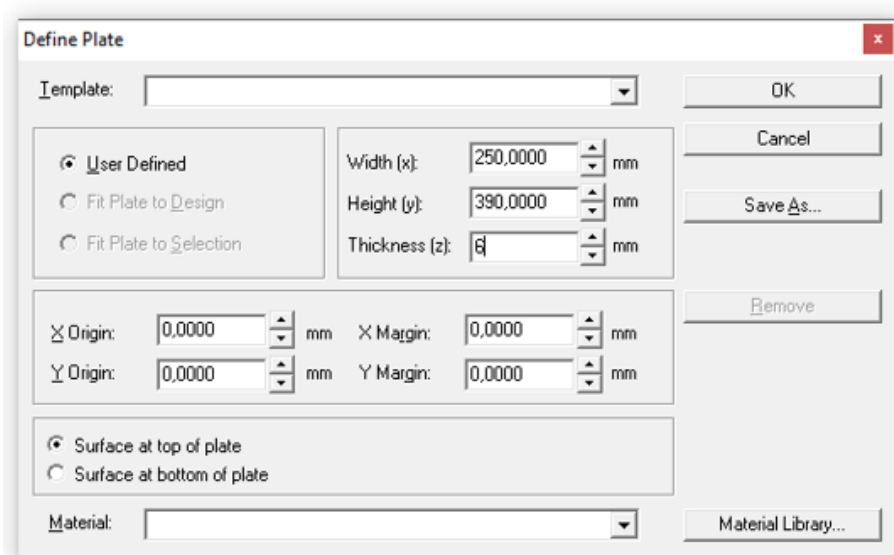


Slika 6.2. Sučelje programa EnRoute

Prvi korak kod programiranja bilo je definiranje dimenzija ploče iz koje će se izrezivati testni uzorak. To se vršilo uz pomoć naredbe *New* koja se nalazi u kartici *File* (slika 6.3.). Budući da je testni uzorak veličine 240x380x6 mm, sa svake strane po X i Y koordinati se uzimalo po 5 mm (margina), pa su dimenzije ploče iznosile 250x390x6 mm (Slika 6.4.).

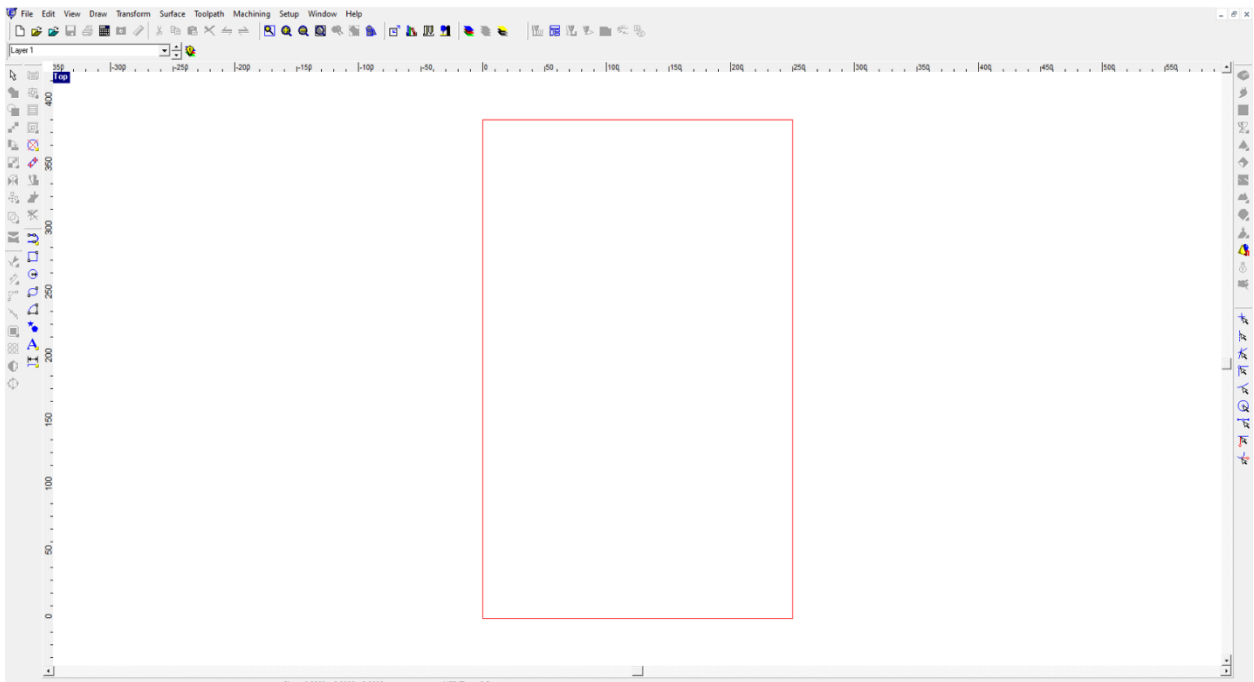


Slika 6.3. Naredba za definiranje dimenzija ploče



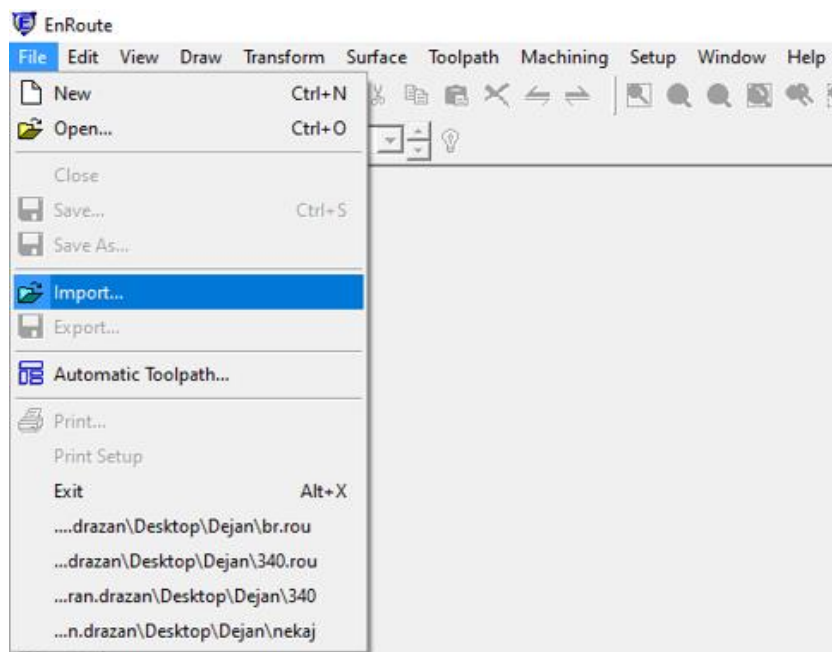
Slika 6.4. Odabir dimenzija ploče

Nakon odabranih dimenzija, pojavio se crveni okvir koji predstavlja ploču zadanih dimenzija unutar kojeg će se centrirati testni uzorak.



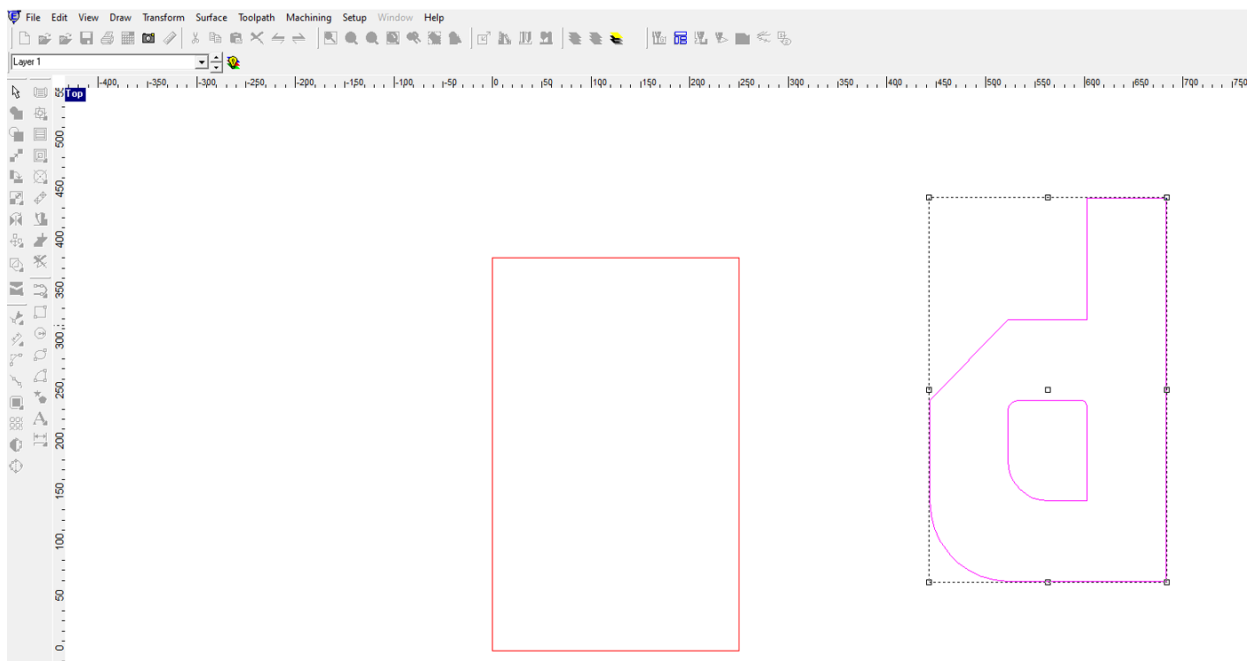
Slika 6.5. Prikaz ploče

Testni uzorak u dxf datoteci se učitao uz pomoć naredbe *Import* koja se nalazi u kartici *File* (Slika 6.6.).



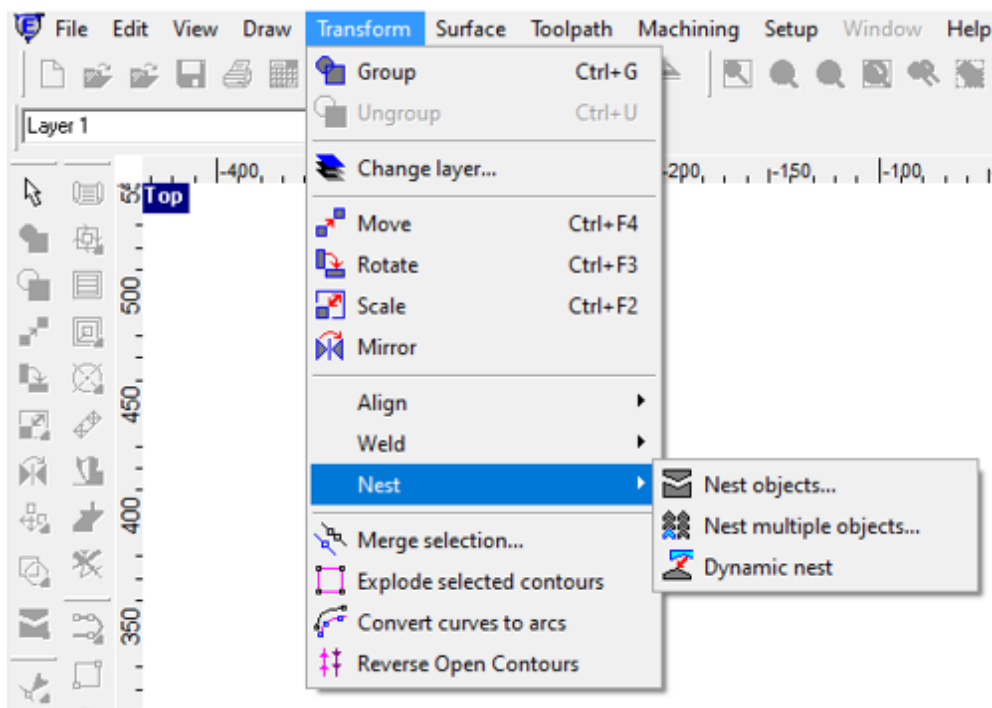
Slika 6.6. Učitavanje testnog uzorka

Da bi se mogli odrediti svi parametri, testni uzorak nakon učitavanja bilo je potrebno označiti (Slika 6.7.).

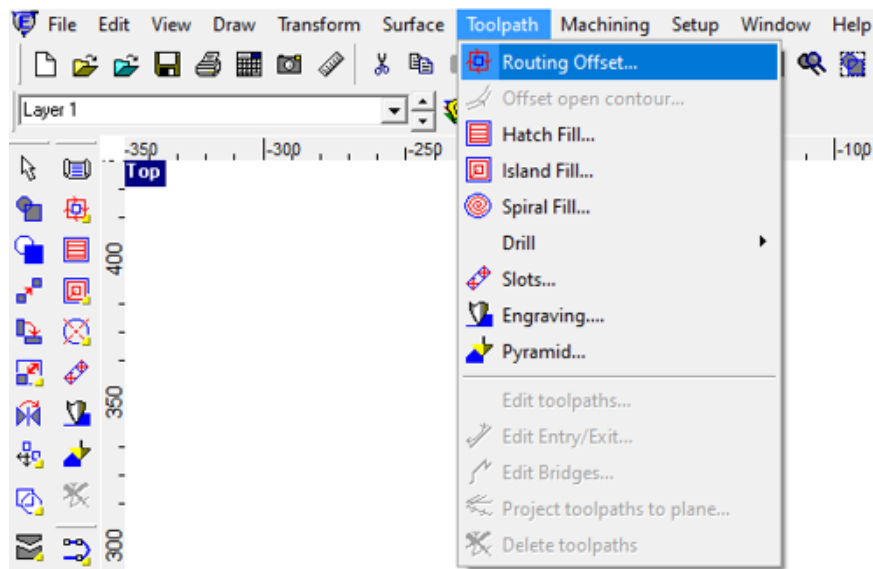


Slika 6.7. Učitavanje i označavanje testnog uzorka

Za centriranje testnog uzorka unutar ploče, koristila se naredba *Nest* (*Nest objects*) koja se nalazi u kartici *Transform* (Slika 6.8.). Klikom na *Nest objects* otvara se dijaloški okvir (Slika 6.9.) u kojem se odabrala margina (uvijek 5 mm) i razmak od 8 mm koji je zadan u tablici 6.2. za odgovarajuću debljinu ploče.

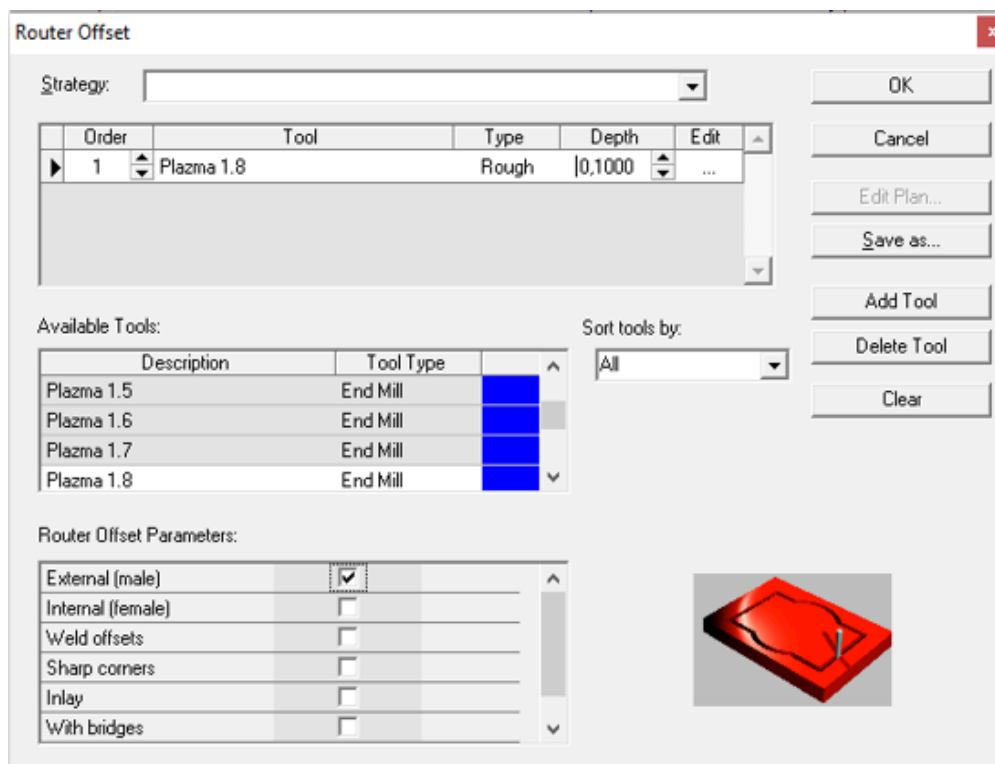


Slika 6.8. Naredba za centriranje testnog uzorka unutar ploče



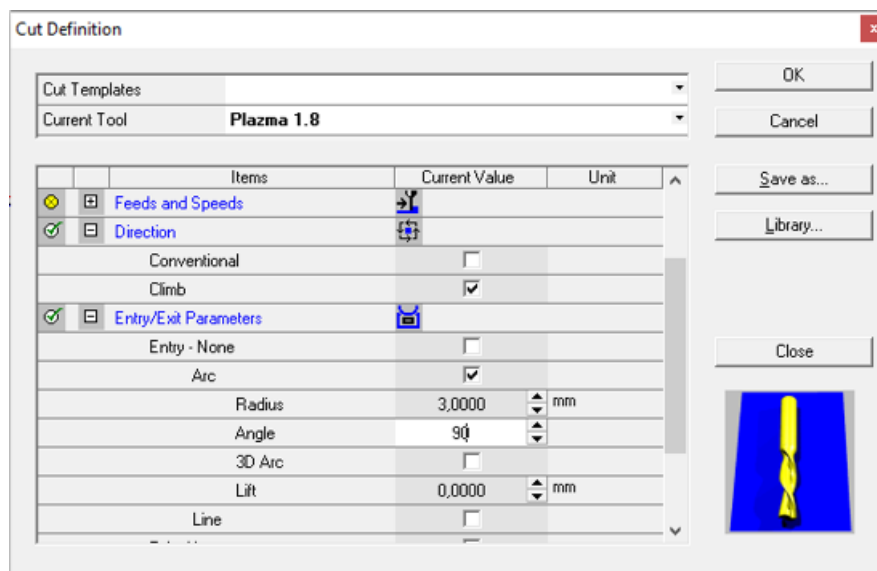
Slika 6.11. Naredba za odabir parametara rezanja

Klikom na *Routing Offset* otvara se dijaloški okvir (Slika 6.12.) unutar kojeg se odabiru parametri. Svi prethodno spomenuti parametri, odabrani su prema tablici 6.2..



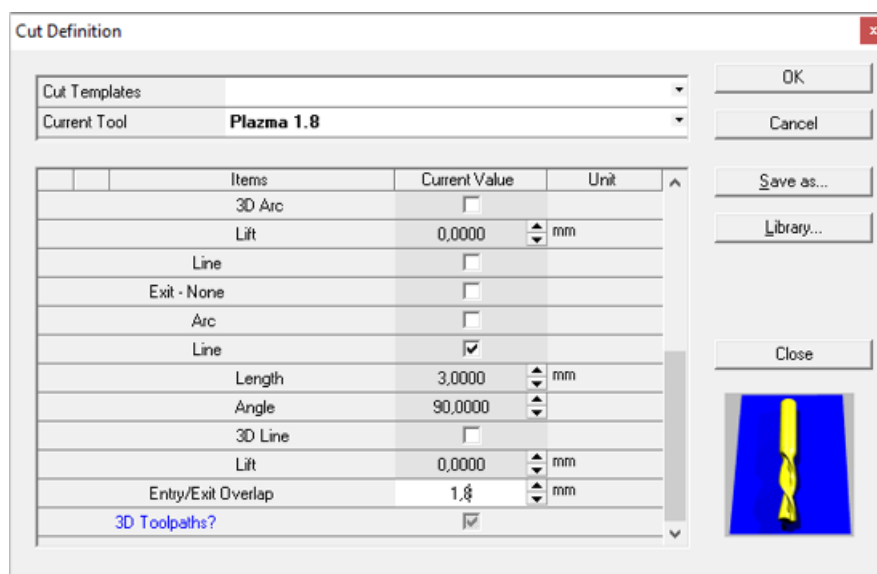
Slika 6.12. Odabir širine reza

Pod *Edit*, odabrao se tip, strategija, duljina ulaza i izlaza te preklop (Slika 6.13., 6.14.). Odabran je ulaz pod radijusom od 3 mm i kutem od 90° (četvrtina kruga).



Slika 6.13. Odabir strategije, tipa ulaza

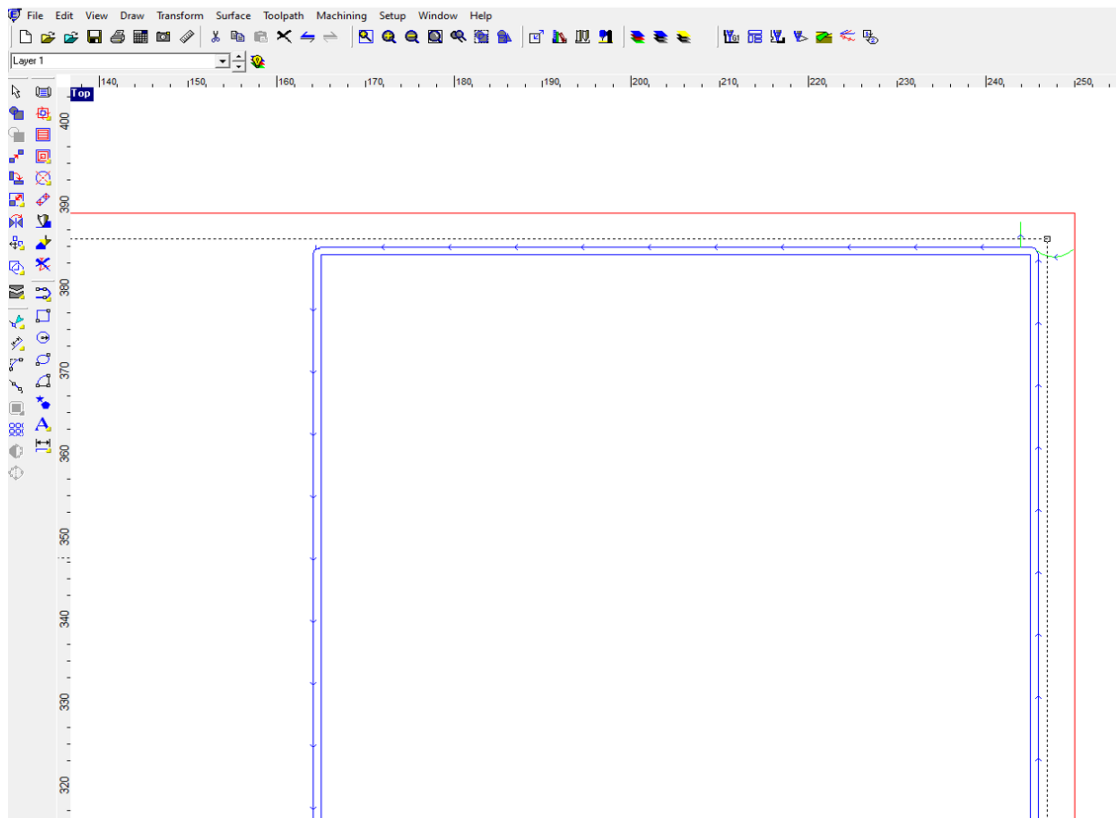
Kod završetka reza, odabran je ravni izlaz duljine 3 mm, pod kutem od 90° u odnosu na testni uzorak, te preklop od 1,8 mm da bi se testni uzorak odrezao do kraja (Slika 6.14.).



Slika 6.14. Odabir tipa izlaza i preklopa

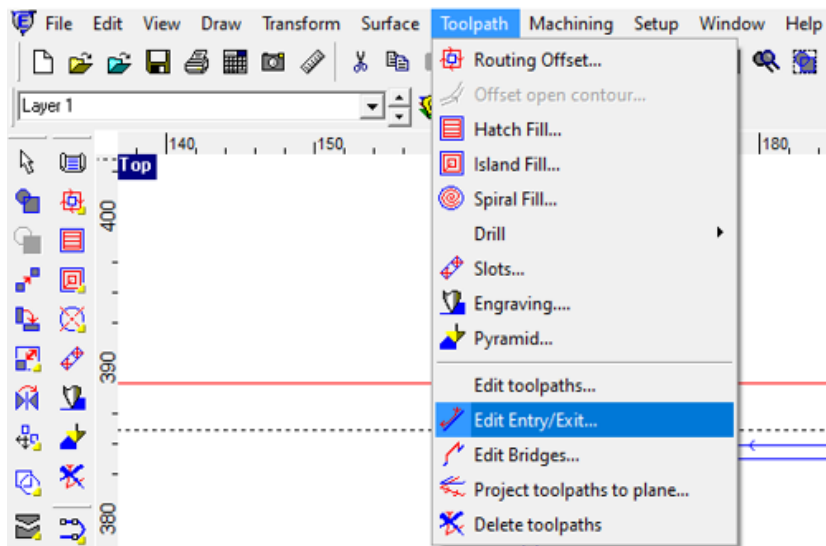
Prilikom rezanja vanjske konture, stroj usmjerava mlaz plazme preko mlaznice/gorionika u smjeru kazaljke na satu, dok kod odrezivanja unutarnjeg dijela testnog uzorka, mlaz plazme odrezuje u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.

Nakon odabranih parametara, program je automatski postavio ulaz i izlaz na konture koje će se rezati (Slika 6.15.).



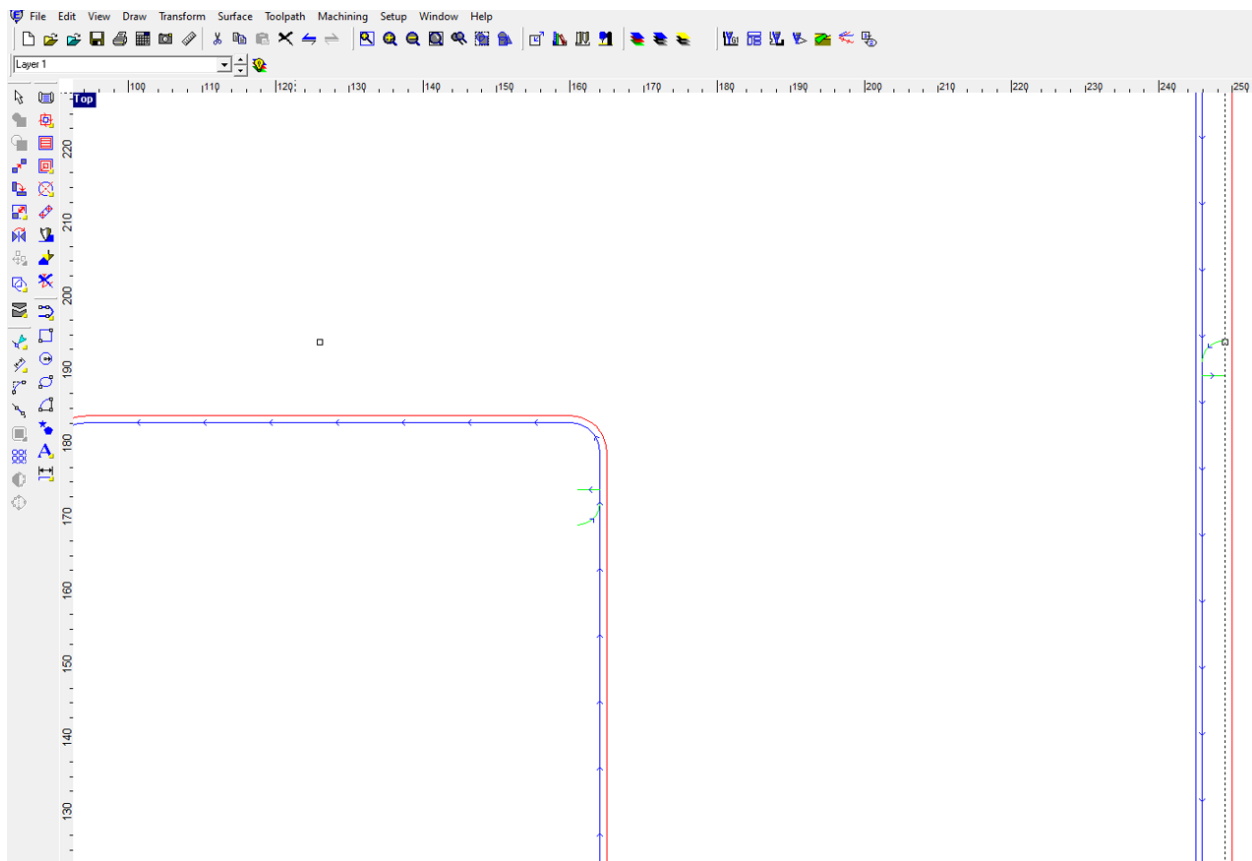
Slika 6.15. Automatski postavljeni ulaz i izlaz

Prilagodba ulaza i izlaza mlaza plazme omogućena je naredbom *Edit Entry/Exit* koja se također nalazi u kartici *Toolpath* (Slika 6.16.).



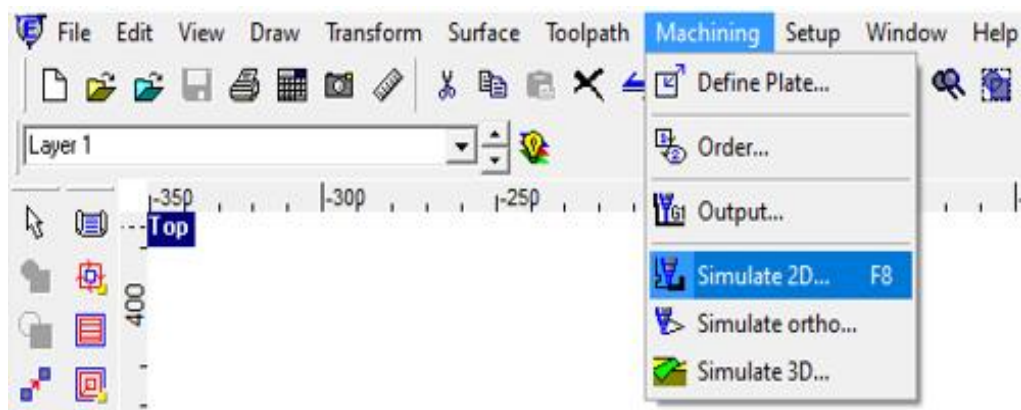
Slika 6.16. Naredba za prilagodbu ulaza i izlaza mlaza plazme

Na isti način je prilagođen ulaz i izlaz na unutarnjoj konturi (Slika 6.17.).



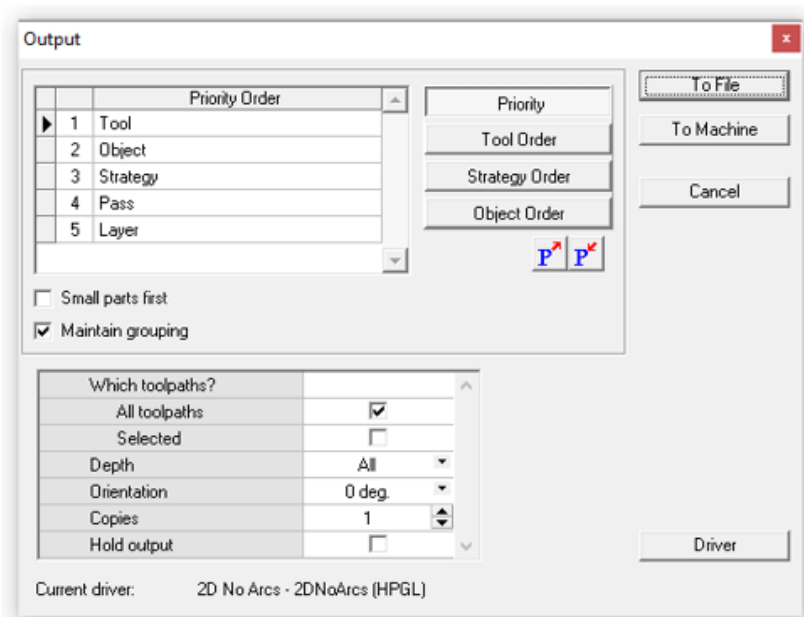
Slika 6.17. Nova pozicija ulaza i izlaza na konturama

Nakon svih prethodnih koraka, bilo je potrebno provjeriti program. To se vršilo uz pomoć naredbe *Simulate 2D* koja se nalazi u kartici *Machining* (Slika 6.18.).



Slika 6.18. Naredba za simulaciju programa

Klikom na naredbu *Simulate 2D*, otvorio se dijaloški okvir za pokretanje simulacije (Slika 6.19.). Prilikom pokretanja simulacije, pojavile su se dvije crne linije koje označavaju prazni hod plazmenog gorionika na početak reza, te tamni okvir po konturama testnog uzorka (Slika 6.19.)

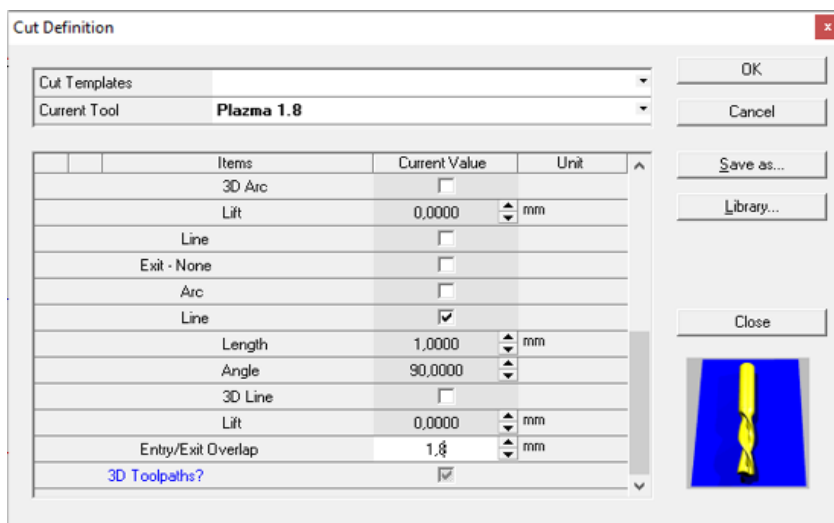


Slika 6.21. Dijaloški okvir naredbe za spremanje programa

Također je trebalo spremiti program u *EnRoute* formatu (.rou) uz pomoć naredbe *Save as*, koja se nalazi u kartici *File*, kako bi se mogao modificirati/promijeniti naknadno po potrebi.

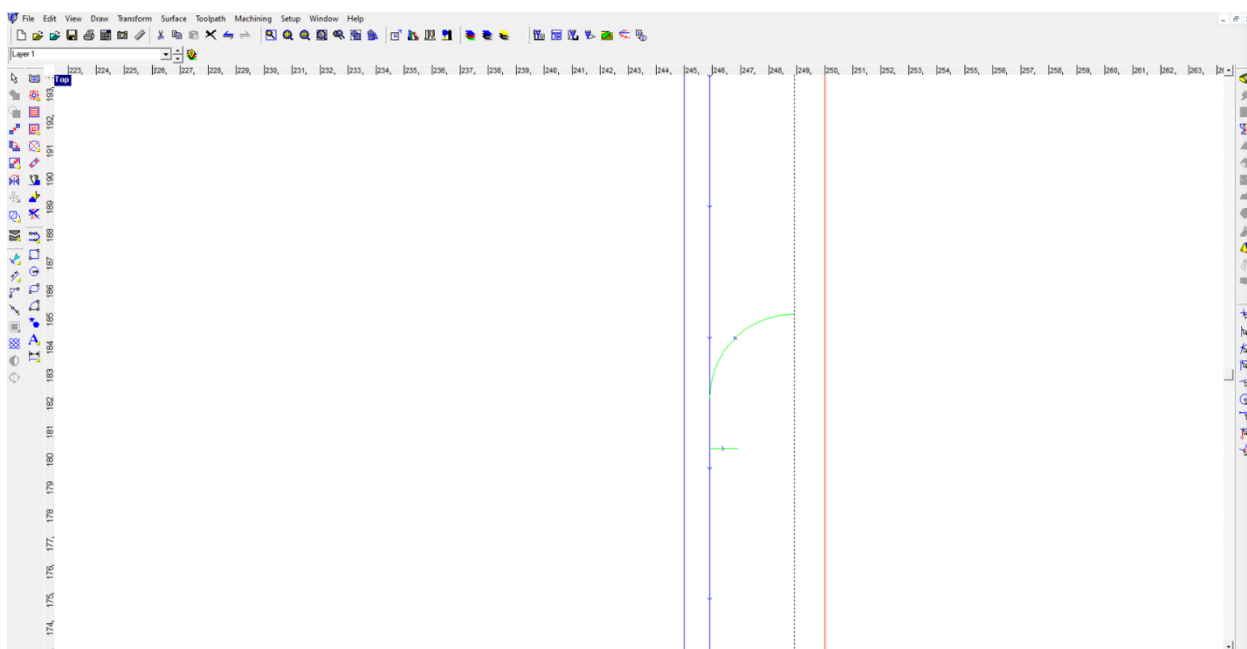
6.3.2. Izrada programa za plinsko rezanje

Prilikom izrade programa za rezanje uz pomoć plina u odnosu na rezanje uz pomoć mlaza plazme, izmijenila se duljina izlaza sa 3 na 1 mm (Slika 6.22.), ostali parametri su ostali isti kao u programu za rezanje uz pomoć mlaza plazme (definirani prema tablici 6.2.).



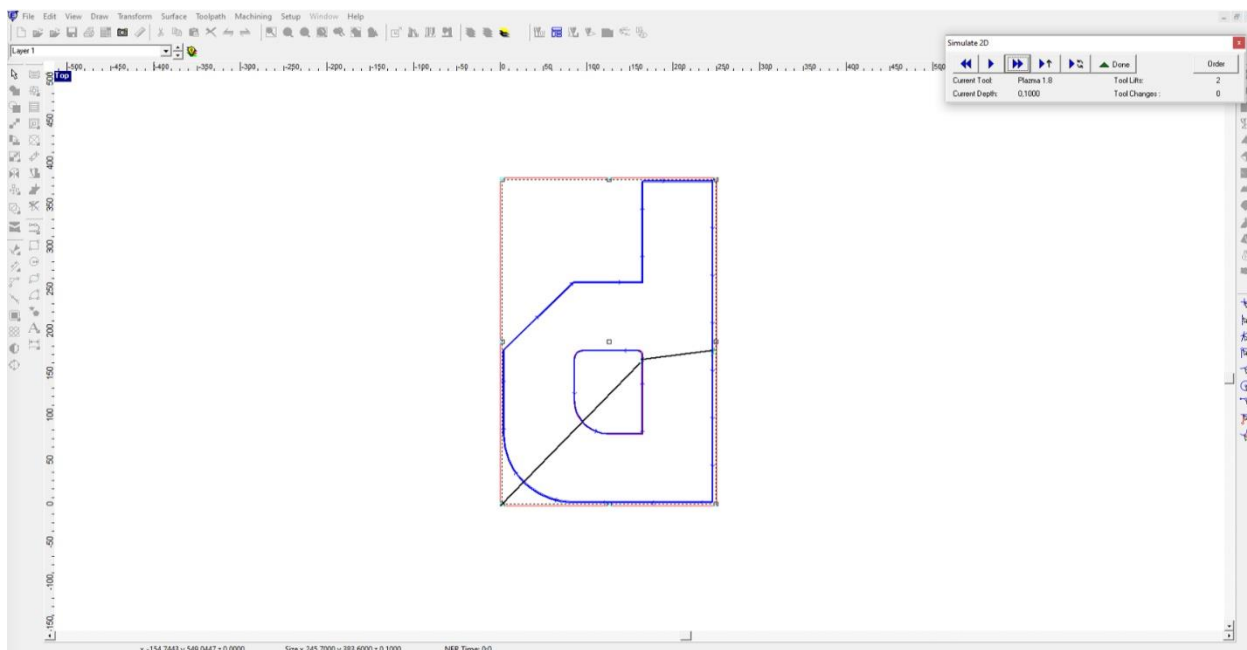
Slika 6.22. Izmjena duljine izlaza mlaza plina

Skraćeni izlaz mlaza plina prikazan je na slici 6.23.



Slika 6.23. Skraćeni izlaz mlaza plina

Na kraju je bilo potrebno provjeriti ispravnost programa uz pomoć naredbe *Simulate 2D* (Slika 6.24.).

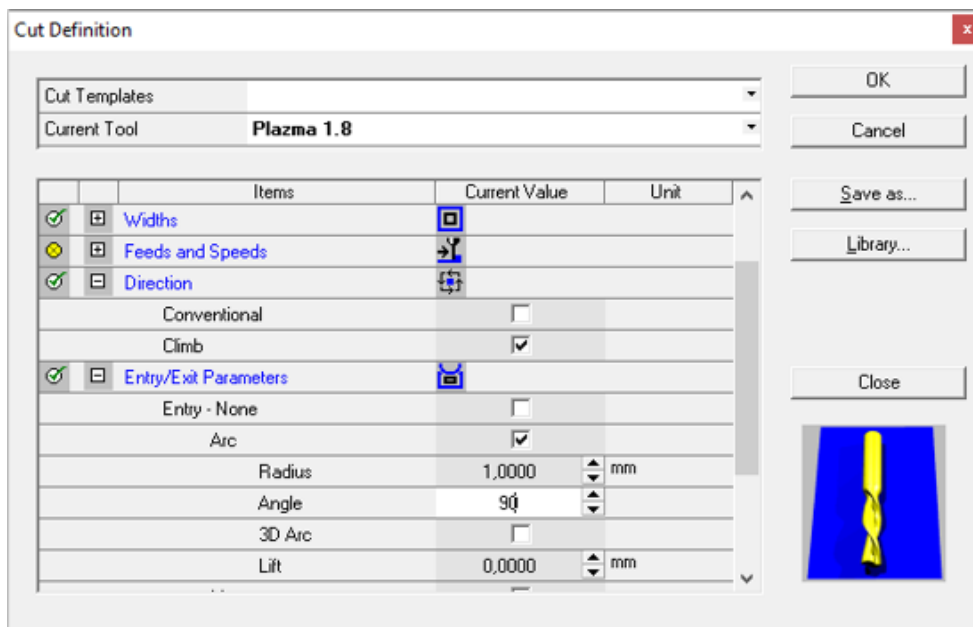


Slika 6.24. Provjera ispravnosti programa (plinsko rezanje)

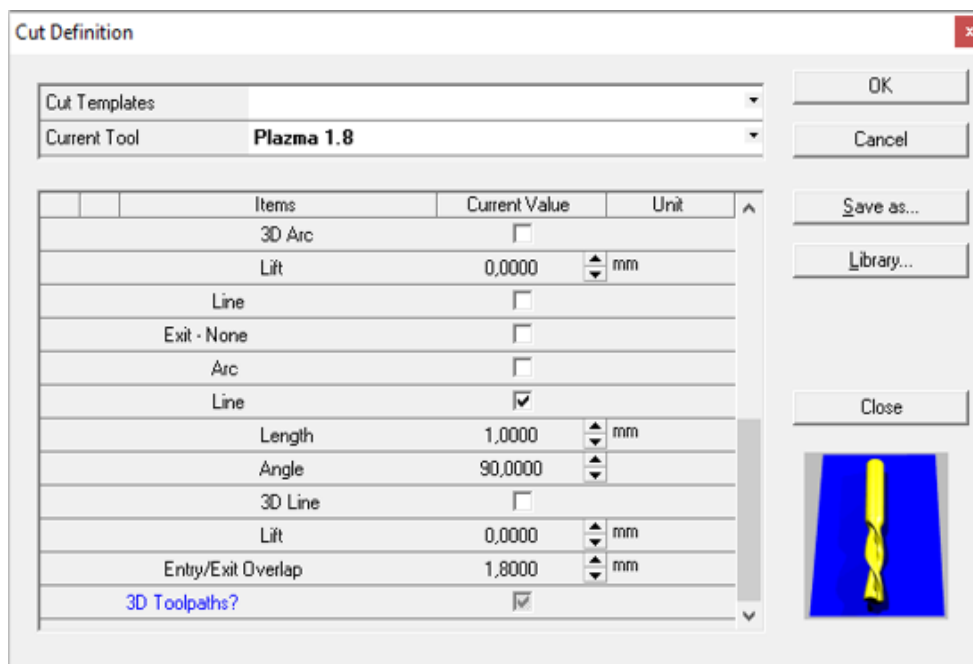
Program je spremljen pod nazivom PLINSKO.PLT (Prilog 2.2.).

6.3.3. Izrada programa za rezanje uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza (AWJM)

U odnosu na program za rezanje uz pomoć mlaza plazme, kod AWJM programa izmijenili su se parametri ulaza i izlaza. Postavljen je ravni ulaz i izlaz abrazivnog vodenog mlaza duljine od 1 mm pod kutem od 90° (Slika 6.25. i 6.26.).



Slika 6.25. Izmjena oblika i duljine ulaza (AWJM)



Slika 6.26. Izmjena oblika i duljine izlaza (AWJM)

7. PROCES REZANJA TESTNOG UZORKA I USPOREDBA POSTUPAKA

Nakon konstrukcije testnog uzorka i izrade programa za sva tri nekonvencionalna postupka (Poglavlje 6.), uslijedila je izrada testnog uzorka na CNC rezačicama, proračun troškova, parametara postupaka, mjerenje hrapavosti te naposljetku određivanje koji nekonvencionalni postupak obrade odvajanjem čestica je najoptimalniji za izradu definiranog uzorka.

7.1. Izrada testnog uzorka uz pomoć mlaza plazme

Izrada testnog uzorka vršila se na CNC rezačici marke *DS – CUT* proizvođača *CNC Teh* (Slika 7.1.). Karakteristike stroja su sljedeće: uz pomoć troosnog pozicijskog CNC sustav – stol, omogućeno je vođenje plazma gorionika i rezne glave. To je portalna CNC rezačica koja posjeduje sinkronizirani pogon i tri servo pogonska motora. Visoka točnost rezanja, malo odstupanje i dulji vijek trajanja osigurava dvostrani sinkronizirani pogon. Maksimalna brzina rezanja i pozicioniranja iznosi 20 m/min. Radno područje stola je dimenzija 2000x6000 mm. Točnost pozicioniranja i ponavljanja iznosi +/- 0,05 mm. Prilikom izvođenja vertikalnog gibanja brzinama do 8 m/min, postoje dvije Z-osi, jedna je za plazma gorionik, a druga za plinski gorionik. Svaka Z-os posjeduje svoj senzor za automatsko održavanje razmaka/udaljenosti između gorionika i radnog komada, s točnošću od +/- 0,15 mm. [29]

CNC upravljanje omogućeno je uz pomoć suvremenog CNC kontrolnog sustava *Burny Levitator*. Sastoji se od dva Intel procesora sa zajedničkom sabirnicom. Uz pomoć njega, osiguravaju se optimalni tehnički parametri (brzina rezanja, visoka točnost i preciznost te dinamika promjene smjera). Prihvat plazma i plinskog gorionika izveden je sa zaštitom od kolizije (zaštita od oštećenja u slučaju udara u radni komad). [29]



Slika 7.1. CNC rezačica DS – CUT

Prije samog početka rezanja, potrebno je bilo namjestiti i poravnati ploču na radni stol, te u plazmeni gorionik postaviti odgovarajuću mlaznicu i elektrodu (Slika 7.2.).

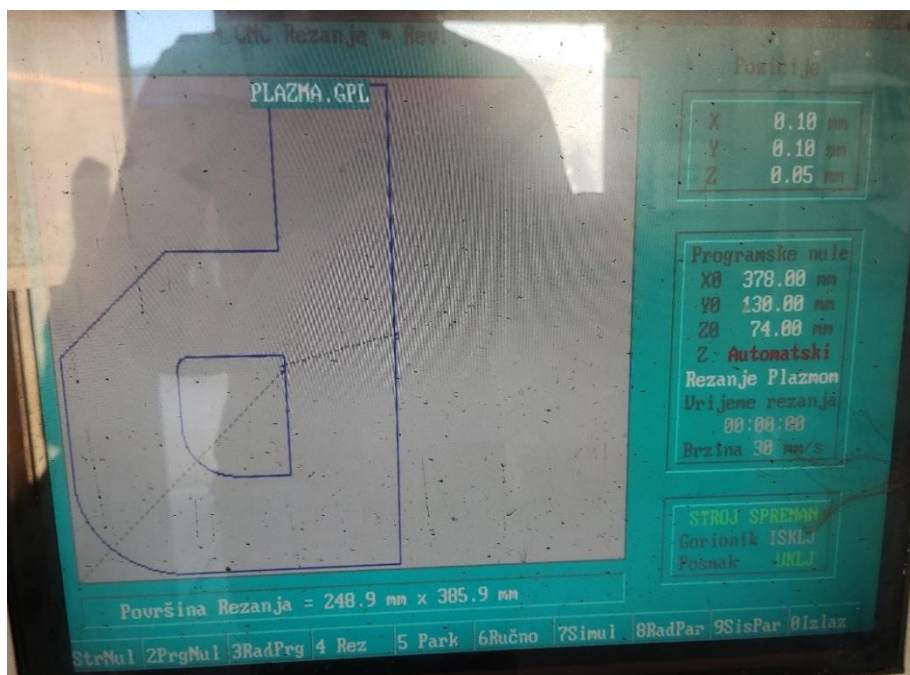


Slika 7.2. Mlaznica i elektroda (PBM)



Slika 7.3. Spajanje plazmenog gorionika

Nakon poravnate ploče i namještenog gorionika, sve je bilo spremno za učitavanje programa te njegovu provjeru (PLAZMA.PLT) na samoj upravljačkoj jedinici CNC stroja (Slika 7.4.). Pri učitavanju program se automatski konvertira iz formata .PLT u format .GPL.



Slika 7.4. Učitavanje programa i njegova provjera

Zatim ručno podešavanje radne brzine (brzina rezanja), brzine premještanja i brzine gibanja plazmenog gorionika uzduž Z-osi (Slika 7.5.).

Kontrola visine gorionika: Automatski		
BRZINE:	Radna brzina..	30 mm/sek
	Premještanje..	140 mm/sek
	Z-dolje..(↓)..	70 mm/sek
	Z-gore... (↑)..	100 mm/sek
POZICIJE:	Prog. Nula X0..	378.00 mm
	Prog. Nula Y0..	130.00 mm
	Prog. Nula Z0..	74.00 mm
	Park. poz. X..	20.00 mm
	Park. poz. Y..	6020.00 mm
	Ravnina premještanja Z..	15.00 Ref. mm
	Sigurnosna ravnina Z..	2.00 Ref. mm

Slika 7.5. Namješavanje parametara programa (PBM)

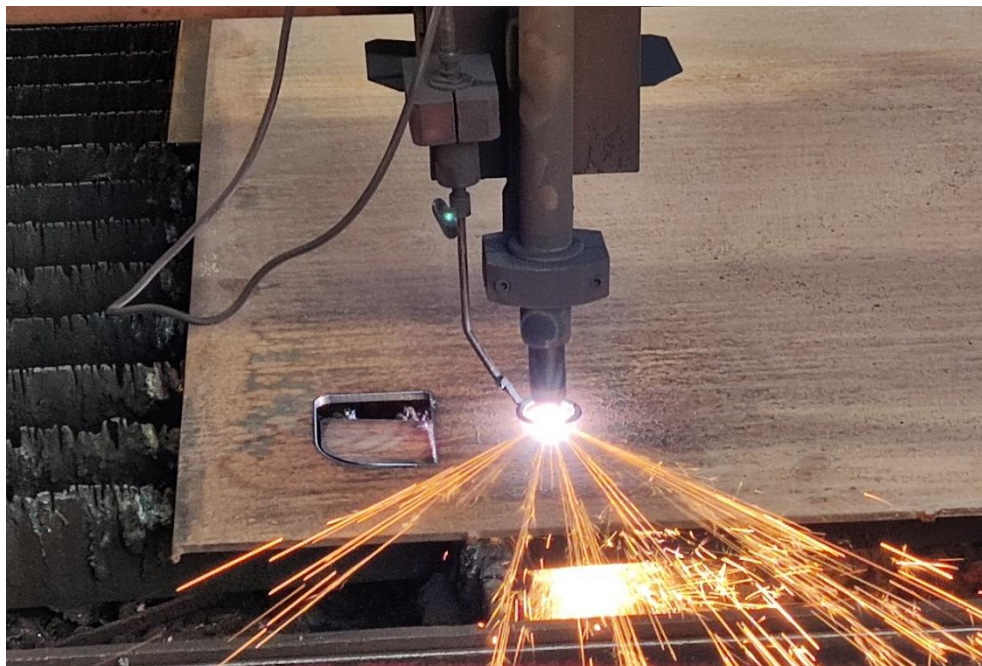
Sam proces plazma rezanja se odvijao uz pomoć zraka, odnosno zračne plazme (objašnjeno u teoretskom dijelu). Najbitniji dio cjelokupnog sustava je izvor plazme marke *powermax 105* proizvođača *Hypertherm* (Slika 7.6.). To je uređaj kojim se vrši odabir plazmenog, ali i zaštitnog plina koji će se koristiti u procesu izrade testnog uzorka. Ovakvi izvori novijih generacija su opremljeni mikroprocesorskim kontrolerom koji omogućava regulaciju povećanja struje i tlaka na početku reza, te smanjenje na kraju reza. Takvom regulacijom je omogućena ekonomična potrošnja (dulji vijek trajanja) elektrode i sapnice.

Tlak je postavljen na 4,8 bar – a, a jakost struje za definiranu mlaznicu i elektrodu iznosio je 65 A.



Slika 7.6. Hypertherm powermax 105

Nakon prethodno definiranih koraka, sve je bilo spremno za izvođenje procesa rezanja. Proces rezanja prikazan je na slici 7.7., a sam testni uzorak i kvaliteta odreza prikazani su na slikama 7.8. i 7.9..



Slika 7.7. Proces rezanja testnog uzorka (PBM)



Slika 7.8. Odrezani testni uzorak (PBM)



Slika 7.9. Prikaz odrezne površine (PBM)

Ukupno vrijeme izrade iznosilo je 1 minutu i 39 sekundi.

7.1.1. Izračuni za proces plazma rezanja

Za zadatak bilo je potrebno izračunati volumen odnesenog materijala u jedinici vremena, vrijeme izrade, te ukupni trošak izrade testnog uzorka. Budući da je upravljačka jedinica izbacila podatak o vremenu trajanja obrade, taj podatak će se samo provjeriti, usporediti s rezultatom na temelju formule.

Volumen odnesenog materijala u jedinici vremena V_{MRR} računa se prema izrazu (7.1):

$$V_{MRR} = v_c b h \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (7.1)$$

gdje je:

v_c brzina rezanja [m/s]

b širina zasjeka (kerf) [m]

h debljina rezanja [m]

Unutar programa, odabrane vrijednosti su sljedeće:

$$v_c = 30 \text{ mm/s} = 0,03 \text{ m/s}$$

$$b = 1,8 \text{ mm} = 0,0018 \text{ m}$$

$$h = 6 \text{ mm} = 0,006 \text{ m}$$

Ubacivanjem zadanih podataka u izraz (7.1), dobila se vrijednost volumena odnesenog materijala u jedinici vremena:

$$V_{MRR} = 3,24 * 10^{-7} [\text{m}^3/\text{s}]$$

Vrijeme izrade računa se prema izrazu (7.2):

$$t_m = \frac{l}{v_c} [\text{s}] \quad (7.2)$$

gdje je:

l duljina obrade [m]

Na osnovu testnog uzorka, odredila se duljina obrade koja iznosi:

$$l = 1418,14 \text{ mm} = 1,41814 \text{ m}$$

Ubacivanjem prethodnih podataka u izraz (7.2), dobilo se vrijeme izrade:

$$t_m = 47,27 \text{ s}$$

Kao što je vidljivo, vrijeme izrade na upravljačkoj jedinici odstupa u odnosu na vrijeme proračunato izrazom (7.2). Razlog leži u tome što je upravljačka jedinica uzela u obzir vrijeme premještanja plazmenog gorionika, njegovo spuštanje i podizanje po Z-osi.

Budući da je za izradu testnog uzorka bilo potrebno upotrijebiti ploču dimenzija 250x390x6 mm, proračun cijene materijala se može lako izračunati na temelju težine ploče. Cijena čelika S235JR po jednom kilogramu iznosi **7 kn**. Sama ploča 250x390x6 težila je 4,563 kg (podatak izvučen iz softverskog programa *SolidWorks*).

Dakle sama ploča kod sva tri postupka je koštala **31,941 kn**. Prilikom izračuna troška stroja, bilo je potrebno uzeti u obzir cijenu rada po satu (**250 kn/h**) pri čemu je u toj cijeni ubrojana i potrošnja zraka/plina (**30,6 kn/h**), električne energije (**60,75 kn/h**), trošak sata rada operatera i amortizacija

stroja. Kada se pomnoži vrijeme izrade sa cijenom sata rada stroja, dobije se trošak od **6,875 kn/kom**.

Cjelokupni trošak izrade testnog uzorka uz pomoć mlaza plazme može se proračunati prema izrazu (7.3):

$$C_{PBM} = C_{MATERIJAL} + C_{STROJ} \text{ [kn/kom]} \quad (7.3)$$

gdje je:

$C_{MATERIJAL}$ trošak materijala

C_{STROJ} trošak rada stroja

Kada se zadane vrijednosti uvrste u izraz (7.3), dobiva se cjelokupan trošak:

$$C_{PBM} = 31,941 + 6,875$$
$$C_{PBM} = \mathbf{38,816 \text{ kn/kom}}$$

7.1.2. Mjerenje hrapavosti (plazma rezanje)

Nakon izrade testnog uzorka i izračuna ukupnog troška, uslijedilo je mjerenje hrapavosti odreza (R_a). Mjerenje se izvodilo na duljini „A“ i „B“ (Prilog 1.) uz pomoć uređaja marke *Mitutoyo SJ-210* (Slika 7.10.).

Karakteristike uređaja su sljedeće:

- Mjerna staza za mjerenje: 16 mm
- Prihvat: RS232C sučelje; sučelje za Digimatic
- Maksimalno mjerno područje: 360 μm
- Grafički prikaz: Mjerni profil, BAC krivulja, ADC krivulja
- Brzina detekcije: 0,25; 0,5; 0,75 mm/s
- Mjerna sila: 0,75 mN prema DIN/ISO
- Cijena: 2347,90 € [30]



Slika 7.10. Mitutoyo SJ-210



Slika 7.11. Mjerenje hrapavosti na dužini „A“ (PBM)

Prilikom mjerenja hrapavosti odreza, dobivene su sljedeće vrijednosti:

- $R_a = 1,454 \mu\text{m}$ („A“ – Prilog 1.)
- $R_a = 1,408 \mu\text{m}$ („B“ – Prilog 1.)

7.2. Izrada testnog uzorka uz pomoć mlaza plina

Plinsko rezanje se također odvijalo na istom stroju kao i plazma rezanje (Slika 7.1.), no u odnosu na plazma rezanje, prije početka samog rezanja bilo je potrebno zamijeniti plazmeni gorionik s plinskim gorionikom, te izmijeniti mlaznicu i elektrodu (Slika 7.12.).



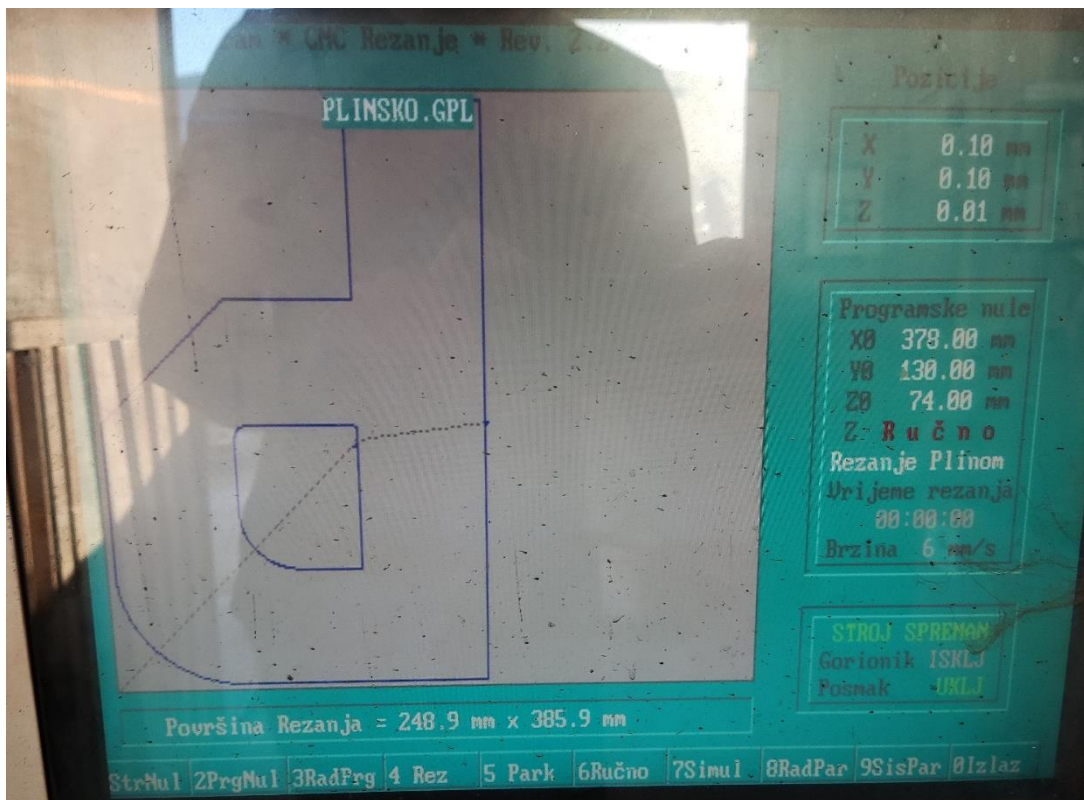
Slika 7.12. Mlaznica i elektroda (plinski gorionik)

Mlaznica i elektroda koja se koristila je oznake 00 VVC za debljine materijala od 6 do 12,5 mm, koja omogućava brzine rezanja od 460 do 510 mm/min.



Slika 7.13. Postavljanje plinskog gorionika

Zatim je uslijedilo učitavanje programa (PLINSKO.PLT) na upravljačku jedinicu CNC stroja, njegova pretvorba u .GPL format i na kraju provjera programa. Parametri su svi ostali isti kao kod rezanja mlazom plazme (parametri stroja), samo se izmijenila radna brzina i način rezanja (sa plazme na plin). Radna brzina je namještena na 6 mm/s (Slika 7.14.). Smanjena brzina je rezultat dužeg predgrijavanja materijala koji će se rezati zbog korištenja propan – butan plina.



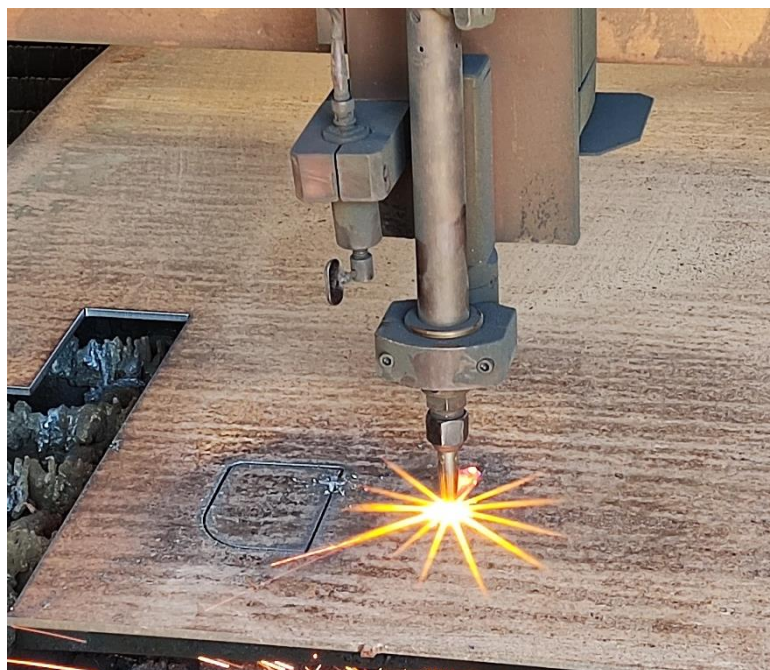
Slika 7.14. Namještavanje parametara programa (plinsko rezanje)

Nakon namještenih parametara programa, bilo je potrebno još namjestiti tlakove grijanja i rezanja. Tlak kisika za grijanje (visoki) je postavljen na 3,6 bar, tlak kisika za grijanje (niski) je postavljen na 0,9 bar i tlak plina za rezanje (propan – butan) je postavljen na 5,4 bar (Slika 7.15.).

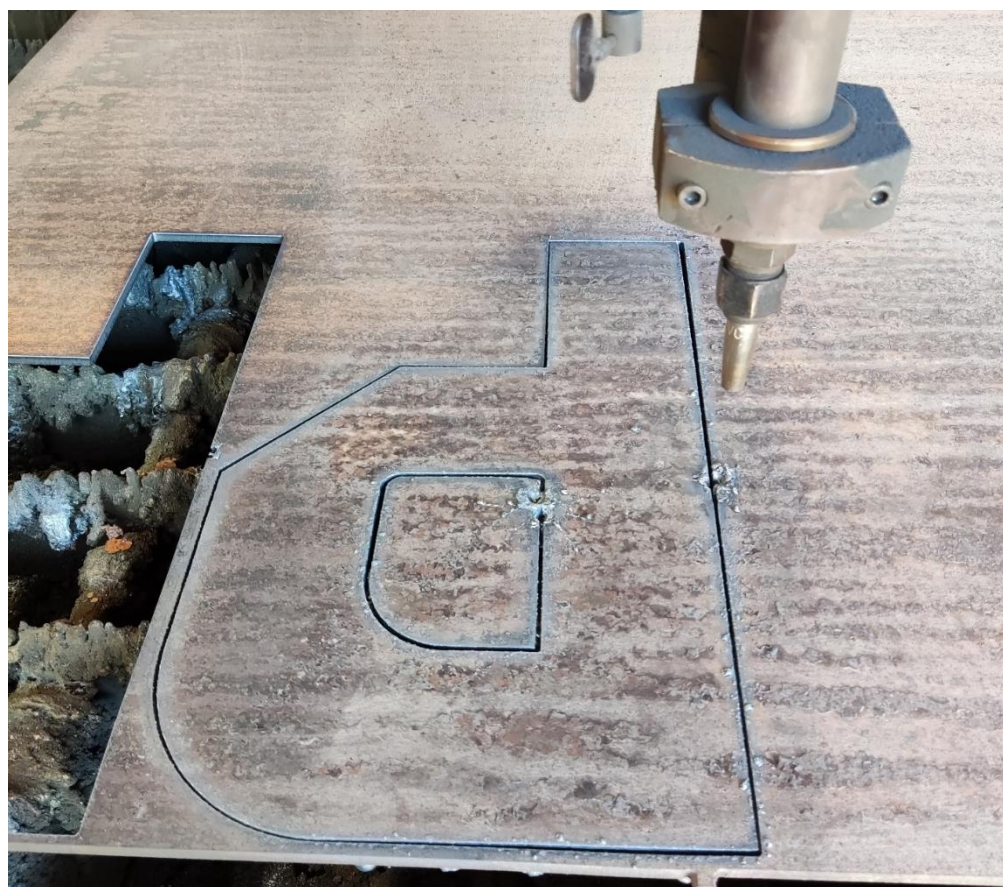


Slika 7.15. Namještavanje tlakova za grijanje i rezanje

Nakon prethodno definiranih koraka, uslijedio je proces plinskog rezanja testnog uzorka.



Slika 7.16. Plinsko rezanje testnog uzorka



Slika 7.17. Odrezani testni uzorak (plinsko rezanje)

Prilikom odrezivanja, zbog male debljine materijala, a velikog utjecaja topline došlo je do djelomičnog rastapanja materijala (Slika 7.18.).



Slika 7.18. Izgled odrezne površine (plinsko rezanje)

Vrijeme izrade iznosilo je 5 minuta i 18 sekundi.

7.2.1. Izračuni za proces plinskog rezanja

Volumen odnesenog materijala u jedinici vremena (V_{MRR}) se također računao prema izrazu (7.1) kao i za plazma rezanje, jer oba nekonvencionalna postupka spadaju u grupu toplinskih postupaka obrade odvajanjem čestica:

$$V_{MRR} = v_c b h \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (7.1)$$

Unutar programa, odabrane su sljedeće vrijednosti:

$$v_c = 6 \text{ mm/s} = 0.006 \text{ m/s}$$

$$b = 1,8 \text{ mm} = 0,0018 \text{ m}$$

$$h = 6 \text{ mm} = 0,006 \text{ m}$$

Uvrštavanjem prethodnih vrijednosti u izraz (7.1), dobiva se volumen odnesenog materijala u jedinici vremena:

$$V_{MRR} = 6,48 * 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

Kao i kod rezanja mlazom plazme, proračun vremena izrade testnog uzorka se vršio prema izrazu (7.2):

$$t_m = \frac{l}{v_c} \text{ [s]}$$

Uvrštavanjem podataka, dobila se sljedeća vrijednost:

$$t_m = \frac{1,41814}{0,006} = 236,36 \text{ s}$$

Vrijeme izrade dobiveno izrazom (7.2) i vrijeme izrade dobiveno na upravljačkoj jedinici odstupalo je zbog praznog hoda i premještanja plinskog gorionika. Stvarno efektivno vrijeme rezanja iznosilo je **236,36** sekundi (**3,94** minute).

Cijena ploče iz koje se vršilo izrezivanje testnog uzorka iznosi **31,941 kn** (250x390x6 kvalitete S235JR i težine 4,563 kg).

Potrošnja kisika za grijanje (visoki + niski tlak) iznosi 2,54 m³/h (0,04233 m³/min). U našem slučaju za vrijeme rezanja, utrošeno je 0,2193 m³ kisika. Potrošnja plina za rezanje (propan butan) iznosi 1,35 m³/h (0,0225 m³/min). Odnosno kod plinskog rezanja testnog uzorka utrošeno je 0,11655 m³ propan butan – a.

Cijena sata rada stroja kod plinskog rezanja iznosi **200 kn/h** (manja cijena od plazma rezanja zbog manje potrošnje električne energije), u tu cijenu je ubrojana i potrošnja kisika/plina (**27,75 kn/h**) električne energije itd., pa kada se cijena sata rada stroja pomnoži sa vremenom izrade (ukupnim), dobiva se trošak rada stroja od **17,67 kn/kom**.

Na osnovu izraza (7.4), proračunat je trošak cjelokupnog plinskog rezanja testnog uzorka:

$$C_{PLIN} = C_{MATERIJAL} + C_{STROJ} \text{ [kn/kom]} \quad (7.4)$$

$$C_{PLIN} = 49,6 \text{ kn/kom}$$

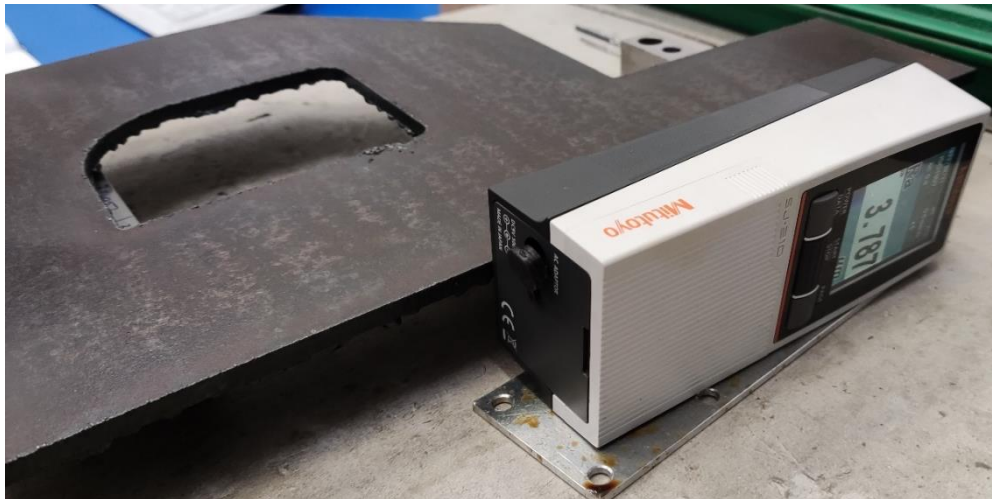
gdje je:

$C_{MATERIJAL}$ trošak materijala

C_{STROJ} trošak rada stroja

7.2.2. Mjerenje hrapavosti (plinsko rezanje)

Nakon izrade testnog uzorka uz pomoć mlaza plina i izračuna ukupnog troška, uslijedilo je mjerenje hrapavosti odreza (R_a). Mjerenje se izvodilo isto kao i kod testnog uzorka dobivenog plazma rezanjem uz pomoć uređaja marke *Mitutoyo SJ-210* (Slika 7.10.). Mjerenje hrapavosti prikazano je na slici 7.19..



Slika 7.19. Mjerenje hrapavosti na dužini „A“ (plinsko rezanje)

Prilikom mjerenja hrapavosti odreza, dobivene su sljedeće vrijednosti:

- $R_a = 3,787 \mu\text{m}$ („A“ – Prilog 1)
- $R_a = 4,484 \mu\text{m}$ („B“ – Prilog 1)

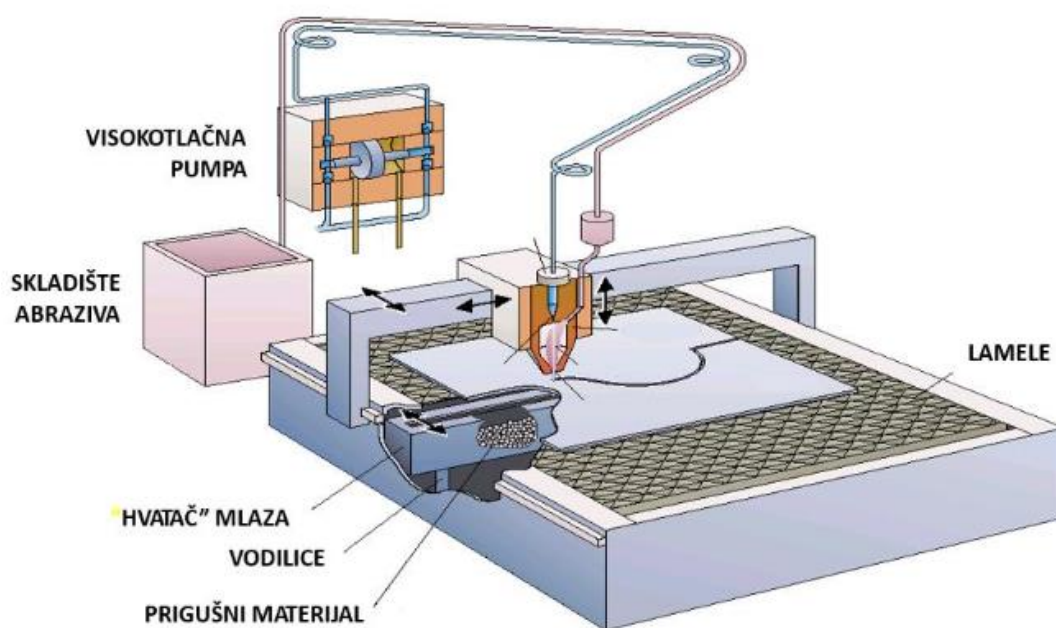
7.3. Izrada testnog uzorka uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza

Rezanje uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza vršilo se na CNC rezačici marke *VR 1530* proizvođača *CNC Teh* (Slika 7.20.). Karakteristike stroja su sljedeće: dimenzije radnog stola iznose 1500x3000 mm, omogućeno je rezanje širokog spektra različitih materijala. Duple dvostruke vodilice kaljeno, brušeno 60 +/- 2 HRC. Maksimalna brzina rezanja iznosi 1000 m/s, a pritisak vode iznosi do 3800 bar – a. Precizno rezanje različitih vrsta materijala debljine do 100 mm (zbog vrste abrazivnog pijeska). Upravljačka jedinica se zasniva na potpuno integriranom

CAD/CAM/CNC sustavu koji je u potpunosti prilagođen korisniku, na hrvatskom jeziku u Windows okruženju. Nakon rezanja nije potrebna nikakva dodatna obrada (hladan rez, bez toplinske deformacije radnog komada). [29]

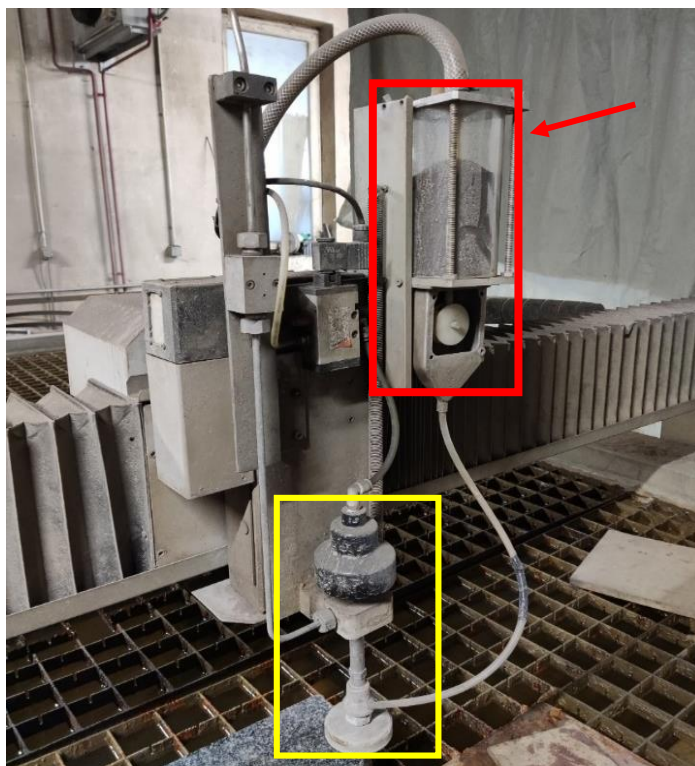


Slika 7.20. CNC rezačica VR 1530



Slika 7.21. Obradni sustav CNC rezačice VR 1530 [31]

Dio obradnog sustava kod AWJM CNC rezačice je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 7.22. Dio obradnog sustava za AWJM rezanje

Na slici 7.22. crvenim okvirom je označen spremnik za dovod abraziva prema mlaznici, odnosno njegovo mješanje s vodenim mlazom, a žutom bojom je označena rezna glava AWJM sustava. Prilikom rezanja, za abraziv upotrebljen je visokoabrazivni vulkanski pijesak (Slika 7.23.).



Slika 7.23. Vulkanski pijesak (abraziv)

Da se uopće moglo izvesti rezanje s abrazivnim vodenim mlazom, potrebno je imati visokotlačnu pumpu (Slika 7.25.) koja potiskuje hidrauličnu tekućinu (ulje) u pojačivač tlaka.



Slika 7.24. Hladnjak vode



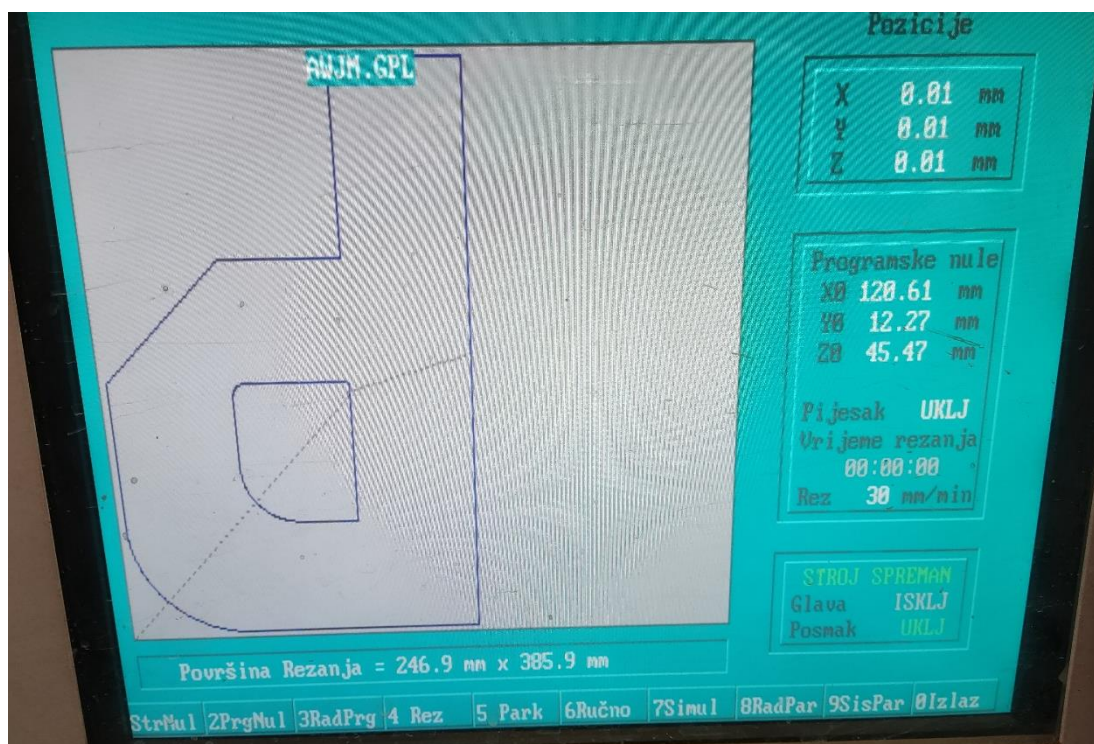
Slika 7.25. Visokotlačna pumpa

Prvi korak bilo je namještanje ploče na radni stol stroja, te njeno poravnavanje do graničnika (Slika 7.26.).



Slika 7.26. Postavljanje ploče do graničnika

Nakon postavljene ploče, uslijedilo je učitavanje programa (AWJM.PLT), njegova pretvorba u .GPL format, te provjera na upravljačkoj jedinici stroja (Slika 7.27.).



Slika 7.27. Učitavanje i provjera programa (AWJM)

Kao što je vidljivo na slici 7.26., brzina koja je postavljena iznosila je 30 mm/min, pozicije po X, Y i Z os su automatski postavljene u odnosu na graničnik (nultočke stroja). Nakon prethodno definiranih koraka, sve je bilo spremno za rezanje testnog uzorka (Slika 7.28.).



Slika 7.28. Proces rezanja (AWJM)

Budući da je prvobitna brzina od 30 mm/min bila premala, povećala se na vrijednost od 81 mm/min, pri čemu na kosinama i kod radijusa dolazi do automatskog smanjenja posmične brzine preko CNC upravljanja na 25 mm/min (Slika 7.29.).



Slika 7.29. Prilagodba brzine rezanja

Na sljedećim slikama prikazan je izrezani testni uzorak, te sam rez koji je proizveo abrazivni vodeni mlaz.



Slika 7.30. Prikaz reza (ulaz i izlaz abrazivnog vodenog mlaza)



Slika 7.31. Odrezani testni uzorak (AWJM)

Vrijeme izrade iznosilo je 34 minute i 27 sekundi.

7.3.1. Izračuni za proces rezanja uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza

Budući da abrazivni vodeni mlaz spada u grupu mehaničkih postupaka, proračun volumena odnesenog materijala u jedinici vremena se vršio prema izrazu (7.5):

$$V_{MRR} = h_t d_f v_f \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (7.5)$$

gdje je:

h_t dubina rezanja [m]

d_f promjer cjevčice za fokusiranje [m]

v_f posmična brzina [m/s]

Unutar programa, zadane su sljedeće vrijednosti:

$$h_t = 6 \text{ mm} = 0,006 \text{ m}$$

$$d_f = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$$

$$v_f = \frac{81 + 25}{2} = 53 \text{ mm/min} = 0,0008833 \text{ m/s}$$

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u izraz (7.5), dobio se sljedeći rezultat:

$$V_{MRR} = 5,3 * 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

Vrijeme izrade se računa prema izrazu (7.6):

$$t_m = \frac{d_f h l}{V_{MRR}} \text{ [s]} \quad (7.6)$$

gdje je:

h debljina rezanja [m]

l duljina rezanja [m]

V_{MRR} volumen odnesenog materijala u jedinici vremena [m³/s]

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u izraz (7.6), dobilo se vrijeme izrade:

$$t_m = \frac{0,001 * 0,006 * 1,41814}{5,3 * 10^{-9}} = 1605,4 \text{ s} = \mathbf{26,76 \text{ min}}$$

To je stvarno efektivno vrijeme rezanja koje ne uzima u obzir prazan hod mlaznice. Trošak materijala je ostao isti kao i u prethodna dva postupka, odnosno **31,941 kn**.

Visokotlačna pumpa tlači vodu pod tlakom od 3500 bar-a i ulje pod tlakom od 130 bar – a. Maseni protok abraziva iznosi **0,14 kg/min** (u našem slučaju **4,823 kg**), a maseni protok vode je **1,05 l/min** (u našem slučaju, utrošeno je **36,1725 l** vode). Cijena abrazivnog pijeska iznosila je **6,86 kn/kg** (u našem slučaju utrošeno je abraziva u vrijednosti od **33,1 kn**). Cijena sata rada stroja za rezanje uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza iznosi **300 kn/h**. U tu cijenu je uračunata cijena sata rada CNC operatera, električna energija, potrošnja abraziva, vode, te amortizacija stroja. Ukoliko se cijena sata rada stroja pomnoži s vremenom izrade, dobiva se trošak od **172,25 kn**.

Na osnovu izraza (7.7) moguće je lako izračunati trošak izrade testnog uzorka:

$$C_{AWJM} = C_{MATERIJAL} + C_{STROJ} \text{ [kn/kom]} \quad (7.7)$$

gdje je:

$C_{MATERIJAL}$ trošak materijala

C_{STROJ} trošak rada stroja

Pa ukupan trošak iznosi:

$$C_{AWJM} = 31,941 + 172,25$$

$$\mathbf{C_{AWJM} = 204,2 \text{ kn/kom}}$$

Iz ovoga se može zaključiti da prilikom upotrebe kvalitetnije visokotlačne pumpe, mogao bi se povećati tlak vode i ulja, te u konačnici smanjiti vrijeme izrade testnog uzorka.

7.3.2. Mjerenje hrapavosti (AWJM)

Nakon izrade testnog uzorka uz pomoć abrazivnog vodenog mlaza i izračuna ukupnog troška, uslijedilo je mjerenje hrapavosti odreza (R_a). Mjerenje se izvodilo isto kao i kod testnog uzorka

dobivenog plazma rezanjem uz pomoć uređaja marke *Mitutoyo SJ-210* (Slika 7.10.). Mjerenje hrapavosti prikazano je na slici 7.32..



Slika 7.32. Mjerenje hrapavosti na dužini „A“ (AWJM)

Prilikom mjerenja hrapavosti odreza, dobivene su sljedeće vrijednosti:

- $R_a = 4,130 \mu\text{m}$ („A“ – Prilog 1)
- $R_a = 3,528 \mu\text{m}$ („B“ – Prilog 1)

Usporedba rezultata za sva tri nekonvencionalna postupka obrade odvajanjem čestica je prikazana u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Rezultati izrade testnog uzorka

Vrsta postupka	V_{MRR} [m ³ /s]	Vrijeme t_m [s]	Trošak C_{UK} [kn/kom]	Hrapavost odreza R_a [μm]	
				A	B
Plazma	$3,24 \cdot 10^{-7}$	99	38,816	1,454	1,408
Plin	$6,48 \cdot 10^{-8}$	318	49,6	3,787	4,484
AWJM	$5,3 \cdot 10^{-9}$	2067	204,2	4,130	3,528

8. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme, nekonvencionalni proizvodni postupci obrade odvajanjem čestica se sve više koriste u svim tipovima industrija, pri rezanju raznovrsnih materijala od vrlo mekih (guma) pa do vrlo tvrdih (čelik).

Cilj ovog rada bio je usporedba tri različita nekonvencionalna postupka na temelju konkretnog testnog uzorka. Iz tablice 7.1. vidljivi su rezultati mjerenja nakon izrade. Plazma rezanjem u odnosu na preostala dva, dobiva se najveći volumen odnesenog materijala u jedinici vremena, najkraće vrijeme izrade što posljedično nosi i najmanji trošak, te na kraju i najbolju kvalitetu odreza.

Kako je plinsko rezanje najoptimalnije za rezanje debljina preko 10 mm, prilikom izrade testnog uzorka došlo je do rastapanja materijala zbog prevelikog utjecaja topline, što posljedično daje najlošiju kvalitetu odreza. Također, vrijeme izrade i trošak je veći u odnosu na plazma rezanje, a volumen odnesenog materijala u jedinici vremena je manji nego kod plazma rezanja.

Prilikom izrade uzorka abrazivnim vodenim mlazom, volumen odnesenog materijala u jedinici vremena je manji u odnosu na plazma rezanje i plinsko rezanje. Vrijeme izrade je najduže, te je posljedično trošak najveći (zbog velikog broja korištenih parametara i sredstava za rad). Kvaliteta odreza je bolja u odnosu na plinsko rezanje, ali s druge strane znatno lošija ukoliko se usporedi s plazma rezanjem.

Iako se na početku smatralo da će abrazivni vodeni mlaz dati najbolje rezultate što se tiče kvalitete, to nije bio slučaj. Razlog tomu može biti brzina rezanja, tvrdoća i granulacija abrazivnog sredstva, te debljina samog materijala.

Najbolji/najoptimalniji postupak pri izradi testnog uzorka bio je plazma rezanje (po svim mjerljivim segmentima), drugi postupak bio bi abrazivni vodeni mlaz (iako je najskuplji i najduže traje, nema deformacije testnog uzorka, te je ostvarena bolja kvaliteta u odnosu na plinsko rezanje), a zadnji/treći postupak bio bi plinsko rezanje kod kojeg je došlo do djelomičnog rastapanja materijala i najlošije kvalitete.

LITERATURA

- [1] Cukor, G.: „*Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica*“, Rijeka 2011.
- [2] Škorić, S.: „*Nekonvencionalni postupci obrade*“, Zagreb 2014.
- [3] El – Hofy, H.: „*Advanced machining process*“, McGraw – Hill, USA 2005.
- [4] Cukor, G.: „*Predavanje 3: WJM, AWJM, IJM*“, Rijeka 2021.
- [5] Youssef, H.A., El – Hofy, H.: „*Machining technology: Machine tools and operations*“, USA 2008.
- [6] S Interneta, <https://www.resato.com/en/waterjetcutting/waterjet-technology/how-it-works/abrsive-vs-pure-water-cutting>, dostupno 29. travnja. 2022.
- [7] Cukor, G.: „*Predavanje 8: EBM i PBM*“, Rijeka 2021.
- [8] S interneta, <https://rightwell.com.my/plasma-cutter>, dostupno 02. svibnja 2022.
- [9] S interneta, <https://www.coursehero.com/file/57118100/PBMpdf/>, dostupno 02. svibnja 2022.
- [10] S interneta, <https://www.laser-ing.hr/blog/princip-rada-plazma-rezaca/>, dostupno 03. svibnja 2022.
- [11] S interneta, <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/understanding-plasma-arc-cutting/>, dostupno 03. svibnja 2022.
- [12] S interneta, <https://hr.top-home-tips.com/5451936-plasma-metal-cutting-and-video-instruction>, dostupno 05. svibnja 2022.
- [13] S interneta, <https://servus.hr/strucni-clanci/plazma-rezanje-nehrdajucih-celika-dio-1/>, dostupno 06. svibnja 2022.
- [14] Simler, H.: „*Plasmafeinstrahlschneiden von Cr-Ni-Staehlen*“, Kjellberg Finsterwalde 2006.
- [15] S interneta, <https://m.made-in-china.com/product/Plasma-Consumbles-Cutting-Nozzle-Tip-Electrode-and-Nozzle-for-CNC-Plasma-Cutting-Machine-1923419582.html>, dostupno 10. svibnja 2022.
- [16] S interneta, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/oxyfuel-cutting-process-and-fuel-gases-049>, dostupno 12. svibnja 2022.
- [17] S interneta, <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-does-the-oxy-fuel-cutting-process-work.cfm>, dostupno 10. svibnja 2022.
- [18] S interneta, <https://fractory.com/suitable-materials-for-oxyfuel-cutting/>, dostupno 13. svibnja 2022.
- [19] S interneta, <https://m.made-in-china.com/product/Medium-Duty-Cylinder-Cart-Welding-Cutting-Kit-for-Gas-Cutting-753376535.html>, dostupno 13. svibnja 2022.
- [20] S interneta, <https://rlsdhamal.com/cause-and-remedies-for-backfires-and-flashbacks-occurring-during-gas-welding-and-cutting-process/>, dostupno 13. svibnja 2022.

- [21] S interneta, <https://www.cnccuttingindia.com/oxy-fuel-cutting-machines.html>, dostupno 14. svibnja 2022.
- [22] S interneta, <https://www.eagletec-cnc.com/cnc-plasma-table/gantry-cnc-flame-cutting-machine.html>, dostupno 14. svibnja 2022.
- [23] Bhatia, A.: „*Fundamentals of Gas Cutting and Welding*“, Continuing Education and Development, Inc.
- [24] Smith, F.: „*OXY – Fuel Cutting*“, SOLAS 2014.
- [25] S interneta, https://www.justdial.com/jdmart/Coimbatore/Vasumathi-Cnc-Gas-Cutting-Near-Infant-Jesus-School-Sanganur/0422PX422-X422-130918162244-A8W6_BZDET/catalogue, dostupno 21. svibnja 2022.
- [26] S interneta, <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-flame-cutting.cfm>, dostupno 22. svibnja 2022.
- [27] Kraut, B.: „*Strojarski priručnik*“, Tehnička knjiga, Zagreb 1988.
- [28] S interneta, <https://www.thinksai.com/en-eu/products/enroute>, dostupno 08. srpnja 2022.
- [29] S interneta, <http://www.cnc-teh.hr/>, dostupno 23. srpnja 2022.
- [30] S interneta, <https://www.hoffmann-group.com/HR/hr/rotometal/Mjerna-tehnika/Mjerni-i-ispitni-ure%C4%91aji/Ure%C4%91aji-za-mjerenje-konture-i-hrapavosti/Pertometar/p/499205-SJ210>, dostupno 11. kolovoza 2022.
- [31] S interneta, <https://qdoc.tips/obrada-odvajanjem-skripta-pdf-free.html>, dostupno 14. kolovoza 2022.

POPIS SLIKA

Slika 3.1. AWJM [4]	4
Slika 3.2. Elementi AWJM [3]	5
Slika 3.3. Strukture materijala abrazivnih zrna [4]	5
Slika 3.4. Injekcijski i suspenzijski načini stvaranja AWJM [3]	6
Slika 3.5. Nagibanje mlaznice [6]	7
Slika 3.6. Rad s više mlaznica istovremeno [4]	7
Slika 3.7. Obradni sustav (AWJM) [4]	8
Slika 3.8. Mlaznica (AWJM) [4]	9
Slika 4.1. PBM [7]	11
Slika 4.2. Obrada mlazom plazme (PBM) [8]	12
Slika 4.3. Rezanje metala plazma lukom [11]	13
Slika 4.4. Prenosivi luk [7]	13
Slika 4.5. Neprenosivi luk [7]	14
Slika 4.6. Ručno rezanje plazmom [12]	15
Slika 4.7. Plazma rezanje bez prisutnog sekundarnog medija [7]	16
Slika 4.8. Podvodno plazma rezanje [10]	17
Slika 4.9. Zaštita plazmenog luka uz pomoć vode [7]	17
Slika 4.10. Zaštita plazmenog luka uz pomoć plina [7]	18
Slika 4.11. Brzine rezanja nehrđajućeg čelika različitim postupcima [13]	18
Slika 4.12. Ograničene debljine rezanja nehrđajućeg čelika [13]	19
Slika 4.13. Varijante plazma rezanja Cr-Ni čelika (nehrđajućeg čelika) [13]	19
Slika 4.14. Zona utjecaja topline [13]	20
Slika 4.15. Obradni sustav (PBM) [7]	21
Slika 4.16. Plazmeni gorionik [15]	22
Slika 4.17. Dijelovi plazmenog gorionika [7]	23
Slika 5.1. Princip plinskog rezanja [16]	25
Slika 5.2. Plinsko rezanje [18]	26
Slika 5.3. Oprema za ručno plinsko rezanje [19]	27
Slika 5.4. Ručno plinsko rezanje [20]	27
Slika 5.5. Automatizirano plinsko rezanje [21]	28
Slika 5.6. Automatiziran način rada s više mlaznica [22]	28
Slika 5.7. Dizajn mlaznice i acetilenski plinski mlaz [16]	30
Slika 5.8. Dizajn mlaznice i propan plinski mlaz [16]	30

Slika 5.9. Dizajn mlaznica [24]	31
Slika 5.10. Plinsko rezanje materijala debljine 200 mm [25]	32
Slika 6.1. Prikaz testnog uzorka u SolidWorks – u	35
Slika 6.2. Sučelje programa EnRoute	37
Slika 6.3. Naredba za definiranje dimenzija ploče	38
Slika 6.4. Odabir dimenzija ploče	38
Slika 6.5. Prikaz ploče	39
Slika 6.6. Učitavanje testnog uzorka	39
Slika 6.7. Učitavanje i označavanje testnog uzorka	40
Slika 6.8. Naredba za centriranje testnog uzorka unutar ploče	40
Slika 6.9. Odabir margine i razmaka	41
Slika 6.10. Centrirani testni uzorak	41
Slika 6.11. Naredba za odabir parametara rezanja	42
Slika 6.12. Odabir širine reza	42
Slika 6.13. Odabir strategije, tipa ulaza	43
Slika 6.14. Odabir tipa izlaza i preklopa	43
Slika 6.15. Automatski postavljeni ulaz i izlaz	44
Slika 6.16. Naredba za prilagodbu ulaza i izlaza mlaza plazme	44
Slika 6.17. Nova pozicija ulaza i izlaza na konturama	45
Slika 6.18. Naredba za simulaciju programa	45
Slika 6.19. Provjera ispravnosti programa (plazma rezanje)	46
Slika 6.20. Naredba za spremanje programa	46
Slika 6.21. Dijaloški okvir naredbe za spremanje programa	47
Slika 6.22. Izmjena duljine izlaza mlaza plina	47
Slika 6.23. Skraćeni izlaz mlaza plina	48
Slika 6.24. Provjera ispravnosti programa (plinsko rezanje)	48
Slika 6.25. Izmjena oblika i duljine ulaza (AWJM)	49
Slika 6.26. Izmjena oblika i duljine izlaza (AWJM)	49
Slika 6.27. Provjera ispravnosti programa (AWJM)	50
Slika 7.1. CNC rezačica DS – CUT	52
Slika 7.2. Mlaznica i elektroda (PBM)	52
Slika 7.3. Spajanje plazmenog gorionika	53
Slika 7.4. Učitavanje programa i njegova provjera	53
Slika 7.5. Namještanje parametara programa (PBM)	54
Slika 7.6. Hypertherm powermax 105	54

Slika 7.7. Proces rezanja testnog uzorka (PBM).....	55
Slika 7.8. Odrezani testni uzorak (PBM)	55
Slika 7.9. Prikaz odrezne površine (PBM).....	56
Slika 7.10. Mitutoyo SJ-210.....	59
Slika 7.11. Mjerenje hrapavosti na dužini „A“ (PBM)	59
Slika 7.12. Mlaznica i elektroda (plinski gorionik).....	60
Slika 7.13. Postavljanje plinskog gorionika	61
Slika 7.14. Namještanje parametara programa (plinsko rezanje).....	62
Slika 7.15. Namještanje tlakova za grijanje i rezanje.....	62
Slika 7.16. Plinsko rezanje testnog uzorka.....	63
Slika 7.17. Odrezani testni uzorak (plinsko rezanje)	63
Slika 7.18. Izgled odrezne površine (plinsko rezanje)	64
Slika 7.19. Mjerenje hrapavosti na dužini „A“ (plinsko rezanje)	66
Slika 7.20. CNC rezačica VR 1530.....	67
Slika 7.21. Obradni sustav CNC rezačice VR 1530 [31]	67
Slika 7.22. Dio obradnog sustava za AWJM rezanje.....	68
Slika 7.23. Vulkanski pijesak (abraziv)	68
Slika 7.24. Hladnjak vode	69
Slika 7.25. Visokotlačna pumpa.....	69
Slika 7.26. Postavljanje ploče do graničnika.....	70
Slika 7.27. Učitavanje i provjera programa (AWJM)	70
Slika 7.28. Proces rezanja (AWJM)	71
Slika 7.29. Prilagodba brzine rezanja.....	71
Slika 7.30. Prikaz reza (ulaz i izlaz abrazivnog vodenog mlaza).....	72
Slika 7.31. Odrezani testni uzorak (AWJM)	72
Slika 7.32. Mjerenje hrapavosti na dužini „A“ (AWJM).....	75

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Korelacija fizikalnih svojstava kod različitih plazmenih plinova [7]	22
Tablica 6.1. Kemijski sastav materijala [27]	36
Tablica 6.2. Ulazni podaci za EnRoute [28]	37
Tablica 7.1. Rezultati izrade testnog uzorka	75

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLISKOM JEZIKU

Sažetak:

Iako je u današnje vrijeme zastupljenja klasična obrada odvajanjem čestica, sve više se počinju koristiti nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica. U teoretskom dijelu objašnjeni su osnovni principi rada, obradni sustavi, utjecajni parametri na volumen odnesenog materijala u jedinici vremena, te prednosti i nedostaci dotičnih postupaka. U praktičnom dijelu najprije je bilo potrebno konstruirati testni uzorak na kojem će se vršiti testiranja, mjerenja te izračuni. Nakon konstruiranog testnog uzorka, izvršeno je programiranje u softverskom programu *EnRoute* za svaki postupak pojedinačno. Na kraju izvršeno je rezanje, izračun zadanih parametara, mjerenje hrapavosti odreza, te određivanje najoptimalnijeg nekonvencionalnog postupka.

Ključne riječi: nekonvencionalni proizvodni postupci, aditivna proizvodnja, abrazivni vodeni mlaz, plazma rezanje, plinsko rezanje, testni uzorak, *EnRoute*, CNC rezačica, izračuni, mjerenje

Summary:

Although in today's time of representation the classical processing by particle separation is increasingly being used, unconventional processing procedures by particle separation are being used. In the theoretical part, the basic principles of work, processing systems, influencing parameters on the volume of removed material per unit of time, and the advantages and disadvantages of the procedures in question are explained. In the practical part, it was first necessary to construct a test sample on which tests, measurements and calculations will be performed. After the constructed test sample, programming was carried out in the *EnRoute* software program for each procedure individually. At the end, the cutting was performed, the calculation of the given parameters, the measurement of the roughness of the cut, and the determination of the most optimal nonconventional procedure.

Keywords: unconventional manufacturing processes, additive manufacturing, abrasive water jet, plasma cutting, gas cutting, test sample, *EnRoute*, CNC cutter, calculations, measurement

PRILOZI

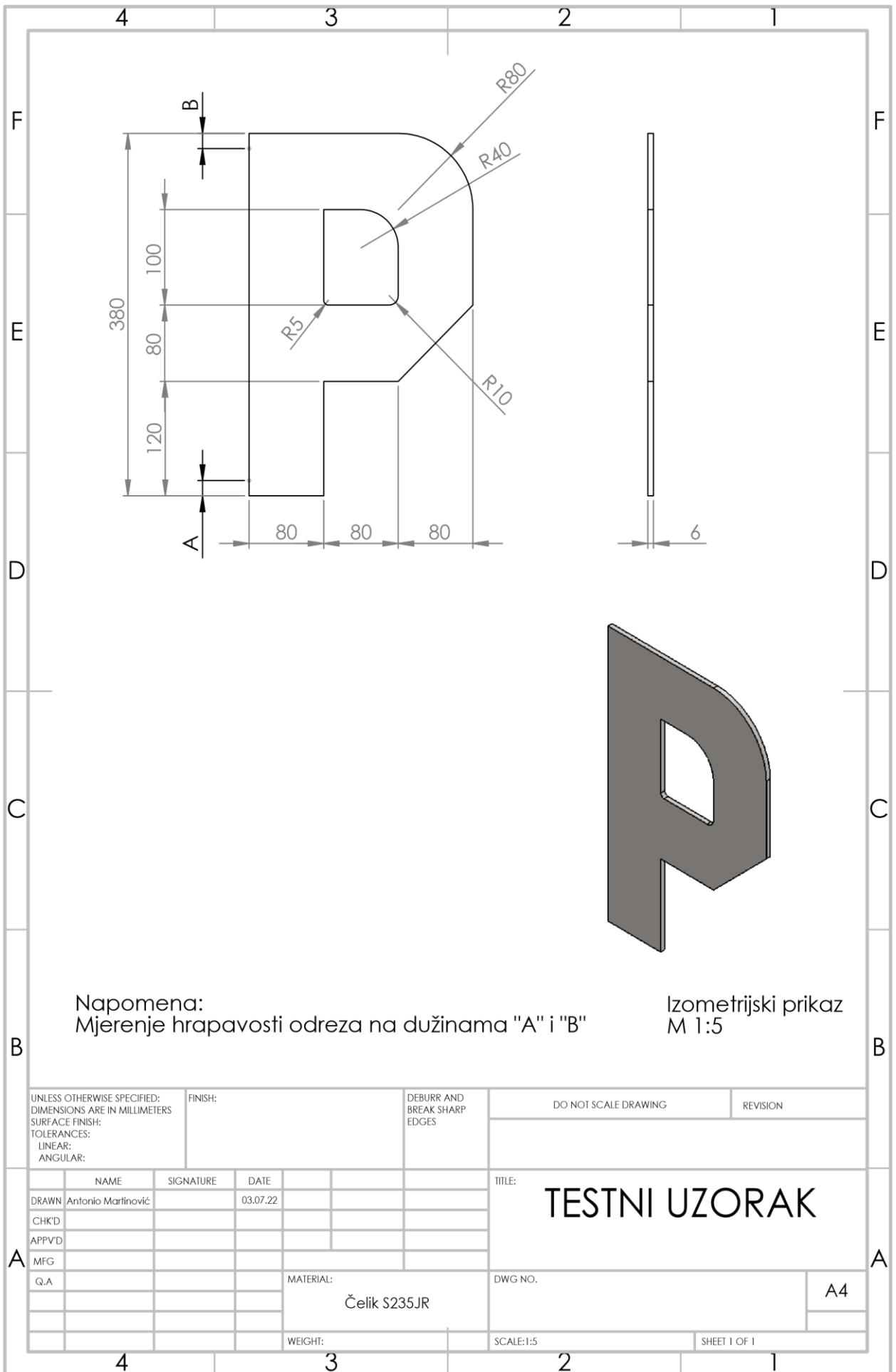
1. RADIONIČKI NACRT TESTNOG UZORKA

2. ENROUTE PROGRAMI

2.1. PLAZMA.PLT

2.2. PLINSKO.PLT

2.3. AWJM.PLT



Napomena:
Mjerenje hrapavosti odreza na dužinama "A" i "B"

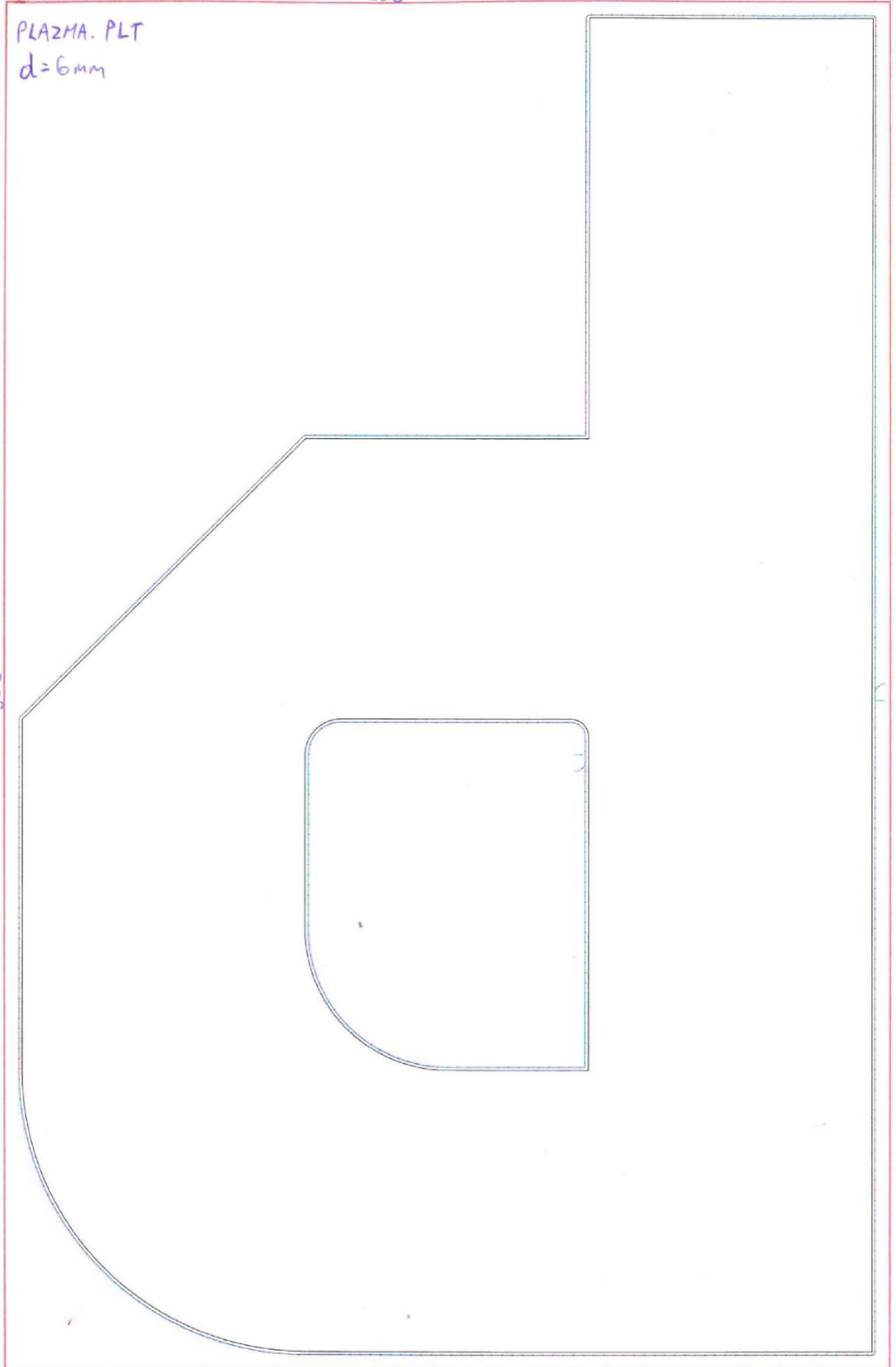
Izometrijski prikaz
M 1:5

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN Antonio Martinović		SIGNATURE		DATE 03.07.22		TITLE: TESTNI UZORAK			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL: Čelik S235JR		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:5		SHEET 1 OF 1	

250

PLAZMA. PLT
 $d=6\text{mm}$

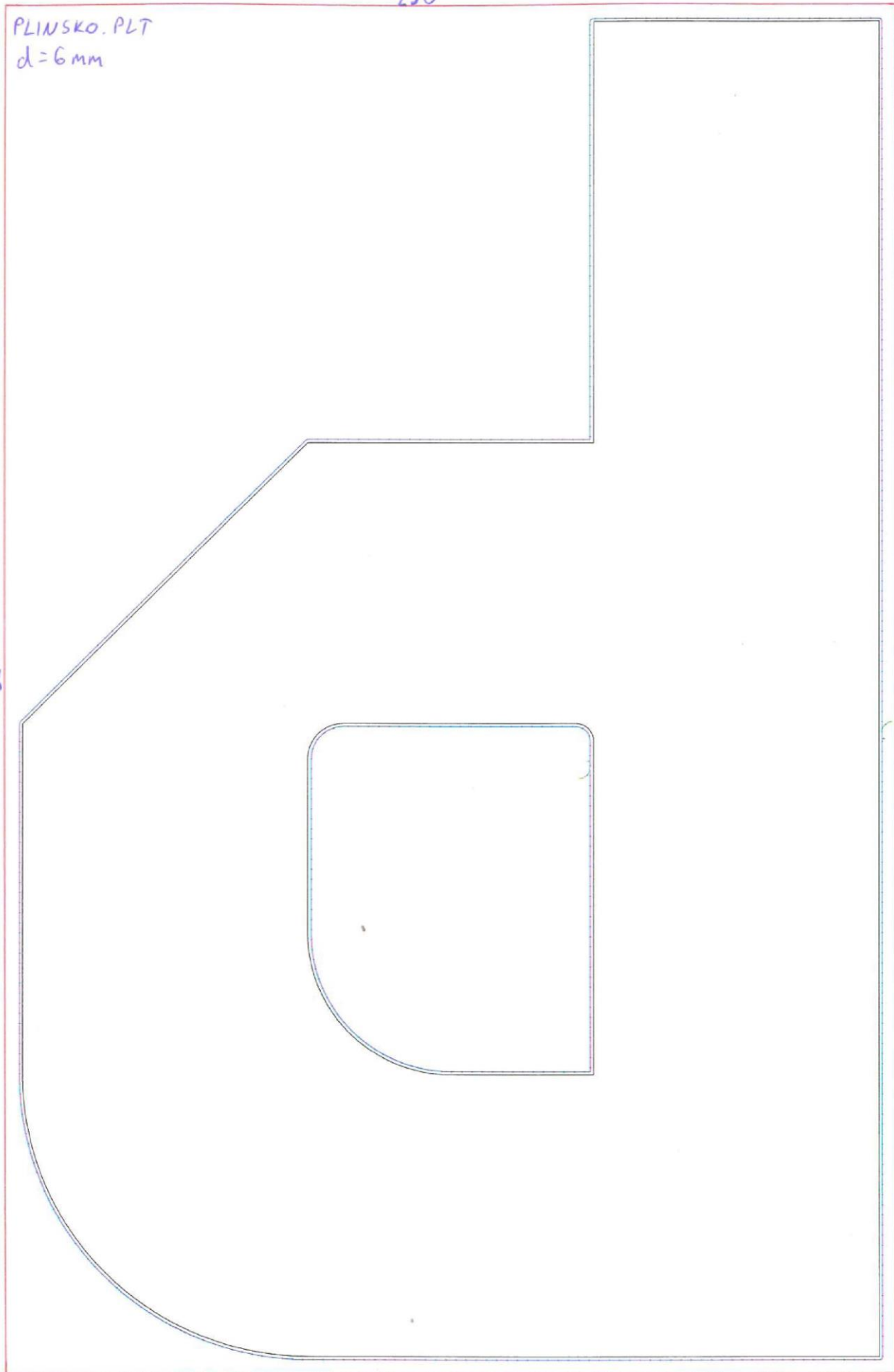
390



250

PLINSKO.PLT
d=6mm

390



250

AWJM. PLT
 $d=6\text{ mm}$

390

