

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI RAD

**PREGLED TERMoeLEKTRIČNIH POSTUPAKA
OBRADE METALA S NAGLASKOM NA REZANJE
PLAZMENIM MLAZOM**

Ivan Peko

Split, lipanj 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TERMOELEKTRIČNI POSTUPCI OBRADJE METALA.....	3
2.1. Postupak obrade elektroerozijom	3
2.2. Postupak obrade elektronskim snopom	8
2.3. Postupak obrade ionskim snopom	14
2.4. Postupak obrade laserskom zrakom	18
2.5. Postupak rezanja metala plazmenim mlazom.....	26
2.5.1. Uvodno o plazmi	29
2.5.2. Opis tehnologije rezanja metala plazmenim mlazom	31
2.5.3. Varijante postupka rezanja metala plazmenim mlazom	35
2.5.3.1. Konvencionalni postupak rezanja plazmenim mlazom	35
2.5.3.2. Postupak rezanja plazmenim mlazom sa sekundarnim plinom	35
2.5.3.3. Postupak rezanja plazmenim mlazom s injektiranjem vode	36
2.5.3.4. Postupak rezanja plazmenim mlazom pod vodom	37
2.5.3.5. Postupak rezanja s povećanim suženjem plazmenog mlaza	38
3. UTJECAJNI FAKTORI NA KVALITET REZA	40
4. DOSADAŠNJA ZNANSTVENA ISTRAŽIVANJA.....	47
5. ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA	57
LITERATURA	59
SAŽETAK	64

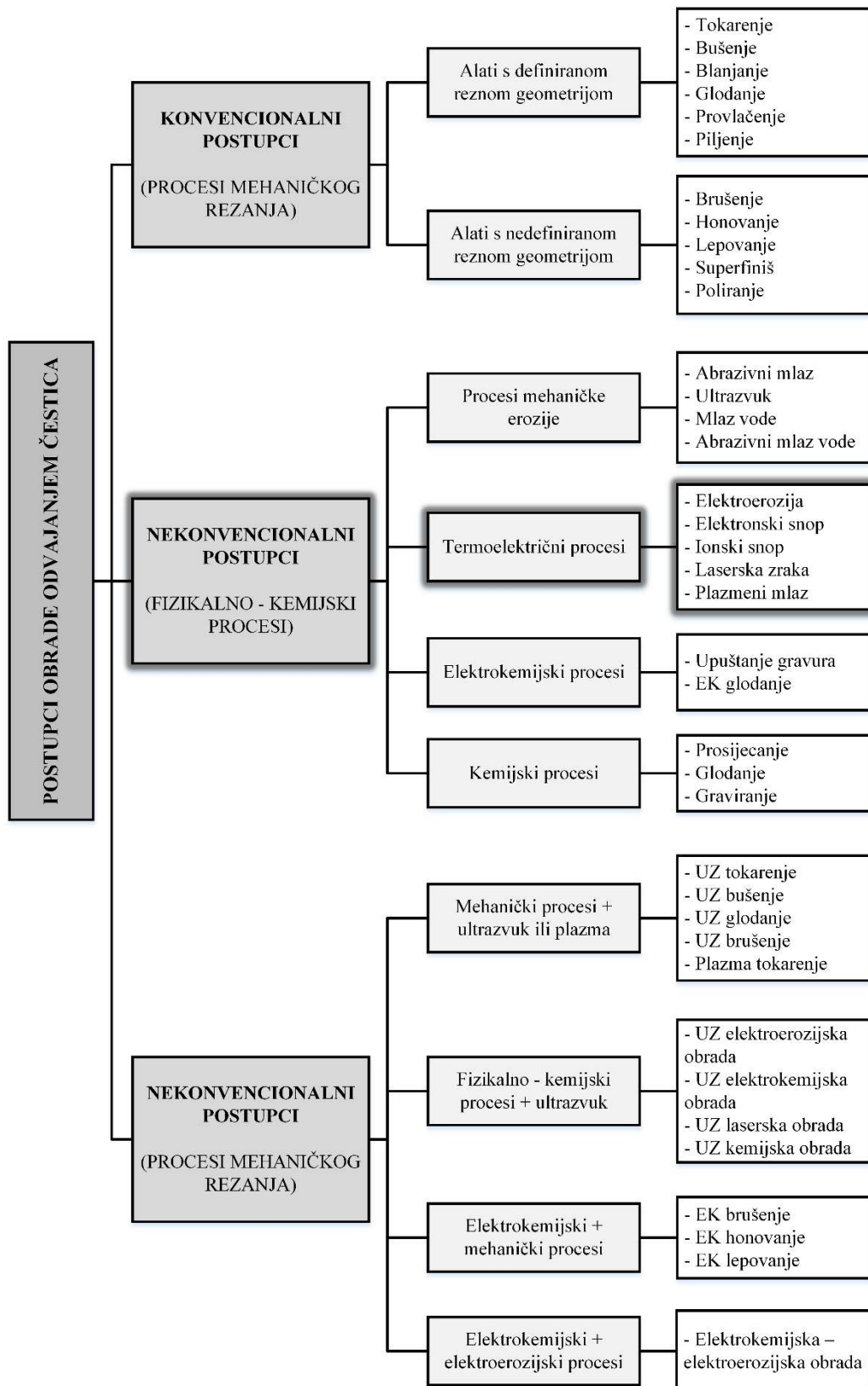
1. UVOD

Proizvodni proces se definira kao proces rada kojim se izravno i svrsihodno djeluje na materijal ili obradak te tako povećava njegova vrijednost. On se može definirati i kao skup svih zbivanja koja izravno ne pridonose povećanju vrijednosti materijala ili obratka, ali su nužna za odvijanje cjelokupnog procesa. Tehnološki proces je dio proizvodnog procesa u kojem se vrši postupna promjena stanja obratka u skladu s unaprijed definiranim tehničkim zahtijevima te se njime određuje način i redoslijed izvođenja tehnoloških operacija kojima se iz polaznog materijala, pod određenim uvjetima, izrađuje dio, sklop ili proizvod s određenim alatima i napravama na određenim strojevima u određenom vremenu. Tehnologija se može definirati kao znanost o tehničkim postupcima pri preradbi sirovina u proizvode. Tehnologija i tehnološki proces predstavljaju temelje svake proizvodnje.

Turbulentno globalno tržište, neprestana utrka s konkurencijom, važnost kvalitete i rokova izrade proizvoda nameću potrebu stalnog uvođenja tehnoloških inovacija u postojećim proizvodnim procesima ili usvajanje potpuno novih proizvodnih tehnologija. Visoke tehnološke razine primjenjene tehnologije i tehnološkog procesa su preduvjeti suvremene i profitabilne proizvodnje, ali i strateško razvojno pitanje svake proizvodne tvrtke. Uvođenjem nove tehnologije ili revitalizacijom postojeće postiže se veća razina kvalitete proizvoda, smanjuje se vrijeme izrade po jedinici proizvoda i potrošnja energije za izradu proizvoda.

Suvremeni tehnološki razvoj karakterizira pronalazak velikog broja materijala koji se koriste u različitim granama ljudske djelatnosti. Paralelno s njima dolazi do poboljšanja konvencionalnih tehnoloških postupaka i razvoja novih nekonvencionalnih tehnologija. Nekonvencionalne tehnologije omogućile su obradu bez uobičajenih ograničenja u odnosu na svojstvo obradivosti materijala te izradu proizvoda konstrukcijskih i geometrijskih značajki koji se nisu mogli izrađivati tradicionalnim postupcima obrade. Nekonvencionalni postupci obrade su postupci kod kojih se uklanjanje viška materijala, izmjena njegove strukture te izmjena početnog oblika i dimenzija obratka ostvaruje korištenjem mehaničke, termoelektrične, kemijske, elektrokemijske, svjetlosne, magnetske, nuklearne i drugih oblika energije dovedenih neposredno u zonu djelovanja na materijal, zonu modifikacije ili uklanjanja materijala.

Svaki od nekonvencionalnih postupaka ima svoje područje primjene te određene prednosti i nedostatke. U ovom radu naglasak je stavljen na termoelektrične nekonvencionalne postupke obrade metala, slika 1.1. Za svaki od njih je dan osnovni prikaz s time da je najveća pozornost posvećena postupku rezanja metala plazmenim mlazom.



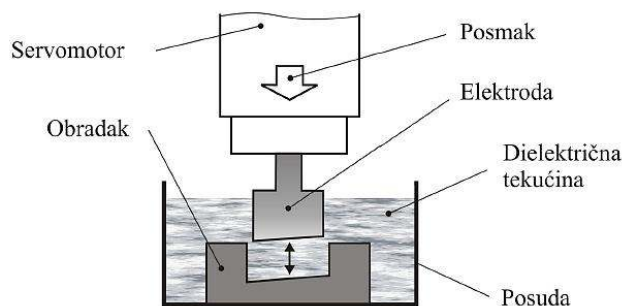
Slika 1.1. Postupci obrade materijala, [1]

2. TERMOELEKTRIČNI POSTUPCI OBRADE METALA

2.1. Postupak obrade elektroerozijom

Elektroerozijski postupak obrade razvijen je u SSSR-u i SAD-u tijekom 2. svjetskog rata. U SSSR-u su znanstvenici Boris i Natalia Lazarenko 1943. godine razvili stroj koji je stvarao električne pulseve s pomoću električnog kruga s otpornikom i kondenzatorom. Takav stroj su iskoristili za kontroliranu obradu teškoobradivih materijala. U isto vrijeme, u SAD-u u jednoj zrakoplovnoj tvrtki, radnici Harold Stark, Victor Harding i Jack Beaver su razvili stroj koji je iskrenjem kod prekida strujnog kruga, postupno erodirao materijal [2, 3].

Obrada materijala elektroerozijom (EDM) (eng. Electrical discharge machining) je postupak obrade električki vodljivih materijala s pomoću precizno kontroliranih izboja koji nastaju između elektrode i predmeta obrade u prisustvu dielektričnog sredstva. Elektroda se smatra reznim alatom. Elektroerozijska obrada potapanjem (SEDM) (eng. Sinking electrical discharge machining) kao alat koristi elektrodu točno suprotnog oblika od oblika obratka koji je potrebno postići ("negativ"). Kod elektroerozijske obrade žicom (WEDM) (eng. Wire electrical discharge machining) elektroda je žica te izboji nastaju između jedne strane žice i površine obratka [4].

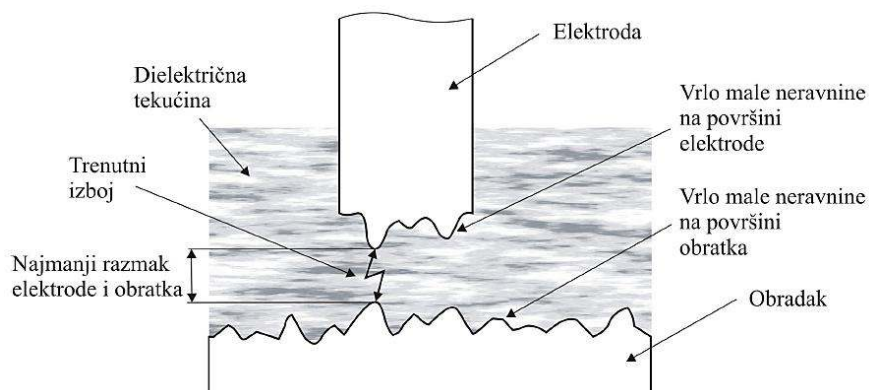


Slika 2.1. Elektroerozijska obrada potapanjem (SEDM), [2]

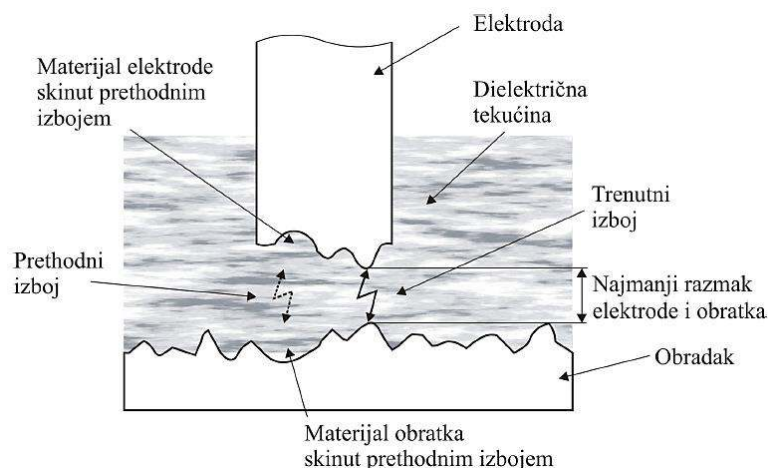
Elektroerozijska obrada se razlikuje od konvencionalnih postupaka obrade time što elektroda ne stvara fizički kontakt s materijalom obratka pa su samim time i sile rezanja male ili zanemarive. Elektroda mora uvijek biti odvojena od materijala obratka, ali na dovoljnoj udaljenosti kako bi se omogućilo stvaranje izboja. Ako elektroda stupi u kontakt s površinom obratka, električni izboj prestaje i zaustavlja se proces erozije materijala.

Tijekom odvijanja elektroerozije, električni izboji se pomiču iz jedne točke elektrode u drugu. Izboj odvaja materijal i s površine obratka i s elektrode čime se povećava udaljenost

između njih u tom trenutku. Ovo uzrokuje pojavu stvaranja sljedećeg izboja na mjestu najmanjeg razmaka između elektrode i površine obratka, slike 2.2 i 2.3.



Slika 2.2. Mjesto stvaranja izboja, [2]

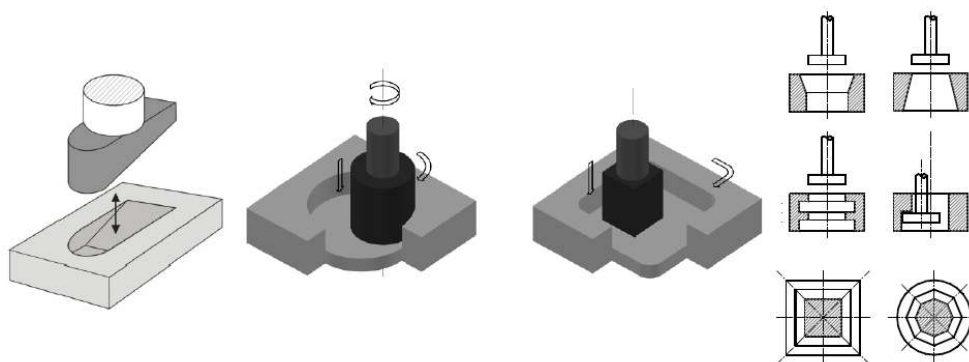


Slika 2.3. Premještanje izboja, [2]

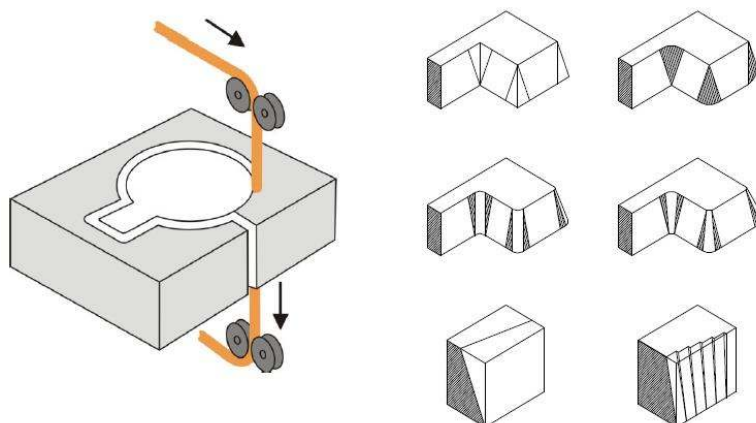
Na području gdje se pojavljuje izboj razvija se visoka temperatura, no dielektrična tekućina hladi i elektrodu i površinu obratka. Dielektrična tekućina je elektroizolator koji se kod pojave dovoljno velikog električnog napona pretvara u električni vodič. Dielektrična tekućina ostaje izolator, osim na mjestu gdje su elektroda i površina obratka najbliži. U toj točki električni napon uzrokuje promjenu svojstva dielektrične tekućine iz izolatora u vodič, što omogućuje stvaranje električnog izboja. Ova promjena svojstva dielektrične tekućine događa se kod svakog izboja. Kod SEDM postupka kao dielektrična tekućina koristi se ugljikohidratno ulje u koje je uronjen obradak i elektroda, a kod WEDM postupka deionizirana voda. Ova tekućina ima funkciju: kontroliranja razmaka između elektrode i predmeta obrade, hlađenja zagrijanog odvojenog materijala kako bi se oblikovale odvojene čestice te uklanjanja odvojenih čestica iz područja obrade [2].

Pri svakom električnom izboju, odvoji se mala količina materijala elektrode i obratka. Taj materijal se po prestanku izboja skrućuje i skuplja u rascjepu između elektrode i površine obratka. Za učinkovitu obradu čestice materijala odvojene elektroerozijom trebaju biti uklonjene iz područja obrade. Kod SEDM postupka to je moguće postići ispiranjem od gore, ispiranjem i usisavanjem kroz elektrodu ili ispiranjem s pomoću gore-dolje pomaka elektrode. WEDM postupak kao elektrodu koristi kontinuiranu žicu, izrađenu od bakra, bronce ili slitine volframa promjera 0.02 do 0.3 mm. Ovdje gibanje elektrode pomaže u učinkovitom ispiranju, ali ipak najveću ulogu ima pritisak tekućine u smjeru osi elektrode.

SEDM postupak se obično koristi za proizvodnju trodimenzionalnih oblika, primjerice kalupa ili obradaka s provrtima dok se WEDM postupak, s obzirom da žica mora proći kroz materijal koji se obrađuje, koristi isključivo za obradu predmeta čije su vanjske površine i površine provrta obradive žicom postavljenom između vodilica stroja, slike 2.4 i 2.5 [2].



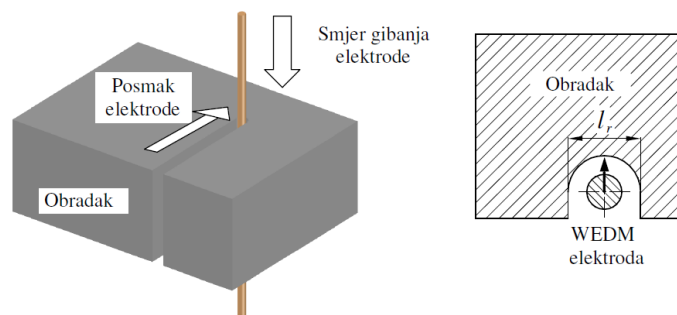
Slika 2.4. Načela i mogućnosti obrade SEDM postupkom, [2]



Slika 2.5. Načela i mogućnosti obrade WEDM postupkom, [2]

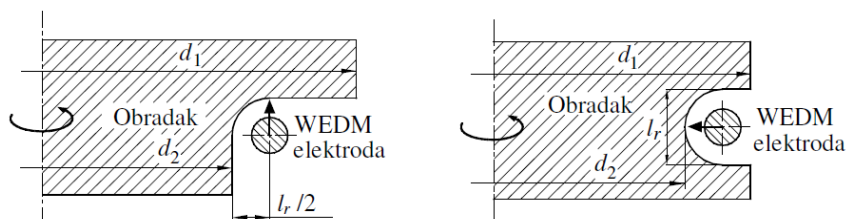
Cilindričan postupak elektroerozije žicom (CWEDT) (eng. Cylindrical wire electrical discharge machining) predstavlja kombinaciju WEDM postupka i rotacijskog uređaja koji služi za prihvatanje i rotaciju obratka tijekom procesa odvajanja materijala. Ovim postupkom se mogu obrađivati cilindrični obratci ili cilindrični dijelovi obradaka sa složenom geometrijom u samo jednom stezanju. Kao i kod tradicionalnog tokarenja i kod CWEDT postupka obradak se rotira, a alat (elektroda) izvodi posmično gibanje. Osnovna prednost ovog postupka u odnosu na tradicionalne postupke jest obrada s vrlo malim silama, a nedostatak je veća količina vremena koja se potroši da bi se izradio obradak. Da bi se odvojio materijal obratka, CWEDT postupak iskorištava toplinsku energiju električnog pulsa kako bi se erodirao neželjeni materijal i dobio traženi oblik obratka [2].

Gibanje elektrode (žice) prema obratku je različito kod WEDM i CWEDT postupka. Kod WEDM postupka obradak za vrijeme procesa miruje, a elektroda se giba konstantnom brzinom u smjeru okomitom na obradak, slika 2.6.



Slika 2.6. WEDM postupak obrade, [2]

Kod CWEDT postupka, kao što je već rečeno, obradak izvodi rotacijsko gibanje, a elektroda posmično, slika 2.7. Gibanje elektrode u odnosu na obradak nije uvijek pravocrtno niti se odvija uvijek istom relativnom brzinom, nego postoji više komponenata brzine koje zajedno čine rezultatnu relativnu brzinu. Za razliku od WEDM postupka, vrijednosti komponenata brzina koje se pojavljuju tijekom obrade su različite preko cijele dužine "kontakta" elektrode i obratka [2].



Slika 2.7. Uzdužni i poprečni CWED postupak obrade, [2]

Glavni zahtijevi koje treba zadovoljiti elektroda u postupku obrade elektroerozijom su: visoka električna vodljivost, otpornost na trošenje, dovoljna rastezna čvrstoća te optimalne značajke ispiranja materijala. Visoka električna vodljivost preduvjet je za dovođenje velikog postotka energije kroz elektrodu na mjesto nastajanja izboja. Ta energija je potrebna za odvajanje čestica materijala obratka. Što je veća vodljivost to su manji gubici energije, a veća je proizvodnost samog postupka. Rastezna čvrstoća elektrode mora biti dovoljna da bi se omogućila ravnost elektrode kod rastezanja uz minimalne vibracije koje proizvode vodilice stroja. Otpornost elektrode na trošenje mora biti tolika da oštećenja uslijed izboja ne smanje presjek elektrode do razine kada zbog sile rastezanja dolazi do pucanja elektrode i zaustavljanja obrade [2].

Najčešći materijali koji se koriste za izradu elektroda su: bakar, grafit, volfram i volframov karbid. Bakar se odlikuje vrlo visokom električnom vodljivošću, no problem predstavlja njegova mala rastezna čvrstoća, stoga se kao alternativa bakru za izradu elektroda često koristi i mjed. Mjed predstavlja kombinaciju 63 – 65% bakra te 35 – 37% cinka što mu omogućava znatno veću rasteznu čvrstoću u odnosu na bakar. Elektrode od mjedi su dostupne na tržištu u širokom rasponu promjera, rastezne čvrstoće i cijene. Zbog dobre električne vodljivosti i rastezne čvrstoće, one imaju jezgru od mjedi ili bakra, a zbog boljeg formiranja izboja i značajki ispiranja presvučene su cinkom. Presvučene elektrode mogu rezati većim brzinama i dostupne su u većem broju kombinacija materijala, promjera i rastezne čvrstoće. Prilikom precizne i mikroobrade koriste se obično elektrode od molibdena i volframa [2, 5].



Slika 2.8. Različiti izradci dobiveni postupkom elektroerozije, [6]

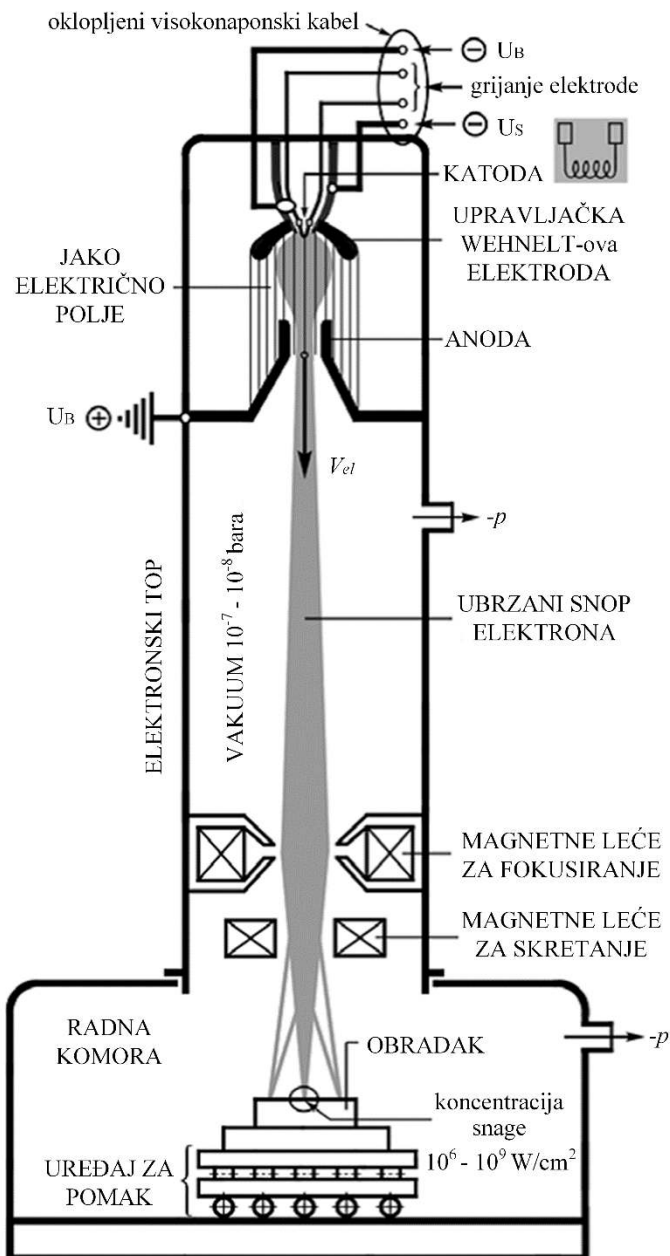
Glavne prednosti ovog postupka obrade u odnosu na konvencionalne postupke su: moguća je izrada složenih geometrijskih oblika s visokom točnošću (reda veličine nekoliko μm), obradak nije izložen silama za vrijeme obrade (moguće je obrađivati krhke obratke), kvaliteta obrađene površine je dobra (moguće je ostvariti R_z i do $0.4 \mu\text{m}$), visoka proizvodnost. Glavni

nedostaci su: moguća je obrada samo električki vodljivih materijala, obrada je spora, postupak je isplativ samo kod velikoserijske i masovne proizvodnje, zahtijeva se veći utrošak električne energije po cm^3 odvojenog materijala. Postupak obrade elektroerozijom je široko zastupljen i ekonomski opravdan za izvođenje različitih operacija kod teško obradivih materijala, ali i kod obrade dijelova i površina složenog geometrijskog oblika od inače dobro obradivih materijala. On se ipak najčešće koristi kod izrade: kalupa za kovanje i prešanje, kalupa za tlačno lijevanje, alata za probijanje i presijecanje, dijelova s uskim prorezima, dijelova s plitkim i dubokim otvorima, dijelova sa složenim površinama, tankostijenih dijelova itd., slika 2.8 [7].

2.2. Postupak obrade elektronskim snopom

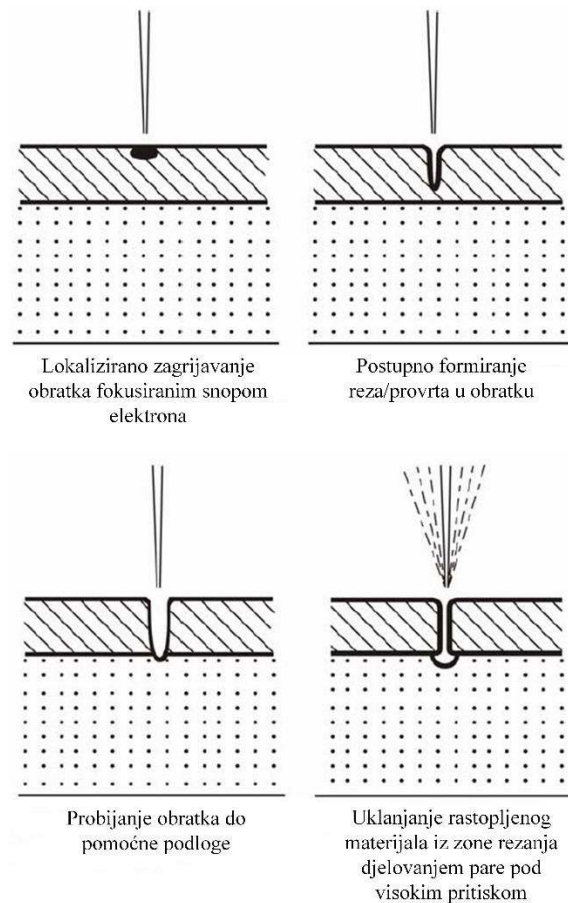
Za početak primjene snopa elektrona u obradi materijala zaslužan je Dr. K. H. Steigerwald koji je 1947. godine izradio prototip uređaja za topljenje metala u vakuumu bombardiranjem pomoću snopa elektrona. 1958. godine njemačka tvrtka "Carl Zeiss" izradila je prvi industrijski uređaj za rezanje i zavarivanje pomoću snopa elektrona (EBM) (eng. Electron beam machining). Od početka šezdesetih godina prošlog stoljeća postupak obrade materijala snopom elektrona se počeo koristiti i u industriji, isprva za potrebe zavarivanja u nuklearnoj i svemirskoj industriji, a kasnije i za druge šire primjene, poput bušenja i rezanja vrlo sitnih provrta i šupljina u obradcima [8].

Kao što je već spomenuto, temelj ovog postupka je visokoenergetski snop elektrona. Uređaj u kojem se odvija stvaranje snopa i obrada prikazan je na slici 2.9. Elektroni se stvaraju na katodi koja je zagrijana električnim putem na temperaturu od oko $2500 - 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Katoda je izrađena od volframa ili tantala. Struja elektrona koja izlazi iz katode regulira se i oblikuje pomoću Wehneltove elektrode koja ima čašasti oblik. Djelovanjem vrlo snažnog električnog polja između katode i anode, elektroni se ubrzavaju te se tako ubrzani u snopu kreću prema obratku. Nakon što napuste anodu elektroni mogu doseći brzinu od čak 50 do 80% brzine svjetlosti. Ispod anode se nalaze magnetne leće koje imaju ulogu refokusiranja snopa elektrona i smanjenja njegove divergencije. Na ovaj način se povećava kvaliteta snopa i zadržava smjer njegovog kretanja prema obratku. Nakon toga snop elektrona prolazi kroz magnetne leće za skretanje. One pomiču snop za vrlo malu vrijednost i usmjeravaju ga u točno određenu točku na obratku gdje je potrebno izvršiti određenu operaciju. Najčešće se radi o rezanju materijala ili zavarivanju. Također, suvremeni strojevi imaju ugrađene i teleskopske i svjetlosne sustave za točnije poravnanje snopa s obratkom. Tijekom procesa, i snop elektrona i obradak trebaju biti smješteni u vakuumu. Time se sprječava rasipanje energije elektrona i usporava se trošenje katode [9].



Slika 2.9. Uređaj za obradu snopom elektrona, [10]

U trenutku udara fokusiranog snopa ubrzanih elektrona u površinu obratka dolazi do pretvaranja njegove kinetičke energije u toplinsku. Snop elektrona udara u obradak u točki promjera 10 – 100 μm . Razvijena toplina izaziva čitav niz popratnih procesa kao što su: zagrijavanje, topljenje, isparavanje i sagorijevanje materijala uz pojavu eksplozivnog izbacivanja rastopljenog dijela i čestica materijala obratka [8]. Na slici 2.10 prikazan je cijeli tijek tog postupka.



Slika 2.10. Uklanjanje materijala kod postupka obrade snopom elektrona, [11]

Utjecajni parametri koji utječu na proces obrade su: napon i jakost struje elektronskog snopa, kontinuirani ili impulsni način rada, trajanje pulsa, energija pulsa, promjer i gustoća snopa te brzina kretanja snopa po površini obratka, [11]. Za razliku od zavarivanja snopom elektrona gdje se koristi kontinuirani način rada, za rezanje i izradu šupljina, provrta i gravura prikladniji je impulsni mod. Jakost struje snopa se obično kreće u intervalu od $200 \mu\text{A}$ do 1 A , a napon ubrzanja snopa od 50 do 150 kV . Jakost struje je direktno povezana s brojem elektrona koji se emitiraju iz katode. Kako se povećava jakost struje snopa tako raste i količina energije pulsa koja prilikom udara prelazi na materijal obratka. Energija pulsa je također proporcionalna i s njegovim vremenskim trajanjem. Pulsevi mogu trajati od $50 \mu\text{s}$ do 15 ms . Pulsevi s velikom količine energije (oko 100 J/pulsa) se uglavnom koriste za izradu većih provrta i šupljina na debljim obradcima. Gustoća energije snopa ovisi o vremenskom trajanju pulsa i promjeru snopa. Veća gustoća energije elektronskog snopa podrazumijeva manji promjer snopa i dulje trajanje pulsa. U takvim situacijama se postiže brža i preciznija obrada. Promjer snopa se definira stupnjem njegovog fokusiranja pomoću magnetnih leća [9].

Fokusirani elektronski snop kao energetski vrlo snažan i precizan alat za obradu materijala ima sljedeće karakteristike, [10]:

- Postojan je za vrijeme obrade, nema trošenja alata ni drugih promjena koje bi utjecale na točnost obrade;
- Precizan je i vrlo malih dimenzija te se kao takav može koristiti za izradu sitnih provrta i složenih kontura s oštrim bridovima i malim prijelaznim radijusima;
- Nema uobičajenih priprema i izmjena alata tijekom obrade pa se bez ikakvih promjena može koristiti za bušenje provrta, glodanje gravura, rezanje, zavarivanje itd.;
- Djeluje bezkontaktno, pa se prema tome ne stvara nikakv pritisak i deformacije na obratku što je vrlo važno kod obrade osjetljivih dijelova;
- Moguće je bezinercijsko pomicanje snopa elektrona pomoću magnetnih leća za skretanje u krugu od nekoliko cm, što omogućuje vrlo visoke brzine obrade.

Točnost obrade snopom elektrona ovisi o energetskim parametrima snopa i njegovoj stabilnosti, sustavu za fokusiranje i upravljanje impulsima te točnosti mehaničkih uređaja za pomak. Ona se obično kreće u granicama 2 – 4 μm . Kvaliteta površine koja se postiže spada u područje srednje fine obrade i kreće se u rasponu od N7 do N9, [10].

Tehnologija obrade fokusiranim snopom elektrona se primjenjuje u sljedećim operacijama, [10]:

- Izrada uskih prolaza i gravura;
- Zavarivanje i lemljenje mikro i makro elemenata;
- Rezanje;
- Izrada cilindričnih i koničnih rupa i otvora;
- Perforiranje limova;
- Graviranje limova;
- Kaljenje i površinsko oplemenjivanje.

Može se koristiti za obradu svih vrsta materijala, metalnih i nemetalnih, bez obzira na njihova mehanička svojstva i kemijski sastav.

Kod rezanja materijala ovim postupkom moguće je postići brzinu i do 50 m/s, ovisno o snazi snopa, vrsti materijala i debljini te uređaju i sustavu za fokusiranje. Također, prednost ovog postupka je vrlo mala širina reza (oko 25 μm) što je posebno bitno kod rezanja skupih i kvalitetnih materijala.

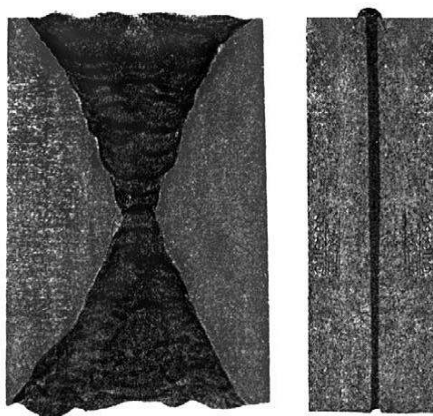
Kada se govori o bušenju otvora fokusiranim elektronskim snopom potrebno je razlikovati klasično bušenje i perforiranje. Ako je odnos dubina otvora/promjer veći, onda se radi o klasičnom bušenju i ono se izvodi s više impulsa koji slijede jedan za drugim. Međutim, ako je odnos dubina otvora/promjer manji (tanki limovi) i uz to broj otvora velik, onda se radi o perforiranju i tada se jedan otvor izrađuje jednim impulsom. Glavna prednost ovog postupka u odnosu na ostale konvencionalne i nekonvencionalne postupke obrade je mogućnost bušenja ekstremno malih otvora promjera čak 10 μm . Kod perforiranja ovim postupkom moguće je postići otvore promjera od 50 μm do 1 mm na materijalima debljine od 50 μm do 5 mm. Maksimalna dubina otvora koju je moguće postići bušenjem ovim postupkom iznosi od 20 do 30 mm. Na slici 2.11 su prikazani primjeri izradaka dobivenih ovim postupkom [10].



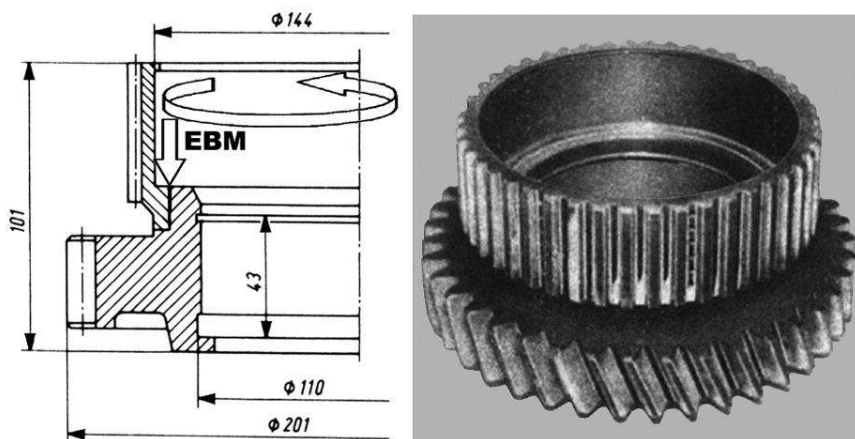
Slika 2.11. Primjeri izradaka dobivenih postupkom obrade fokusiranim elektronskim snopom, [13]

Na slici 2.11 (gore lijevo) prikazana je glava komore za sagorijevanje kod helikoptera čiji su otvori izrađeni fokusiranim elektronskim snopom. Njen promjer iznosi 317 mm te na sebi ima 3730 kosih otvora promjera 0.9 mm. Otvori se nalaze pod kutem od 90° i 25° u odnosu na površinu obratka. Tolerancija međusobnog položaja otvora iznosi ± 0.1 mm. Ovaj primjer dovoljno govori o mogućnostima koje pruža ovaj nekonvencionalni postupak obrade.

Također, fokusirani elektronski snop se uspješno koristi i za zavarivanje. Tijekom tog procesa dolazi do topljenja materijala i spajanja elemenata bez primjene dodatnog materijala. Ovime je omogućeno spajanje materijala koji se inače ne mogu zavarivati drugim postupcima npr. keramika-keramika, metal-keramika itd. Za razliku od klasičnog zavarivanja gdje se ostvaruju relativno plitki i široki zavari, kod zavarivanja snopom elektrona se vrši dubinsko zavarivanje što znači da nastaje uska i duboka zona topljenja materijala te se oblikuju uski i duboki zavari, slika 2.12. Ovime se postižu vrlo visoke točnosti te je moguće spajati različite elemente i gotove dijelove bez njihove prethodne pripreme, slika 2.13.



Slika 2.12. Zavar na leguri titana ostvaren klasičnim TIG postupkom (lijevo) i fokusiranim snopom elektrona (desno), [10]



Slika 2.13. Primjer dvojnog zupčanika izrađenog zavarivanjem fokusiranim snopom elektrona, [10]

Glavne prednosti ovog postupka obrade su već ranije spomenute. Između ostalog bitno je još spomenuti i usku zonu utjecaja topline koja nastaje tijekom obrade (20 – 30 μm). Nedostatak obrade fokusiranim snopom elektrona su vrlo visoki investicijski troškovi i troškovi održavanja opreme, velika potrošnja energije, visoki troškovi obuke radnika, brzina odvajanja materijala je reda veličine nekoliko mg/s, mogućnost obrade samo u vakuumu te postojanje vremenskog perioda kada nije moguća obrada zbog potrebe održavanja vakumske atmosfere. Zbog ovoga je ovaj postupak obrade zastupljen samo kod rijetkih tvrtki koje obimom ugovorenih poslova mogu osigurati isplativost primjenjene tehnologije, kao što je npr. auto industrija [14, 15].

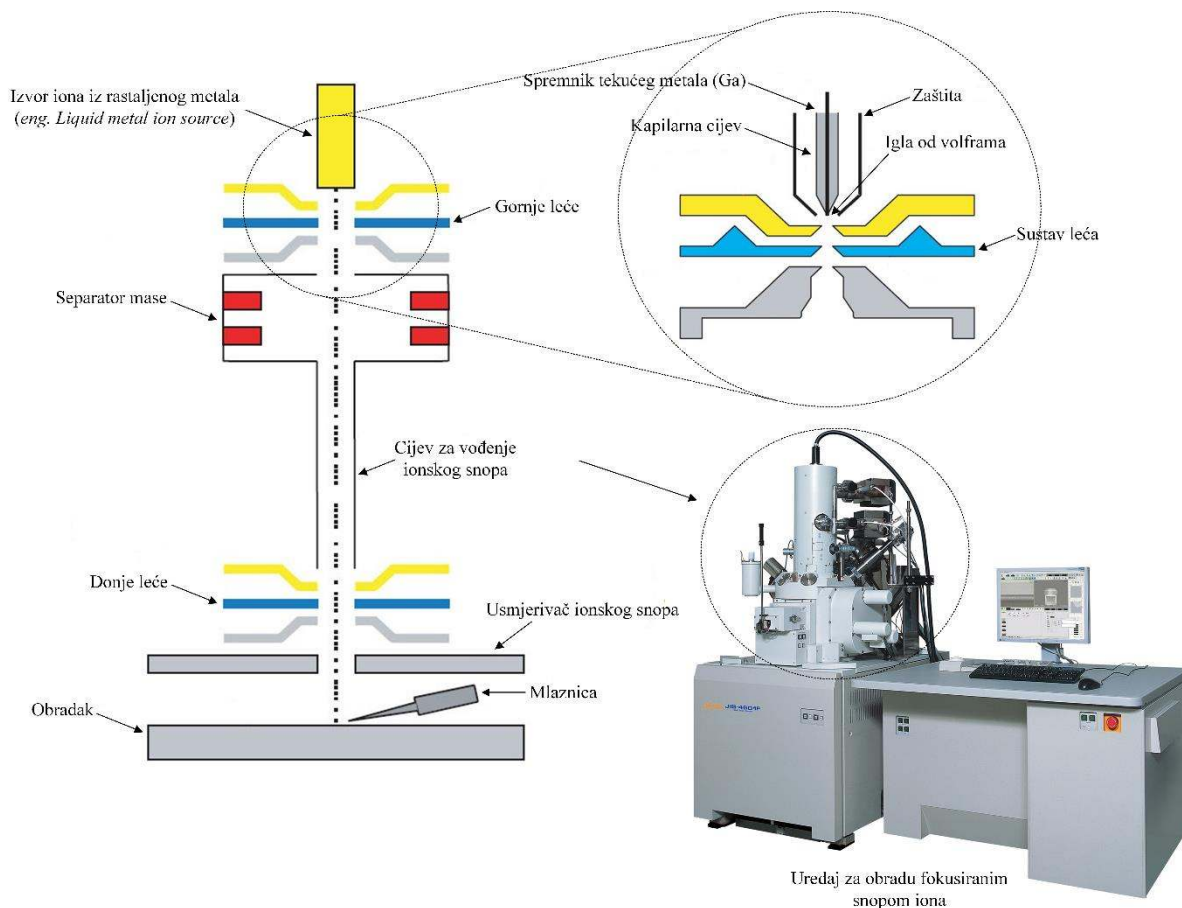
2.3. Postupak obrade ionskim snopom

Postupak obrade ionskim snopom (FIBM) (eng. Focused Ion Beam Machining) je suvremeni nekonvencionalni postupak koji se koristi za proizvodnju i obradu vrlo sitnih dijelova i struktura, a posebno onih na mikro i nano razini. Razvijen je 70-tih godina prošlog stoljeća u okviru istraživanja vezanih za dobivanje iona iz rastaljenog metala (eng. Liquid metal ion source). Nakon komercijalizacije 80-tih i 90-tih godina svoju primjenu je najvećim dijelom pronašao u elektroničkoj, mikro i nano industriji te u različitim postupcima tretiranja materijala [16, 17].

Osnovni dijelovi svakog uređaja za obradu fokusiranim snopom iona su: ionski top, radna komora, sustav održavanja vakumske atmosfere te radna stanica (PC) s korisničkim sučeljem. Kao izvor iona najčešće se koristi rastaljeni metal. Moguće je koristiti čitav niz metala. Bitno je samo da metal ima nisku temperaturu taljenja i malu reaktivnost. U takve metale spadaju: Al, Be, Cu, Ga, Li, Ni, Zn, Pb. Ipak, najpopularniji je galij (Ga). Galij karakterizira vrlo niska temperatura taljenja (svega 29.8 °C), srednja atomska masa (69.72) te mala reaktivnost s ostalim materijalima unutar ionskog topa. Time se on pokazao prikladnim za generiranje visoko energetskog snopa iona s mogućnošću fokusiranja u točki promjera i do 10 nm [18, 19].

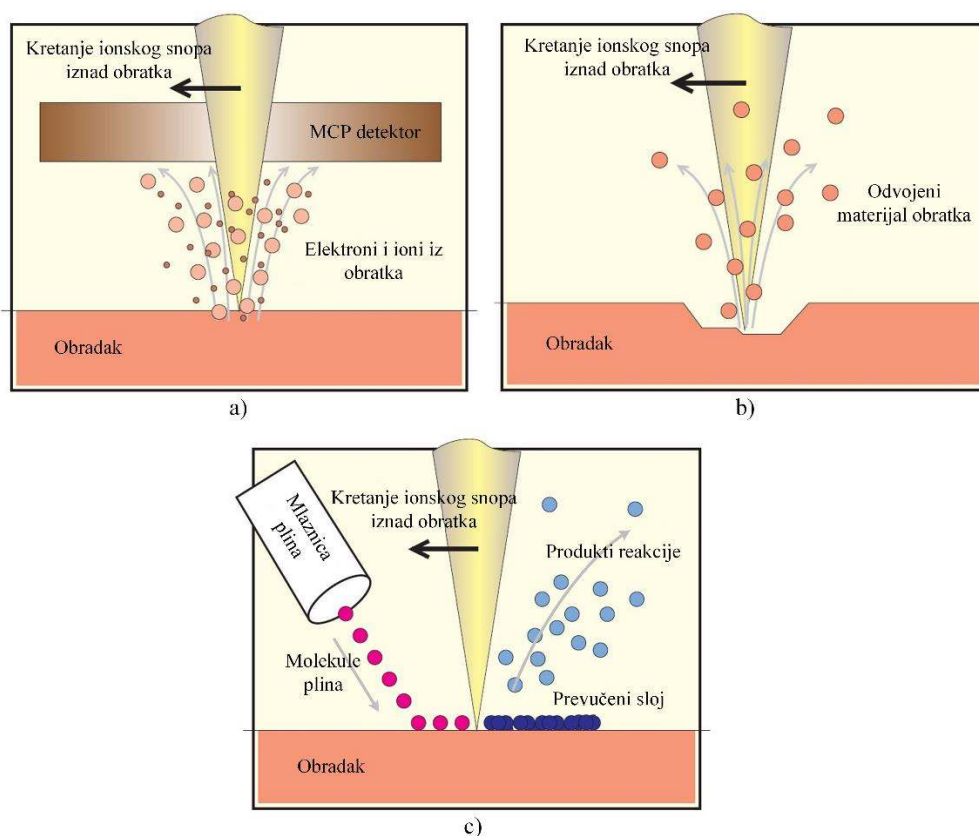
Ionski snop se generira iz rastaljenog metala pod djelovanjem vrlo snažnog električnog polja. Električno polje izaziva emisiju pozitivno nabijenih iona iz tekućeg metala. Voltaža električnog polja iznosi do 7 kV. Emitirani ioni se skupljaju na igli koja je izrađena od volframa i koja se nalazi ispod spremnika rastaljenog metala. Nakon toga ioni prolaze kroz primarni skup leća koje služe da tako raspršene ione formiraju u snop. Tako formirani ionski snop prolazi kroz separator mase. On ima ulogu da propusti dalje odgovarajuću količinu iona s točno određenim omjerom mase i naboja. S donje strane separatora mase nalazi se duga tanka cijev koja služi za eliminaciju onih iona koji nemaju vertikalni pravac kretanja. Nakon toga snop iona dolazi i do

sekundarnog skupa leća. Te leće služe za smanjenje promjera i postizanje finije fokusiranosti ionskog snopa s ciljem postizanja rezolucije reda veličine i do 10 nm. Na kraju se nalazi usmjerivač snopa koji kontrolira finalnu trajektoriju i lokaciju udara snopa o obradak. Bitno je napomenuti također da se cijeli postupak formiranja snopa i obrade odvija u vakuumskoj atmosferi pod tlakom od 1×10^{-7} mbar. Svi dijelovi sustava za generiranje fokusiranog snopa iona su prikazani na slici 2.14. Na istoj slici je vidljiva i mlaznica iznad obratka. Ona se koristi kod nanošenja različitih prevlaka na komad pomoću fokusiranih iona [16, 18, 20].



Slika 2.14. Sustav za obradu fokusiranim snopom iona, [16, 21]

U trenutku udara visokoenergetskog snopa iona o površinu obratka ioni predaju svoju energiju atomima obratka. Pri tome dolazi do sljedećih pojava i reakcija: prskanja i odvajanja neutralnih i ioniziranih atoma s površine obratka (FIB glodanje, eng. FIB milling), emisije elektrona (FIB, eng. FIB imaging) te kemijskih interakcija, pucanja kemijskih veza između molekula i stvaranja novih tankih slojeva materijala (FIB presvlačenje, eng. FIB deposition) [20]. Na slici 2.15. prikazana su tri osnovna područja primjene ovog nekonvencionalnog postupka obrade.

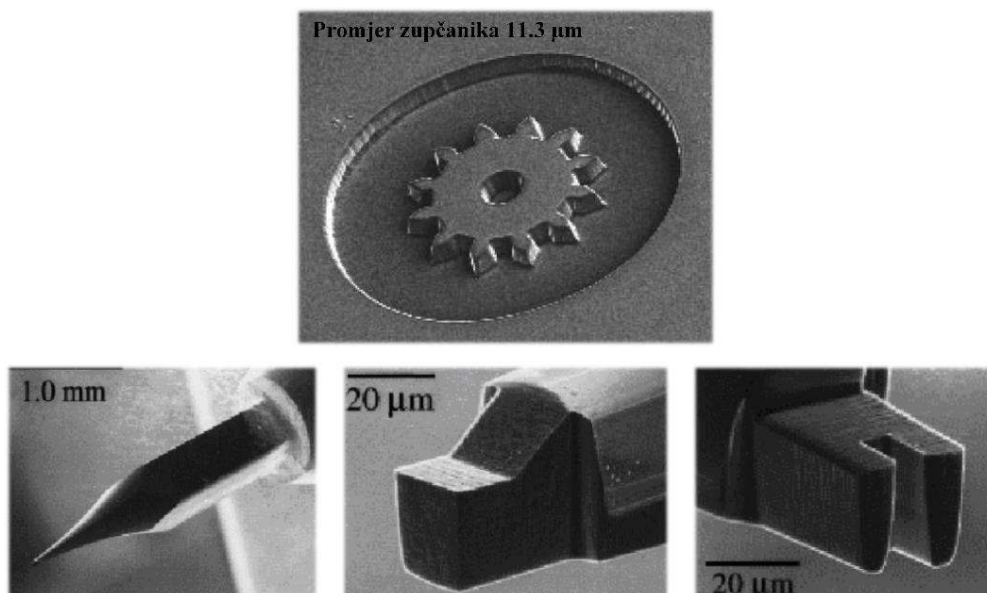


Slika 2.15. Princip obrade fokusiranim snopom iona, a) skeniranje (eng. FIB imaging), b) glodanje (eng. FIB milling), c) presvlačenje (eng. FIB deposition), [20]

Kod postupka skeniranja (slika 2.15 a) fokusirani ionski snop prelazi preko obratka pri čemu se s obratka emitiraju neutralni atomi, ioni i elektroni. Iznad obratka se nalazi detektor koji prikuplja tako emitirane atome, ione i elektrone te ih iskorištava za spektroskopsku analizu materijala obratka. Neizbježno za vrijeme ove operacije dolazi do implantiranja male količine pozitivnih galijevih iona u obradak pri čemu dolazi do pozitivnog nabijanja i oštećenja njegove površine. Kako bi se to spriječilo obradak se često naštrcava elektronima iz sekundarnog izvora. Ovime je omogućena i pouzdana spektroskopska analiza nevodljivih materijala kao što je staklo koje se često koristi u različitim mikrostrukturama [20].

Snop iona koji sadrži veliku količinu energije (10 – 50 keV) i ima veliku gustoću koristi se i za uklanjanje materijala obratka tj. mikro i nano glodanje, slika 2.15 b. Postupak se odvija na način da fokusirani snop iona udara o obradak pri čemu dolazi do interakcije s atomima na površini obratka. Energija ionskog snopa mora biti viša od energije vezivanja atoma obradka kako bi došlo do njihovog razdvajanja i uklanjanja s površine. Ovo uklanjanje atoma obratka se odvija na vrlo precizan i kontroliran način kako bi se mogli postići vrlo sitni i precizni rezovi bez kemijskih i strukturnih utjecaja na ostatak materijala obratka, slika 2.16. Na ovaj način je moguće obrađivati široki raspon materijala s gotovo nikakvom prethodnom pripremom. Kao

mjera efikasnosti odvajanja materijala obratka koristi se broj "izbačenih" atoma po jednom dolaznom ionu. Ta veličina se obično kreće u intervalu 1-50 atoma/ion i ovisi o masi iona i atoma, energiji iona, njihovom toku i smjeru gibanja prema obratku. Što je veća energija iona to je i veći broj atoma uklonjenih s površine obratka [16, 20].

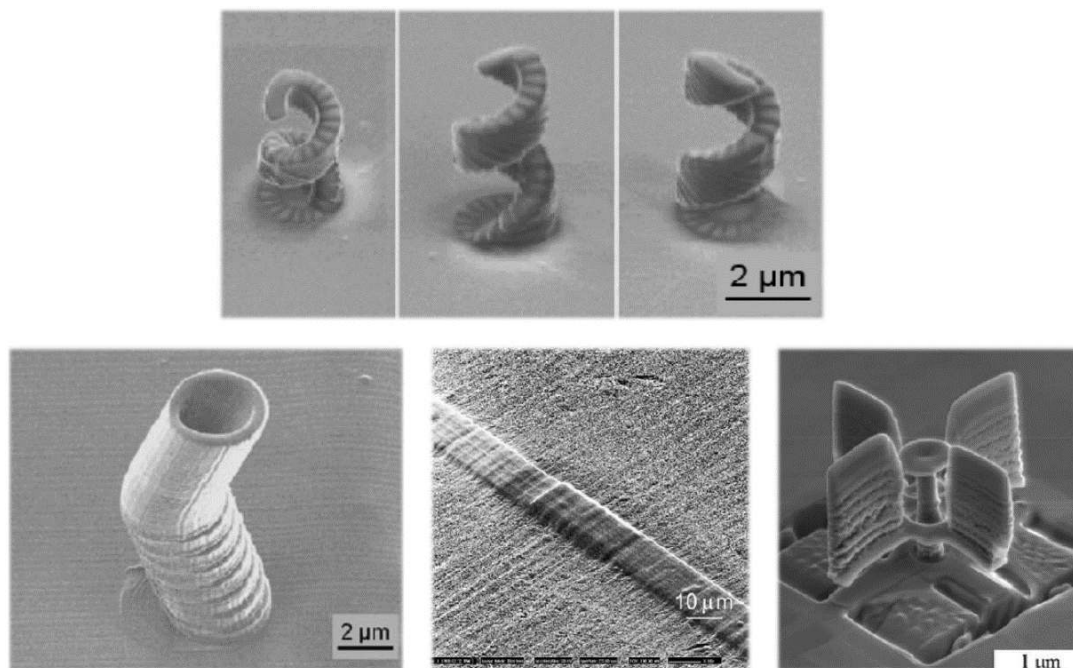


Slika 2.16. Primjeri izradaka dobivenih FIB glodanjem (dolje, mikro dijamantni alati), [16]

Presvlačenje površine snopom iona podrazumijeva implantaciju iona nekog legirnog elementa u površinsku strukturu osnovnog materijala obratka. Najčešće se radi o CVD (eng. Chemical vapour deposition) nanošenju elemenata kao što su platina (Pt) ili volfram (W) na površinu obratka uz posredstvo odgovarajućeg plina (npr. $W(CO)_6$ ako se radi o volframu). Plin se raspršuje na površinu obratka pomoću tanke mlaznice. Fokusirani ionski snop razgrađuje molekule plina i istovremeno udara i prodire u površinu obratka. Pri prodiranju u materijal (do dubine od $0.01\ \mu m$) dolazi do velikog broja sudara u tankom površinskom sloju što dovodi do izbijanja atoma i gubitka osnovnog materijala. Osim izbijanja atoma dolazi i do njihovog premještanja i međusobnog miješanja unutar materijala te izmjene kemijskog sastava površine obratka. Izbijeni atomi i ostali produkti reakcija izlaze kroz vakuumski sustav dok se na površini zadržavaju tanki slojevi legirnih elementa (npr. volfram). Naneseni slojevi također sadrže i pozitivne galijske ione koje je nemoguće izbjeći. Debljina nanesenih slojeva može iznositi i do $10\ nm$ [20]. Postupak presvlačenja je prikazan na slici 2.15 c.

Prednosti presvlačenja površine snopom iona i općenito ovog postupka su: brza promjena sastava površinskog sloja, realizacija procesa pri niskim temperaturama, nema promjena dimenzija obratka, nema oštre granice između nanesenog sloja i osnovnog materijala,

kontrolirana je dubina i raspodjela koncentracije legirnih elemenata, vakuumska čistoća procesa nanošenja, visoka preciznost obrade (slika 2.17), nema popratnih utjecaja na ostatak materijala obratka, visoki stupanj kontrole i pouzdanosti procesa. Nedostaci su: nemogućnost obrade predmeta složene konfiguracije, vrlo skupa oprema i održavanje, te visoka cijena komada podvrgnutog ovoj obradi, [10].



Slika 2.17. Primjeri različitih trodimenzionalnih dijelova izrađenih presvlačenjem pomoću snopa iona, [20]

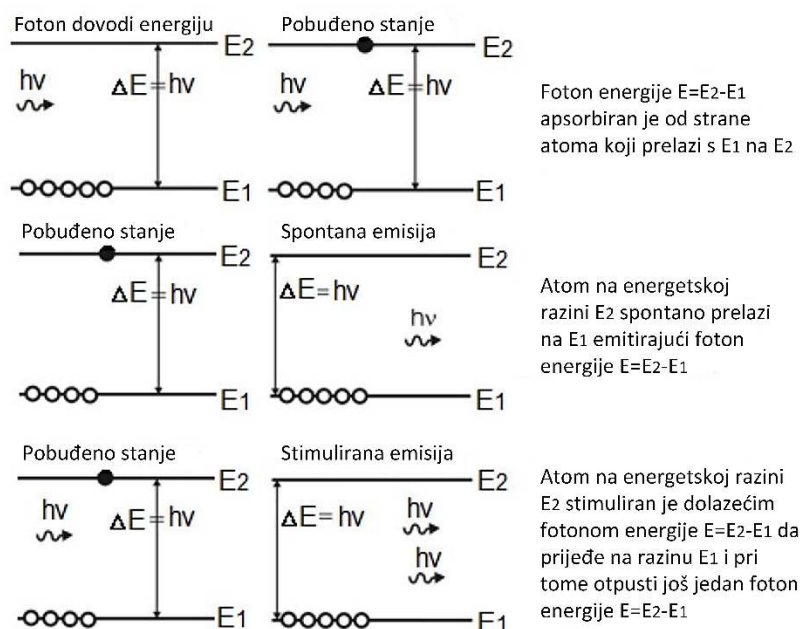
2.4. Postupak obrade laserskom zrakom

Jedan od atraktivnijih nekonvencionalnih postupaka obrade, koji je široko prisutan u industriji, je postupak obrade laserskom zrakom (laserskim snopom). Riječ laser je akronim od "light amplification by stimulated emission of radiation" (pojačanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja). Prvi laser je izrađen 1960. godine od strane fizičara Teodora Majmana. On je uspješno implementirao tehniku optičkog pumpanja aktivnog materijala kristala rubina što je dovelo do stimulirane emisije. Od sredine 60-tih godina prošlog stoljeća započela je uspješna primjena lasera u industriji.

Laserska zraka proizvodi se fenomenom stimulirane emisije zračenja. Kao prvi uvjet emisije fotona je da laserski medij sadržava energijske razine (energetske razlike između dvije staze atoma) čija energija odgovara energiji emitiranih fotona. Drugi uvjet je da većina atoma bude u pobuđenom stanju tj. da se postigne inverzija naseljenosti. Inverzija naseljenosti je neravnotežno stanje u atomu u kojem je naseljenost pobuđenog stanja veća od naseljenosti

osnovnog stanja. Tada je vjerojatnost da nadolazeći foton inducira stimuliranu emisiju veća od vjerojatnosti da foton bude apsorbiran. Na slici 2.18. prikazan je proces apsorpcije te spontane i stimulirane emisije zračenja [32, 33, 35].

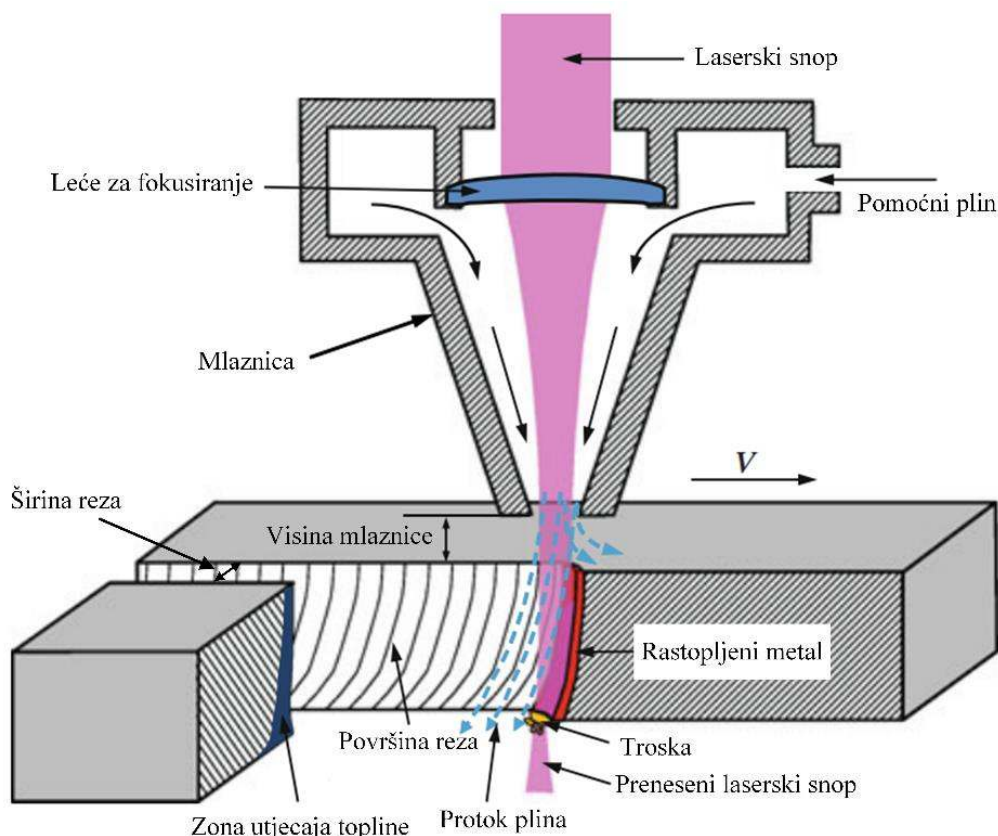
Na početku se atom nalazi u osnovnom stanju. Apsorpcija se događa kada atom apsorbira foton, čija energija je jednaka energiji potrebnoj za prelazak atoma u više energetska tzv. pobuđeno stanje. Energija fotona jednaka je razlici $E_2 - E_1$. Energija atoma u nižoj energetska razini je E_1 , a u višoj E_2 . Spontana emisija je proces u kojem atom koji se nalazi u višem energetska stanju spontano prijeđe na nižu energetska razinu. Emisija se naziva spontana jer se dogodila bez vanjskih utjecaja. Stimulirana emisija je proces u kojem atom koji se nalazi u pobuđenom stanju stimuliran od strane nadolazećeg fotona (jednake energije kao i prvi foton) prelazi u osnovno stanje i u isto vrijeme emitira dodatni foton. Ovaj proces se naziva stimulirana emisija jer je događaj pobuđen vanjskim fotonom. Vanjski foton nije apsorbiran od strane atoma već on uzrokuje emisiju oba fotona. Emitirani foton je u potpunosti identičan vanjskom fotonu, ima istu energiju i smjer kretanja. Ovisno o vrsti laserskog medija postoje različiti načini energetske pobude. Plinski laseri rade na principu električnog pumpanja gdje se inverzija naseljenosti postiže primanjem energije iz električne struje. U laserima s krutim medijem kao laserska pumpa koristi se fokusirano svjetlo s ksenon bljeskalicom ili laserskom diodom [32, 33, 35].



Slika 2.18. Interakcija fotona s atomom, [35]

Laserska obrada (eng. Laser beam machining) temelji se na primjeni lasera tj. visoko koncentrirane svjetlosne energije dobivene stimuliranim zračenjem za obradu materijala

zagrijavanjem, topljenjem ili ispravljanjem. U tom procesu se fokusiranjem laserskog snopa postiže velika gustoća snage po jedinici površine (preko 10^8 W/cm^2) što dovodi do topljenja i isparavanja materijala u dijelu sekunde. Relativnim kretanjem laserskog snopa u odnosu na obradak nastaje proces laserskog rezanja materijala. Koaksijalno s laserskim snopom mlaz pomoćnog plina vrši odvođenje rastopljenog materijala iz zone reza. Također, važna funkcija pomoćnog plina je i zaštita leće te otklanjanje plazmenog oblaka koji se formira pri velikom intenzitetu zračenja. Kod laserskog rezanja metala uglavnom se koriste dvije vrste pomoćnih plinova. Za ugljične čelike se koristi kisik, pri čemu se uslijed egzotermne reakcije osigurava dodatna energija koja se koristi u procesu rezanja, dok se kod rezanja nehrđajućeg čelika, kako bi se postigao rez visoke kvalitete, najčešće koristi dušik. Razlog tome je i što se oksidi poput CrO , koji se inače stvaraju kod rezanja kisikom, zbog svoje velike viskoznosti teže izbacuju iz zone reza [23, 24].



Slika 2.19. Postupak obrade laserskom zrakom, [25]

Glavni dijelovi strojeva za rezanje laserom su: laser tj. optički kvantni generator koji generira svjetlosni snop, optički sustav za prijenos laserskog snopa ("pokretna optika"), rezna glava u kojoj se pomoću leća vrši fokusiranje laserskog snopa na radni promjer od oko 0.3 mm, sustav za napajanje energijom, CNC upravljačka jedinica te koordinatni radni stol, slika 2.19 [27].

Tijekom laserskog rezanja materijala odvijaju se pirolitički i fotolitički procesi. Pirolitičkim mehanizmom emitirano lasersko zračenje se apsorbira na površini materijala obratka te dolazi do povećanja temperature, topljenja i isparavanja. Fotolitičkim mehanizmom pod djelovanjem laserskog snopa dolazi do kemijskih reakcija koje rezultiraju razaranjem materijala obratka. U trenutku kada laserski snop udari o površinu obratka dio svjetlosti se reflektira, a drugi dio apsorbira, pri čemu svjetlosna energija prelazi u toplinsku energiju koja se koristi za obradu. Djelovanje laserskog snopa na materijal obratka se može podijeliti na nekoliko faza: 1. apsorpcija svjetlosne energije u površinskom sloju materijala obratka, 2. zagrijavanje površinskog sloja materijala, 3. topljenje i isparavanje materijala obratka, 4. hlađenje materijala obratka po prestanku djelovanja laserskog snopa [27].

Proces laserskog rezanja materijala se odvija kroz interakciju laserskog snopa i materijala obratka. S obzirom na to i ulogu pomoćnog plina postoje različite metode laserskog rezanja materijala:

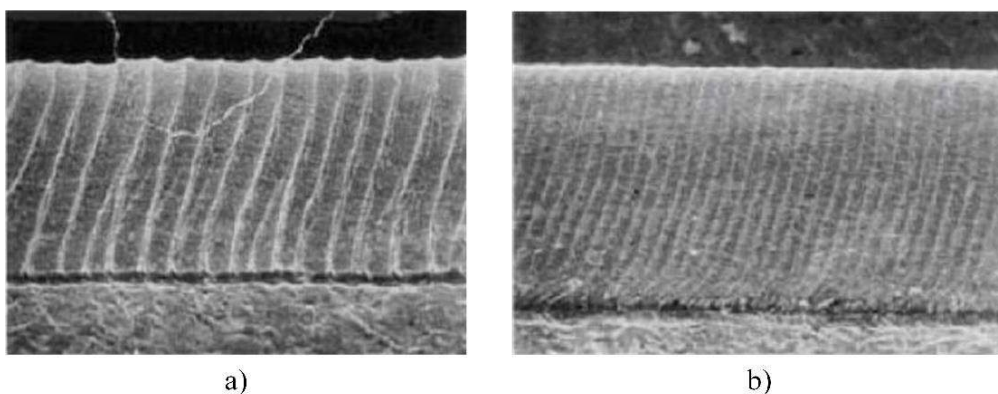
1. Lasersko rezanje sublimacijom: Pod djelovanjem laserskog snopa velike snage dolazi do isparavanja materijala u zoni reza, a ispareni materijal se odstranjuje mlazom pomoćnog plina. Uglavnom se kao pomoćni plinovi koriste argon i dušik. Ova metoda rezanja zahtijeva vrlo velike snage lasera i obično se koristi pulsni režim rada. Može se koristiti za rezanje nemetala i tankih metalnih limova debljine manje od 1 mm. Kod rezanja metala većih debljina toplinski gubici su razmjerni s debljinom obratka. U ovom slučaju je potrebna vrlo velika snaga lasera kako bi se odstranio rastopljeni materijal iz zone reza i kompenzirali veliki toplinski gubici. Prednost ove metode je postizanje visoke kvalitete obrade, a nedostatak nemogućnost postizanja visoke brzine rezanja budući je energija potrebna za isparavanje (kod metala oko 50 J/mm³) višestruko veća u odnosu na energiju potrebnu za topljenje (kod metala oko 2 J/mm³) [28, 29, 30].

2. Lasersko rezanje topljenjem uz pomoć inertnog plina: Lasersko rezanje topljenjem uz pomoć inertnog plina zahtijeva manje snage lasera u odnosu na lasersko rezanje sublimacijom jer se materijal obratka samo topi i odstranjuje iz zone reza uz pomoć mlaza inertnog plina. Lasersko rezanje nehrđajućeg čelika, aluminija i legura titana se često izvodi ovom metodom koristeći dušik kao pomoćni plin. Glavni problem koji se može javiti kod limova veće debljine i nekih vrsta materijala su nakupine rastopljenog materijala duž donjeg brida reza. Ovaj problem se rješava podešavanjem tlaka pomoćnog plina iznad 1 MPa [28, 31].

3. Lasersko rezanje topljenjem uz pomoć kisika: Umjesto inertnog plina koristi se kisik. Materijal obratka u zoni reza zagrijava se i energijom laserskog snopa i energijom nastalom

uslijed egzotermne reakcije materijala s kisikom. Rastopljeni materijal se odstranjuje iz zone reza mlazom kisika. Dodatna energija koja se dobiva iz egzotermne reakcije omogućava postizanje veće brzine rezanja pri istoj snazi lasera u odnosu na lasersko rezanje pomoću inertnog plina. Ova metoda se koristi najčešće za rezanje ugljičnih i niskolegiranih čelika [29].

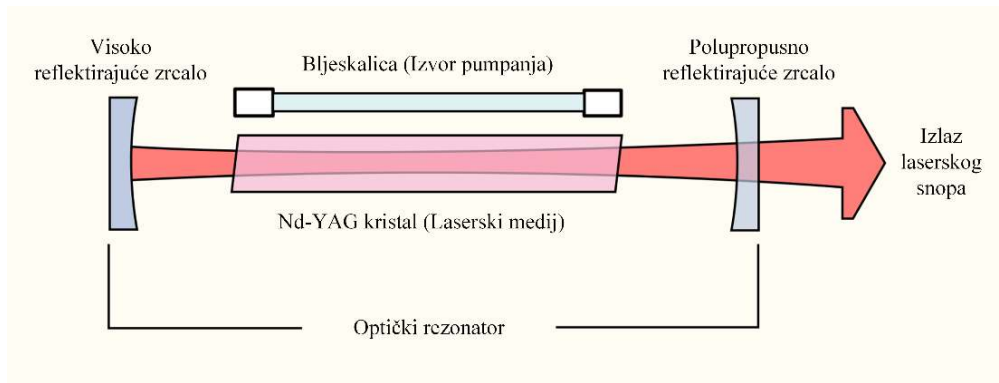
Parametri koji utječu na proces rezanja materijala laserskom zrakom i kvalitetu reza su kontinuirani ili impulsni način rada lasera (slika 2.20), snaga lasera, žarišna duljina, položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada, brzina rezanja, odabir plina za rezanje i njegov protok, [39].



Slika 2.20. Površine dobivene a) impulsnim, b) kontinuiranim načinom rada lasera, [36]

Danas na tržištu postoje različite vrste lasera. U industrijskoj primjeni obrade materijala većinom prevladavaju Nd-YAG (slika 2.21) i CO₂ laseri, a pored njih prisutni su još i laseri s diskom (slika 2.22) te Fiber laseri (slika 2.23).

Nd-YAG laser ima četiri energetske razine i najčešće je korišten laser s krutim medijem. On emitira infracrveno zračenje valne duljine 1,06 μm . Kruti aktivni medij je prema sastavu kristal granat. YAG označava "Itrij-Aluminij granat", a Nd je oznaka za Neodimij. Neodimij je aktivni materijal koji se umeće u kristalnu rešetku i zamjenjuje (0,1-1)% atoma itrija. Aktivni medij je šipkastog oblika promjera od 2 do 8 mm i duljine od 20 do 200 mm. Pobuđivanje atoma u aktivnom mediju provodi se intenzivnim izvorom svjetla. Najčešće se u tu svrhu koriste ksenonske ili kriptonske bljeskalice i laserske diode kojima se povećava energetska učinkovitost lasera. Prednosti diodno pumpanih Nd-YAG lasera ispred pumpanja bljeskalicom je značajno veći stupanj djelovanja (efikasnost do 18%) i duži vijek trajanja lasera (oko 100 000 h). Kraća valna duljina omogućava dovođenje laserske zrake kroz optičko vlakno i fokusiranje zrake kroz obične staklene leće. Ovakvi laseri mogu raditi u kontinuiranom i impulsnom načinu. Maksimalna snaga im može iznositi i do 16 kW [32, 33].

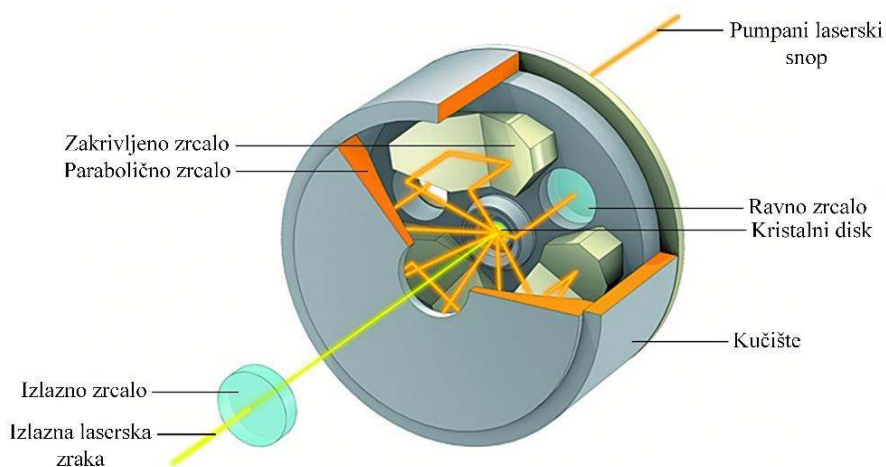


Slika 2.21. Shema Nd-YAG lasera, [34]

CO₂ laser je plinski laser koji emitira svjetlost valne duljine 10,6 μm . Optički generator sastoji se od dva zrcala između kojih se nalazi cijev kroz koju struji plinska mješavina koja omogućuje stvaranje laserske zrake. Plinska mješavina sastoji se od ugljikovog dioksida (CO₂), dušika (N₂) i helija (He). Kod stvaranja laserske zrake aktivni medij CO₂ stimuliran je električnim pražnjenjem (električni napon iznosi do 30 kV). Tijekom tog procesa molekule dušika sudarom predaju energiju CO₂ molekulama pri čemu se one pobuđuju na viši energetske nivo. Prijelaz s višeg energetske stanja u niže popraćen je emisijom fotona te na taj način dolazi do stvaranja laserske zrake. Sudarom s atomima helija, CO₂ molekule se vraćaju u početno stanje i ciklus se ponavlja. Za ovaj proces potreban je tlak od 100 do 250 hPa. Kod ove vrste lasera laserski snop se vodi pomoću sustava zrcala. Takav sustav je puno kompleksniji i zahtijeva usklađivanje zrcala na putu laserskog snopa i održavanje zrcala čistima. Efikasnost ovakvih lasera iznosi do 15%, a maksimalna snaga do 50 kW [33].

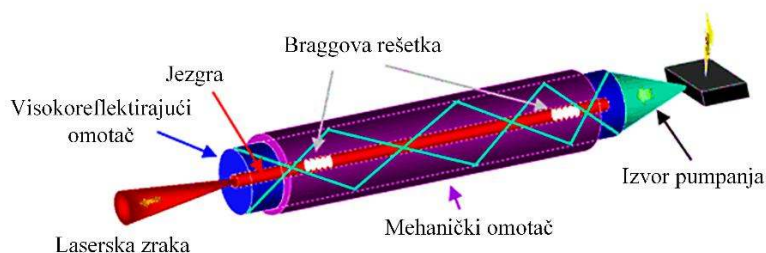
Disk laseri (Yb-YAG) su kruti laseri valne duljine 1,03 μm . Kod njih je aktivni medij tj. laserski kristal u obliku tankog diska s promjerom od nekoliko mm i debljinom od 100 do 200 μm . Materijal diska je itrij-aluminij granat (YAG), a središnji aktivni dio može biti doziran s iterbijevim (Yb) atomima. Za razliku od Nd-Yag lasera kod kojih aktivni medij može biti doziran s maksimalno 1% neodimija, ovi laseri mogu sadržavati i do 30% aktivnog elementa iterbija (Yb). Stoga, puno manji Yb-YAG kristal može primiti puno više aktivnih atoma. Laserska zraka se stvara na način da je tanki disk optički podražen velikom snagom diodnih modula. Parabolično zrcalo reflektira svjetlost emitiranu od laserske diode na aktivni kristal tankog diska. Svjetlost koja je reflektirana od stražnje strane diska, udara ponovno u parabolično zrcalo, skreće na retro reflektor i vraća se na parabolično zrcalo od kojeg se odbija u disk, slika 2.22. Proces se ponavlja sve dok se nakon 16 prolaza svjetlost potpuno ne apsorbira i emitira laserska zraka visoke kvalitete. Aksijalno hlađenje koje je prisutno kod ove vrste lasera smanjuje raspršivanje i stvara kvalitetniju lasersku zraku. Efikasnost ovih lasera iznosi od 15

do 20%, a maksimalna snaga do 5 kW. Najčešće se koriste u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji [33, 36].



Slika 2.22. Prikaz lasera s diskom, [37]

Fiber laseri se sastoje od optičkih vlakana koja se koriste kao aktivni medij i poluvodičke diode koja je izvor pumpanja. Najjednostavnija vlakna imaju dva sloja: jezgra koja vodi svjetlost i ovojnica koja sprječava gubitke svjetlosti u okoliš i omogućava potpunu refleksiju. U optičkim vlaknima dolazi do laserske emisije. Promjer jezgre optičkog vlakna iznosi oko 10 μm za jednomodno vlakno, te oko 63 μm za višemodno vlakno. Jezgra se izrađuje od silicija i germanija s primjesama aktivnih elemenata iterbija i erbija. Oko jezgre se nalaze visokoreflektirajući i mehanički omotač koji je štite od loma. Budući da optička vlakna funkcioniraju na principu potpune refleksije i odlično štite svjetlost koja se propagira kroz vlakno postoji mogućnost da se cijeli laserski rezonator napravi od optičkih komponenata kao što su Braggova rešetka i optički razdjelnik, slika 2.23. Braggova rešetka zamjenjuje zrcala te propušta samo određene valne duljine. Ona je smještena direktno u optičkom vlaknu. Fiber laseri mogu imati izlaznu snagu u rasponu od 500 W do 50 kW te efikasnost i do 30%. Za razliku od prethodno spomenutih lasera fiber laseri omogućuju fokusiranje laserske zrake na manji promjer sa znatno većom snagom. Također, kod njih je i odvođenje topline poboljšano zbog dugačkih i tankih vlakana. Oni su uglavnom lakši i dimenzijski manji od tradicionalnih lasera zbog čega je olakšana njihova integracija u proizvodnji medicinskih i drugih laserskih sustava [36].

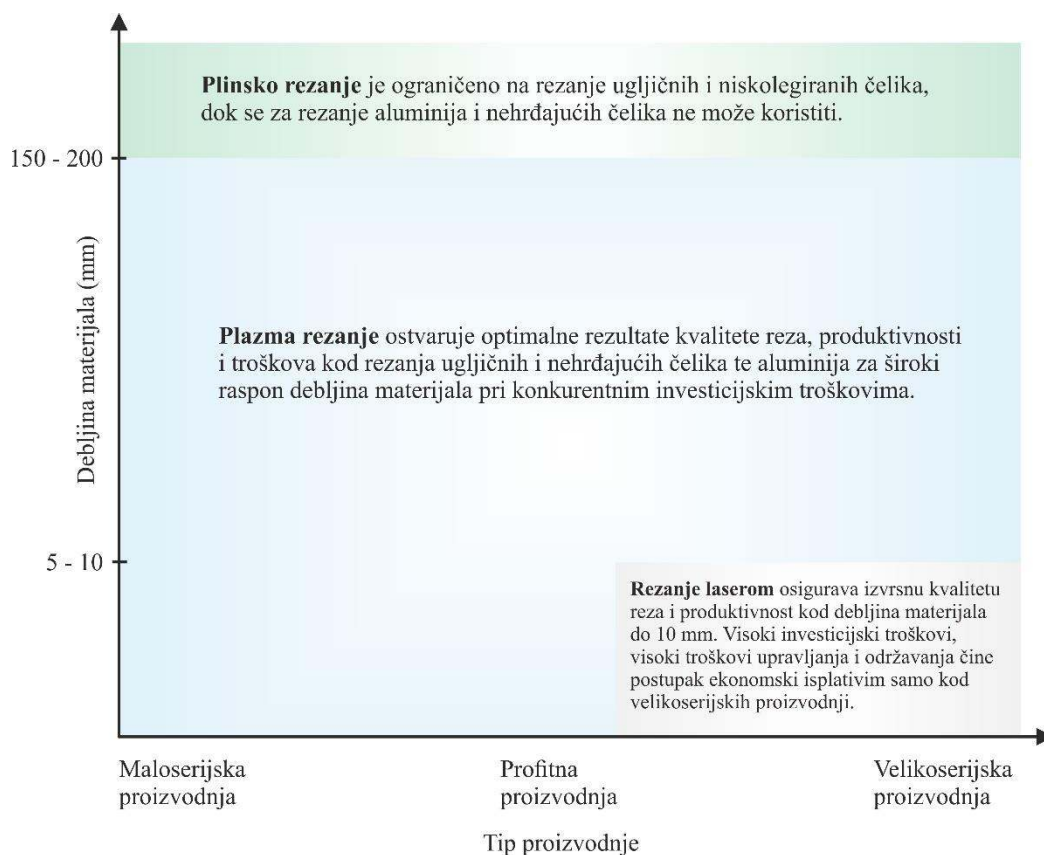


Slika 2.23. Prikaz Fiber lasera, [38]

Pored rezanja laserska zraka se koristi u industriji i za zavarivanje, graviranje, bušenje, glodanje te oblikovanje materijala. Prednosti laserskog rezanja su: visoka točnost reza, odlično rezanje malih kontura, rupa i utora, izvrsna mogućnost automatizacije, uski rez (širina 0,2 - 0,4 mm), mali unos topline, minimalne deformacije, visoke brzine kod rezanja tankih limova. Nedostaci primjene lasera za rezanje materijala su: visoka cijena investicije u opremu i visoki troškovi rada, veliki gubici energije (efikasnost industrijskih lasera se kreće od 5 do 15%), problemi sa stabilnošću procesa kod rezanja reflektirajućih materijala, nečistoće u materijalu znatno utječu na stabilnost procesa, neravnine na materijalu utječu na brzinu rezanja, potrebno je vrlo precizno vođenje, za većinu industrijskih lasera gornja granica debljine rezanja iznosi 20 mm za konstrukcijske čelike, 15 mm za nehrđajuće čelike i do 10 mm za aluminij. Investicije u opremu se mjere u milijunima kuna i isplative su samo ako se može osigurati posao u minimalno dvije, a poželjan bi bio rad u tri smjene na rok od 5 i više godina [40, 41, 42].

2.5. Postupak rezanja metala plazmenim mlazom

Ovaj postupak razvijen je 50-tih godina prošlog stoljeća za rezanje metala koji nisu mogli biti rezani plinskim plamenom kao što su nehrđajući čelici, aluminij i bakar. Početni nedostaci nove tehnologije otklonjeni su s velikim brojem inovacija i poboljšanja te se s vremenom plazma rezanje razvilo u ekonomičan postupak povezan s automatiziranim CNC sustavima za precizno vođenje mlaznice koji kvalitetno reže različite vrste metala. Danas je rezanje plazmenim mlazom uz lasersku zraku u industriji najčešće korišteni termoelektrični postupak obrade metala. U posljednjih nekoliko godina intenzivno se radi na daljnjem unaprijeđenju ove tehnologije. Veliki broj znanstvenih radova objavljenih u posljednjih 5 do 8 godina upućuje na to da je ova tehnologija u fokusu velikog broja istraživača.



Slika 2.24. Područje primjene tehnologije rezanja plazmenim mlazom

Prednosti primjene ove tehnologije su: mogućnost rezanja svih električki vodljivih materijala, mogućnost rezanja materijala širokog raspona debljina (do 200 mm), niski investicijski troškovi, visoka proizvodnost, dug životni vijek potrošnih dijelova, niža cijena izradaka dobivenih ovim postupkom, optimalna kombinacija kvalitete reza, proizvodnosti i troškova, nepotrebna naknadna obrada površine reza kod tanjih i srednjih debljina limova kod korištenja tehnologije vrtložnih plinova u kombinaciji s plazmenim plinom, pogodnost za

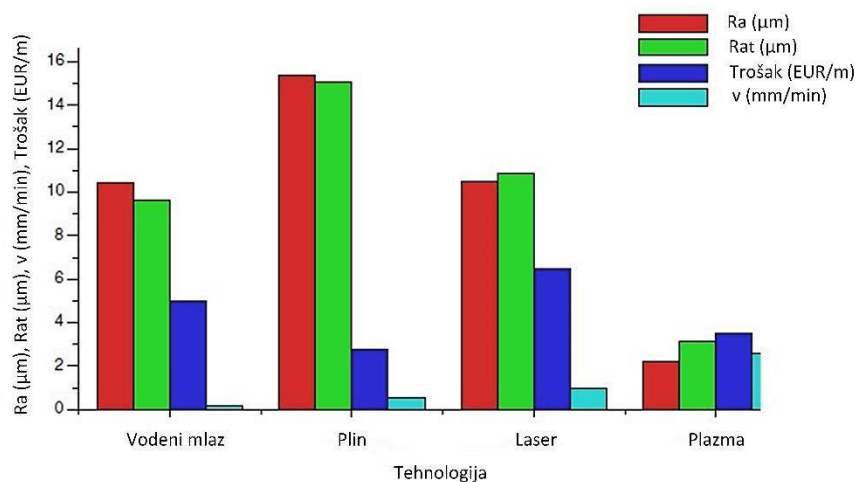
automatizaciju, podvodno rezanje smanjuje unos topline i širenje buke u radnom prostoru. Glavni nedostaci su pak nešto veća širina reza i zona utjecaja topline u odnosu na lasersko rezanje te šire tolerancije. Plazma za razliku od lasera daje nešto slabiju kvalitetu reza, međutim ukoliko u industrijskoj primjeni nema potrebe za jako uskim tolerancijama, ona osigurava velike uštede u samoj tehnologiji rezanja, tablice 2.1 i 2.2, [41, 42, 43] te u skladu s tim ovaj postupak nalazi široku primjenu u metaloprerađivačkoj industriji i brodogradnji.

Tablica 2.1. *Izračun fiksnih troškova rezanja ugljičnog konstrukcijskog čelika debljine ploče 10 mm, [43]*

Opis stavke	Jedinica	Laser	Plazma
1. Investicija u opremu	EUR	415 000	200 000
2. Vrijeme rada pri 80 % popunjenosti kapaciteta u 1 smjeni	sati/godina	1 350	1 350
3. Vrijednost godišnje deprecijacije	EUR/h	61.48	29.63
4. Isplata kredita (5 % kamata)	EUR/h	9.22	4.44
5. Osiguranje	EUR/h	0.77	0.37
6. Trošak radnog prostora površine 80 m ² (amortizacija)	EUR/h	3.56	3.56
7. Unutarnji troškovi održavanja	EUR/h	9.22	4.44
8. Potrošnja energije (1 kWh = 0.15 EUR)	EUR/h	5.55	0.15
9. Sredstva za rad	EUR/h	0.8	0
10. Trošak alata	EUR/h	0.2	0.2
11. Trošak rukovanja	EUR/h	0.5	0.5
Ukupni troškovi	EUR/h	91.3	43.27

Tablica 2.2. *Izračun ukupnih troškova po metru reza za rezanje ugljičnog konstrukcijskog čelika debljine ploče 10 mm, [43]*

Opis stavke	Jedinica	Laser	Plazma
1. Brzina	m/min	1.00	2.45
2. Fiksni operativni troškovi	EUR/h	91.30	43.26
3. Ukupni troškovi radnika	EUR/h	14.00	14.00
4. Trošak tehničkih plinova	EUR/h	7.80	4.04
5. Trošak abraziva	EUR/h	0.00	0.00
6. Trošak vode	EUR/h	0.00	0.00
7. Trošak el. energije	EUR/h	1.95	2.75
8. Trošak dodatnog pribora	EUR/h	0.35	9.89
9. Ukupna potrošnja (4,5,6,7,8)	EUR/h	10.10	14.68
Ukupni troškovi	EUR/h	115.40	71.98



Slika 2.25. Usporedba tehnologija s obzirom na kvalitetu reza, brzinu rezanja i troškove kod rezanja čelika debljine 10 mm, [44]

U tablicama 2.1 i 2.2 prikazana je usporedba troškova rezanja kod plazme i lasera. Na slici 2.25 prikazana je usporedba različitih tehnologija s obzirom na eksperimentalnu (R_a) i teoretsku hrapavost površine reza (R_{at}), brzinu rezanja i troškove kod rezanja čelika EN S355J0 debljine 10 mm. Autori [44] su zaključili da se najbolja kvaliteta reza uz najveću efikasnost i najmanje troškove ostvaruje korištenjem postupka rezanja plazmenim mlazom. Također, Harničarova et al. [45] su eksperimentalnim putem, rezanjem čelika EN S355J0, analizirali proizvodnost i troškove primjene laserskog rezanja, plazma rezanja i plinskog rezanja. Rezale su se različite debljine čelika pri različitim brzinama. Autori su došli do zaključka da se u jedan sat rada postupkom rezanja plazmenim mlazom može dobiti najveći broj izradaka, njih 230 kod debljine čelika 10 mm. Lasersko rezanje je drugo po redu te se njime dobije 150 izradaka dok je plinsko rezanje najsporije te ono proizvede tek 58 komada. Kada se govori o troškovima, autori su izračunali da operativni troškovi kod plinskog rezanja iznose 13.7 centa po komadu, kod postupka rezanja plazmenim mlazom 13.5 centa po komadu, a kod laserskog rezanja 28.5 centa po komadu. Autori su ustvrdili da je postupak rezanja plazmenim mlazom najekonomičniji u usporedbi s laserskim i plinskim rezanjem te da je 1.82 puta jeftiniji od lasera i 3.45 puta jeftiniji od plinskog rezanja.

Uz dobru efikasnost obrade i niske troškove kod postupka rezanja plazmenim mlazom cilj je postići i optimalnu kvalitetu reza koja zahtijeva minimalnu potrebnu naknadnu obradu. Upravo je poboljšanje kvalitete reza i daljnje unaprjeđenje tehnologije rezanja predmet brojnih znanstvenih istraživanja posljednjih godina. Veliki broj autora [59-87] izvršio je opsežna teoretska i eksperimentalna istraživanja te pristupio izradi matematičkih modela koji opisuju karakteristike kvalitete reza i njihovoj optimizaciji. Time se ostvaruju značajni doprinosi na

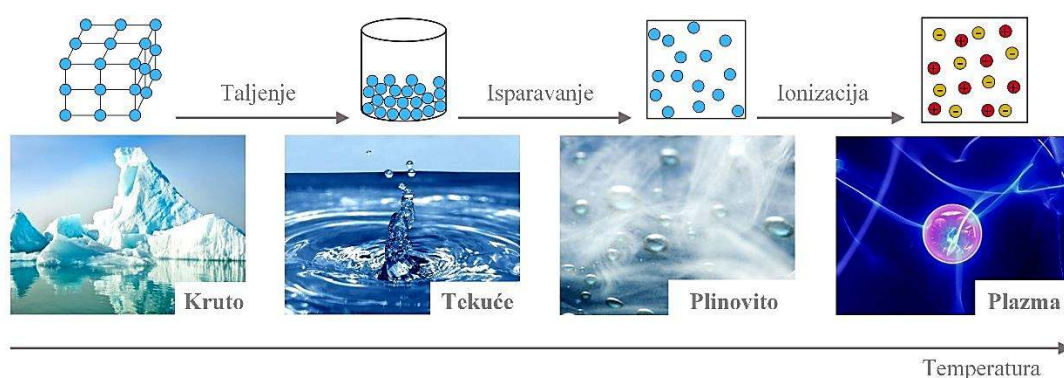
ovom polju. U daljnjem izlaganju, nakon uvodnog opisa same tehnologije, bit će dan i opsežan pregled do sada objavljenih znanstvenih radova koji se bave ovom problematikom.

2.5.1. Uvodno o plazmi

Sredinom 19. stoljeća češki filozof Jan Evangelista Purkyně (1787.-1869.) upotrijebio je grčku riječ "plazma" kako bi opisao prozirnu tekućinu koja preostaje nakon što se iz krvi uklone sve čestice. Pedeset godina kasnije (1927.) američki znanstvenik Irving Langmuir (1881.-1957.) predložio je da se elektroni, ioni i neutralne čestice u ioniziranom plinu, mogu na sličan način smatrati "krvnim česticama" u nekom tekućem mediju. Prvi je plazmu na znanstveni način opisao Sir William Crookes (1832.-1919.) godine 1879. nazvavši je "materijom koja zrači". Također, još i antički grčki filozof Empedoklo je prepoznao postojanje četiri "elementa" tj. oblika materije: zrak, voda, zemlja i vatra. Za razliku od zraka (plin), vode (tekućina) i zemlje (kruta tvar) plazma nije toliko očigledna i bliska. Ipak, proizvodi koje je omogućila tehnologija na bazi plazme preplavili su našu svakodnevnicu. Svi mikroelektrični elementi, izvori svjetlosti, veliki plazma zaslone, solarne ćelije, lopatice turbo motora, biokompatibilni ljudski umetci, razni tekstilni proizvodi, ili se temelje na plazmi ili se ona koristi u njihovoj proizvodnji. Danas ne zaobilazni tehnološki postupci kao što su zavarivanje, rezanje, eliminacija otpadnih tvari, sterilizacija medicinske opreme i umetaka, pročišćavanje zraka i brojni drugi, koriste neku vrstu plazme. Plazma je izuzetno širok pojam te pod njega spada primjerice plamen, munja, polarna svjetlost, Sunce, fluorescentne cijevi, štedne žarulje itd. Sve te plazme moguće je opisati pomoću tri osnovna parametra: temperature čestica, gustoće čestica i jačine stacionarnog magnetskog polja. Temperatura se mjeri u elektron voltima ($1 \text{ eV} = 11066 \text{ K}$), gustoća u broju čestica po metru kubnom, a magnetsko polje u Teslima (T) [46].

Kada se govori o nastajanju plazme potrebno je krenuti od tvari u krutom stanju, slika 2.26. Struktura tvari u krutom stanju određena je elektromagnetskim silama koje određuju statički razmještaj atoma i molekula u kristalnoj strukturi. U takvim strukturama energije vezivanja atoma i molekula veće su od okolne termalne energije. Ukoliko neko kruto tijelo stavimo u dovoljno vruću okolinu, temeljna kristalna struktura se razara: kristali se tope, tekućina se pretvara u paru tj. u slobodne molekule koje se sudaraju, a molekule u plinu/pari se razdvajaju na atome koji ih sastavljaju tj. molekule disociraju. Na isti način pri još većim termalnim energijama atomi se u sudarima rastavljaju na negativno nabijene elektrone i pozitivno nabijene ione. Te nabijene čestice u gibanju stvaraju električna i magnetska polja. Materija u takvom stanju naziva se plazma [46].

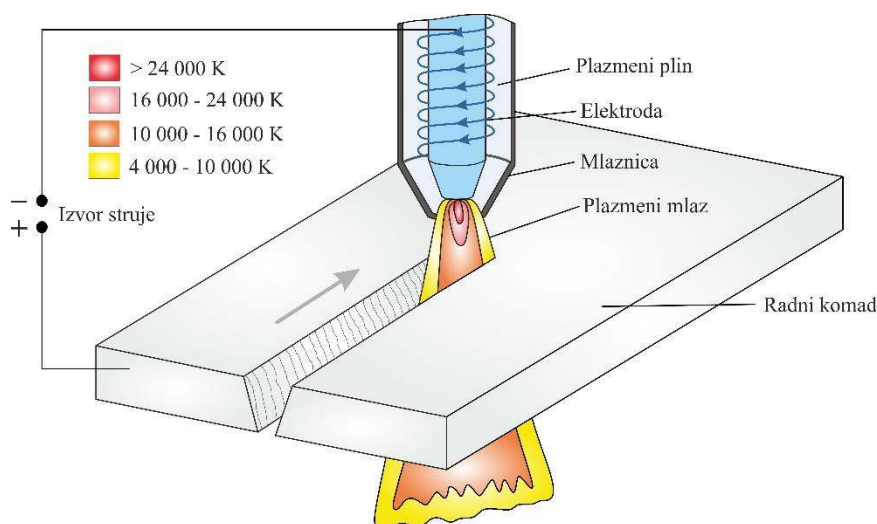
Općenito, plazma nastaje dovođenjem energije plinu, primjerice zagrijavanjem plina ili ubacivanjem visokoenergetskih čestica u plin. Visokoenergetske čestice mogu biti elektroni, protoni, ioni i fotoni. Na primjer, da bi se ionizirala vodena para potrebno je dovesti energiju od oko 12 eV, tj. temperaturu od oko 12 000 °C. Jedan od osnovnih načina stvaranja plazme pod čovjekovom kontrolom je pomoću električnih izboja. Dovođenjem električne energije električno polje prenosi energiju na elektrone u plinu (elektroni su najpokretljivije nabijene čestice, 1836 puta lakše od protona). Elektroni sudarima prenose energiju na neutralne čestice u plinu. Sudari mogu biti elastični (kinetička energija se ne mijenja) i neelastični (elektroni gube energiju koja se prenosi na česticu). Kada je energija elektrona dovoljno velika u sudaru s neutralnom česticom dolazi do promjene elektronske strukture čestice. Što je veća energija sudara vjerojatniji su i procesi pobude atoma/molekula (prijelaz vezanog elektrona atoma u višu atomsku orbitalu), razdvajanja atoma koji čine molekulu (disocijacije) ili ionizacije (izbacivanja elektrona iz atoma/molekula). Energija pobude atoma iznosi cca. 1.5 do 5 eV, dok se energija ionizacije kreće od 5 do 15 eV. Energija vezivanja atoma u molekulama je manja, pa tako u molekularnim plazmama prvo dolazi do disocijacije molekula. Pobuđeni atomi u pravilu kratko žive u pobuđenom stanju, svega nekoliko nanosekundi, nakon kojih se atom vraća u početno stanje uz emisiju fotona. Da bi se plin održao u stanju plazme potrebno mu je stalno dovoditi energiju. Ovisno o načinu dovođenja energije i količini prenesene energije mijenjaju se svojstva plazme izražena preko gustoće elektrona i temperature čestica. Dakle, zaključno plazma je manje ili više ionizirani plin koji se sastoji od elektrona, iona i neutralnih čestica koje mogu biti u osnovnom ili pobuđenim stanjima [46].



Slika 2.26. Ilustracija agregatnih stanja tvari i njihova promjena

2.5.2. Opis tehnologije rezanja metala plazmenim mlazom

Kod ovog postupka rezanja plazma nastaje tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Plin se dovodi u prostor između elektrode i mlaznice. Elektroda i mlaznica se ne dodiruju već su razdvojene prstenom koji na sebi ima male otvore. Ti otvori služe za formiranje vrtložnog kretanja plazmenog mlaza. Prolaskom električnim lukom plin se disocira i ionizira pri čemu se dobiva plazmeni mlaz visoke temperature (20 000 – 40 000 °C) i gustoće energije koji prolazi kroz mlaznicu visokom brzinom i koji je sposoban rezati metale različitih debljina. Pri izlasku iz mlaznice plazmeni mlaz najprije tali metal, a zatim tako rastopljeni metal i otpuhuje iz zone reza. Električni luk se uspostavlja između anode i katode. Ovisno o tome nalazi li se anoda na predmetu obrade ili mlaznici glave za rezanje razlikuje se postupak s prenesenim i neprenesenim lukom. Kod postupka s neprenesenim lukom električni luk nastaje između elektrode i mlaznice te radni komad nije uključen u strujni krug. Ova vrsta postupka se koristi za plazma naštrcavanje, zavarivanje ili za obradu nemetala gdje se koriste niže jakosti struja. U usporedbi s prenesenim lukom nepreneseni luk posjeduje i nižu gustoću energije. Kod postupka s prenesenim lukom električna struja se prenosi od vrha elektrode (negativni pol) do predmeta obrade (pozitivan pol) i natrag do izvora struje. Preneseni luk karakterizira visoka gustoća energije koja se koristi za taljenje i rezanje metala obrade. Pored rezanja preneseni luk se može koristiti također i u postupcima zavarivanja [47].



Slika 2.27. Postupak rezanja metala plazmenim mlazom

Osnovni dijelovi svakog sustava za rezanje plazmenim mlazom su: sustav za vođenje rezne glave, sustav za opskrbu plinom, izvor struje za rezanje, rezna glava s mlaznicom i elektrodom te radni stol, slika 2.27. Iako je svaki od ovih dijelova bitan za efikasnost i ekonomičnost samog procesa rezanja te za konačnu kvalitetu reza ipak, elektroda i mlaznica su od svih njih

najizloženiji obradi i trošenju pa time i najviše utječu na krajnji rezultat obrade. Elektrode mogu biti izrađene iz volframa (W), cirkonija (Zr), hafnija (Hf), bakra (Cu) pa čak i srebra (Ag), tablica 2.3. Mlaznica je konstruirana tako da je promjer njenog otvora malo veći od promjera fokusiranog ioniziranog plina. Time se postiže fokusiranje plazmenog mlaza bez nepovoljnog utjecaja na samu mlaznicu. Oštećenje i trošenje unutarnjeg ili vanjskog dijela mlaznice dovodi do slabije kvalitete reza. Oštećenje unutarnjeg dijela mlaznice može biti uzrokovano pregaranjem elektrode, problemima vezanim za paljenje električnog luka ili protok plina ili pak postavljanjem prevelike ili preniske jakosti struje. Do oštećenja vanjskog dijela mlaznice može doći uslijed prevelikog štrcanja metala koje nastaje zbog male visine glave za rezanje od predmeta obrade, prilikom probijanja debljih limova ili zbog problema oko uspostavljanja električnog luka između elektrode i predmeta obrade. Trošenje elektrode je često povezano s tlakom plazmenog plina. Visoki tlakovi plazmenog plina povećavaju kvalitetu reza, ali i ubrzavaju trošenje elektrode, dok se nižim tlakovima ostvaruje dulji vijek trajanja elektrode, ali i nešto lošija kvaliteta reza [49].

Tablica 2.3. *Materijali od kojih se izrađuju elektrode kod postupka rezanja plazmenim mlazom, [48]*

Materijal	Simbol	Temperatura tališta (°C)	Plin za rezanje	Toplinska vodljivost pri 20°C (W/mK)
Volfram	W	≈ 3400	Ar	≈ 174
Volframov oksid	WO ₃	≈ 1473	Ar/H ₂	
Cirkonij	Zr	≈ 1852	O ₂	≈ 22
Cirkonijev oksid	ZrO ₂	≈ 2700	Zrak	≈ 2.5
Cirkonijev nitrid	ZrN	≈ 2982		
Hafnij	Hf	≈ 2227		
Hafnijev oksid	HfO ₂	1700	O ₂	
Hafnijev nitrid	HfN	3305	Zrak	≈ 29
Bakar	Cu	1083		
Bakrov oksid	Cu ₂ O	1235	Svi	≈ 400
Srebro	Ag	961	Svi	≈ 429

Od plinova za rezanje moguće je koristiti komprimirani zrak, kisik, dušik, argon, vodik i njihove mješavine. Plin ima funkciju da sudjeluje u stvaranju plazmenog mlaza, da štiti plazmeni mlaz i mlaznicu od reakcije s okolnim zrakom i metalom u zoni reza te da sudjeluje u odnošenju rastaljenog metala iz zone reza.

Zrak je najčešće korišteni plazmeni plin. Njime se postiže dobra kvaliteta reza i brzina rezanja kod ugljičnih, nehrđajućih čelika i aluminija. Također i vijek trajanja potrošnih dijelova je prihvatljiv. Bitno je voditi računa da se koristi komprimirani zrak koji je očišćen od svih nečistoća kao što su krute čestice i vlaga. Prednost primjene zraka kao plazmenog plina su uštede u procesu rezanja zbog njegove lake dostupnosti i niske cijene.

Kisik kao plazmeni plin se koristi kod rezanja ugljičnih čelika. Za razliku od ostalih plazmenih plinova njime se postiže najbolja kvaliteta reza. Također, kisik djeluje oksidirajuće na talinu čime se proizvodi dodatna toplina i tako povećava brzina rezanja. Pri rezanju ugljičnih čelika kisik reagira s materijalom te proizvodi finiji mlaz taline čime je dodatno olakšano ispuhivanje taline iz zone reza. Nedostatak upotrebe kisika kao plazmenog plina je njegova cijena i kraći vijek trajanja potrošnih dijelova. Ti nedostaci se kompenziraju preko manje potrebne naknadne obrade reza poput uklanjanja troske i ravnjanja površine reza. Kisik nije preporučljivo koristiti za rezanje aluminija i nehrđajućih čelika.

Dušik se kao plazmeni plin često koristi kod postupaka sa sekundarnim plinom u kombinaciji s argonom, vodikom, ali i s ugljikovim dioksidom te kod postupaka s injektiranjem vode u plazmeni mlaz. Korištenjem dušika postiže se jako dobra kvaliteta reza kod rezanja nehrđajućih čelika i aluminija. Također on osigurava i izvrstan vijek trajanja potrošnih dijelova. Dušik zahtijeva veći napon kod prelaska u stanje plazme čime se povećava utrošak energije za vrijeme obrade, što znači i veću cijenu. Dušik nije preporučljivo koristiti za rezanje ugljičnih čelika zbog pojave nitracije na površini reza i formiranja troske.

Argon-vodik mješavina je izvrstan izbor kod rezanja debljih limova od nehrđajućeg čelika i aluminija (iznad 15 mm). Obično se koristi omjer 35% vodika i 65% argona (H-35). Ovakva mješavina plinova proizvodi gotovo ravnu i poliranu površinu reza kod nehrđajućih čelika. Argon-vodik smjesa se koristi u plazma sustavima s injektiranjem vode u mlaz gdje se jakosti struje kreću do 1000 A za rezanje nehrđajućeg čelika debljine i do 150 mm. Također, često se koristi i u sustavima sa sekundarnim plinom dušikom. Glavni nedostatak korištenja ovakvih kombinacija plinova je visoki trošak takve obrade zbog čega ih nije preporučljivo koristiti za rezanje tanjih limova jer se i jeftinijim plinovima može postići slična kvaliteta reza.

Također, kao plin je moguće koristiti i ugljični dioksid. On se uglavnom primjenjuje kao sekundarni plin u sustavima s dušikom ili mješavinom argona i vodika kao plazmenim plinovima [50].

Svaki od gore spomenutih plinova i plinskih mješavina se može koristiti samo kao plazmeni plin, kao dodatni (sekundarni) plin u dualnim sustavima ili pak kao oboje. U tablici 2.4 su navedene neke od kombinacija plinova koje je preporučljivo koristiti za plazma rezanje različitih vrsta materijala, a slika 2.28 prikazuje utjecaj različitih plinova na izgled površine reza kod nehrđajućeg čelika.

Tablica 2.4. Plinovi kod postupka rezanja metala plazmenim mlazom, [51, 52]

Vrsta materijala	Plazmeni plin	Sekundarni plin (ako se koristi)
Konstrukcijski čelik	Zrak	Zrak
	Kisik	Zrak ili kisik
	Kisik	Zrak ili zrak-dušik
Visoko legirani čelik	Zrak	Zrak
	Argon-vodik	Dušik
	Argon-vodik-dušik	Dušik
Aluminij	Zrak	Zrak
	Argon-vodik	Zrak ili dušik
	Zrak	Dušik-vodik



Debljina lima: 15 mm
Jakost struje: 400 A
Plin: N₂



Debljina lima: 12 mm
Jakost struje: 200 A
Plin: N₂/Zrak



Debljina lima: 12 mm
Jakost struje: 70 A
Plin: Zrak/CH₄



Debljina lima: 10 mm
Jakost struje: 200 A
Plin: ArH₂-N₂/N₂



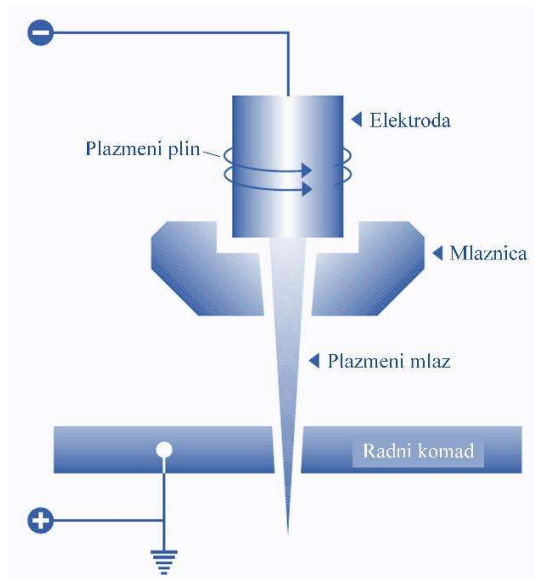
Debljina lima: 4 mm
Jakost struje: 120 A
Plin: N₂/N₂

Slika 2.28. Utjecaj različitih plinova na izgled površine reza kod nehrđajućeg čelika

2.5.3. Varijante postupka rezanja metala plazmenim mlazom

2.5.3.1. Konvencionalni postupak rezanja plazmenim mlazom

Kod konvencionalnog postupka rezanja metala plazmenim mlazom koristi se samo jedan plin, slika 2.29. Najčešće je to samo zrak ili samo dušik. Taj plin ima trostruko djelovanje. On istovremeno ionizacijom stvara plazmeni mlaz, štiti elektrodu i sudjeluje u otpuhivanju rastaljenog metala iz zone reza. Plin se ubrizgava tangencijalno u prostor između elektrode i mlaznice. Vrtložno kretanje plina uzrokuje da se hladnije zone plina udaljavaju radijalno od elektrode čime se stvara granični zaštitni sloj s unutarnje strane mlaznice (uz unutarnju stijenku mlaznice). Ovime se štiti elektroda od trošenja i produljuje se njen životni vijek. Ovaj postupak se koristi za rezanje širokog raspona debljina limova iz nehrđajućeg čelika i aluminija [50].

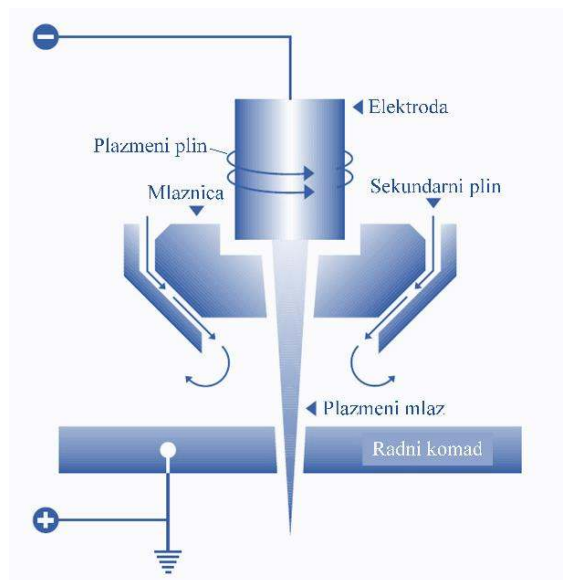


Slika 2.29. Konvencionalni postupak rezanja metala plazmenim mlazom

2.5.3.2. Postupak rezanja plazmenim mlazom sa sekundarnim plinom

Ovaj postupak je modifikacija konvencionalnog postupka. Kod njega se koaksijalno s mlaznicom osnovnog plina nalazi i mlaznica za dovod rotirajućeg sekundarnog plina, slika 2.30. Sekundarni plin "omata" tj. štiti plazmeni mlaz od utjecaja okolne atmosfere i mlaznicu osnovnog plazmenog plina od štrcanja metala do kojeg može doći prilikom probijanja lima. Ovo je posebno bitno kod rezanja visokolegiranih čelika, gdje može doći do reakcije kisika iz zraka s površinom reza. U ovakvim dualnim sustavima kao plazmeni plin se najčešće koristi dušik, a dodatni plin se odabire prema vrsti materijala koji se reže. Pa se tako za rezanje niskougljičnih čelika kao dodatni plin odabire zrak ili kisik, za nehrđajuće čelike ugljični dioksid, a za aluminij mješavina argona i vodika. Kod rezanja niskougljičnih čelika ovim

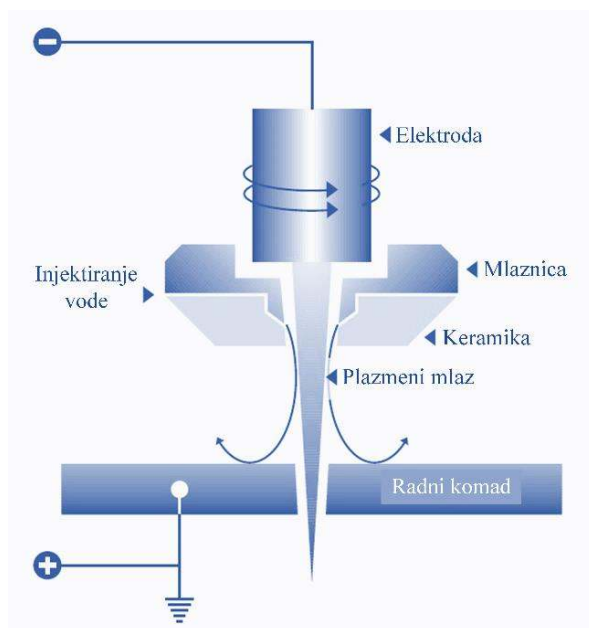
postupkom brzine rezanja su veće u usporedbi s konvencionalnim postupkom. To ne vrijedi i za nehrđajuće čelike i aluminij. Preporuka je koristiti ovaj postupak za debljine limova iz nehrđajućeg čelika i aluminija iznad 15 mm zbog toga što su kod manjih debljina lima kvaliteta reza i brzina rezanja približno jednaka konvencionalnom postupku koji je ekonomičniji od ovoga [50].



Slika 2.30. Postupak rezanja plazmenim mlazom sa sekundarnim plinom

2.5.3.3. Postupak rezanja plazmenim mlazom s injektiranjem vode

Kod ovog postupka za rezanje se koristi samo jedan plin. U mlaznicu se vrši injektiranje vode radijalno ili vrtložno, slika 2.31. Time se postiže suženje plazmenog mlaza i povećanje njegove gustoće. Suženjem plazmenog mlaza postiže se bolja kvaliteta reza i veća brzina rezanja. Također, injektiranjem vode se postiže i hlađenje mlaznice na mjestu maksimalnog suženja plazmenog mlaza i maksimalnog razvoja topline. Unatoč visokim temperaturama, na mjestu gdje se voda injektira u plazmeni mlaz manje od 10% vode isparava. Voda u potpunosti štiti cijeli donji dio mlaznice i eliminira pojavu dvostrukog električnog luka koji može nastati između elektrode i mlaznice i uslijed kojeg dolazi do intenzivnijeg trošenja elektrode. Zbog ovoga je s vremenom u ovaj postupak bilo moguće implementirati i inovaciju tj. cijeli donji dio mlaznice koji je izrađen iz keramike. Također, voda služi i za hlađenje gornje površine predmeta obrade. Kao plazmeni plin kod ovog postupka se najčešće koristi dušik. Budući da dušik teže prelazi u stanje plazme potrebno mu je dovesti veću energiju zbog čega se primjenjuju jakosti struje od 260 do 800 A. Preporučljivo je koristiti ovaj postupak za debljine lima iznad 15 mm. Njegov glavni nedostatak je nešto veća cijena [50].



Slika 2.31. Postupak rezanja plazmenim mlazom s injektiranjem vode

2.5.3.4. Postupak rezanja plazmenim mlazom pod vodom

Kod postupka rezanja pod vodom predmet obrade i mlaznica su uronjeni u vodu 50 do 100 mm, slika 2.32. Time se uvelike smanjuje količina buke za vrijeme rezanja, eliminira se nastajanje dima i različitih plinova u radnom prostoru te utjecaj topline na zonu reza. Kvaliteta reza je slična onoj koja se postiže s injektiranjem vode u plazmeni mlaz. Nedostatak ovog postupka je što predmet obrade nije vidljiv za vrijeme rezanja, brzine rezanja su smanjene za 10 do 20% u usporedbi s postupcima na suhom i ograničene su debljine rezanja. Također, za vrijeme obrade dolazi do disocijacije vode na vodik i kisik pri čemu kisik može reagirati s rastaljenim metalom (Al), a vodikov plin ima tendenciju nakupljanja ispod lima i uzrokovanja malih eksplozija u dodiru s plazmom. Kako bi se to izbjeglo vrši se konstantno miješanje vode za vrijeme odvijanja procesa. Rezanje se odvija pri visokim jakostima struje, od 400 do 700 A na stolovima koji imaju mogućnost naplavlivanja vodom. To zahtijeva periodičko čišćenje i održavanje sustava čime se povećavaju troškovi obrade. Ovaj postupak se naročito koristi za rezanje tankih konstrukcijskih i nehrđajućih čelika, kako bi se spriječile deformacije.



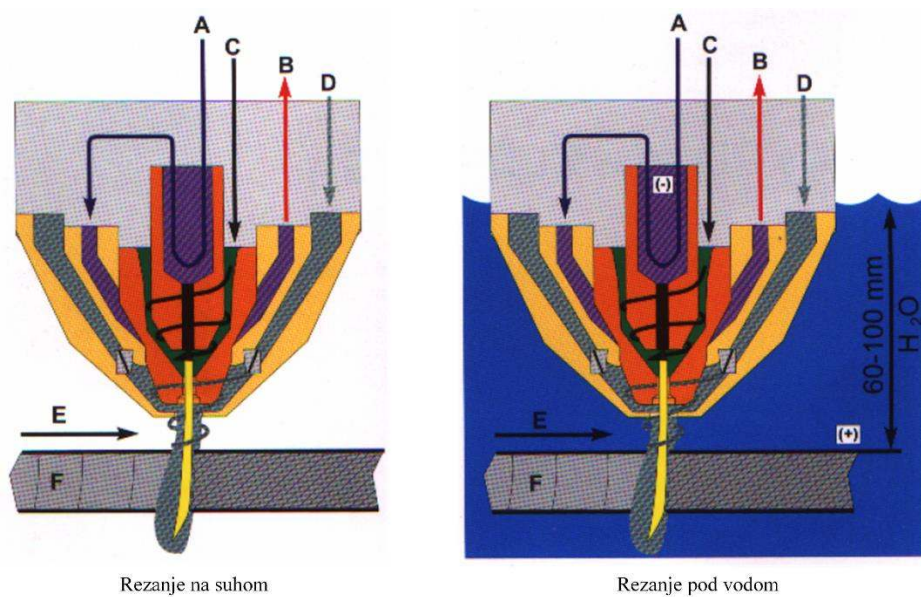
Slika 2.32. Postupak rezanja plazmenim mlazom pod vodom, [53]

2.5.3.5. Postupak rezanja s povećanim suženjem plazmenog mlaza

Kod ovog postupka primjenom mlaznica manjeg promjera, povećanim vrtloženjem plazmenog plina uz dodatni sekundarni vrtložni plin koji dolazi do plazmenog mlaza kroz koaksijalnu mlaznicu bez potencijala ostvaruje se povećano suženje plazmenog mlaza i povećanje njegove gustoće energije, slika 2.33. To rezultira boljom kvalitetom reza tj. okomitijim površinama reza, većom preciznošću i minimalnom potrebnom naknadnom obradom. Također, povećano vrtloženje i primjena dodatnog plina sprječavaju i nastajanje dvostrukih električnih lukova između elektrode i mlaznice te trošenje mlaznice uslijed štrcanja rastaljenog metala. U priručnicima se ovaj postupak često pronalazi pod imenom "HiFocus/FineFocus tehnologija" ili pak "plazma rezanje s povećanim vrtloženjem". U postupku je moguće koristiti različite kombinacije plinova ovisno o vrsti materijala koji se reže, tablica 2.5. Također, pored obrade na suhom moguće je vršiti rezanje i pod vodom, slika 2.33. Budući se radi o izvedbi koja je i do 10 puta skuplja u odnosu na konvencionalni postupak preporučljivo ju je koristiti ukoliko postoje zahtjevi za vrlo visokom kvalitetom reza ili pak u velikoserijskoj proizvodnji.

Tablica 2.5. Plinovi kod postupka rezanja s povećanim suženjem plazmenog mlaza, [54]

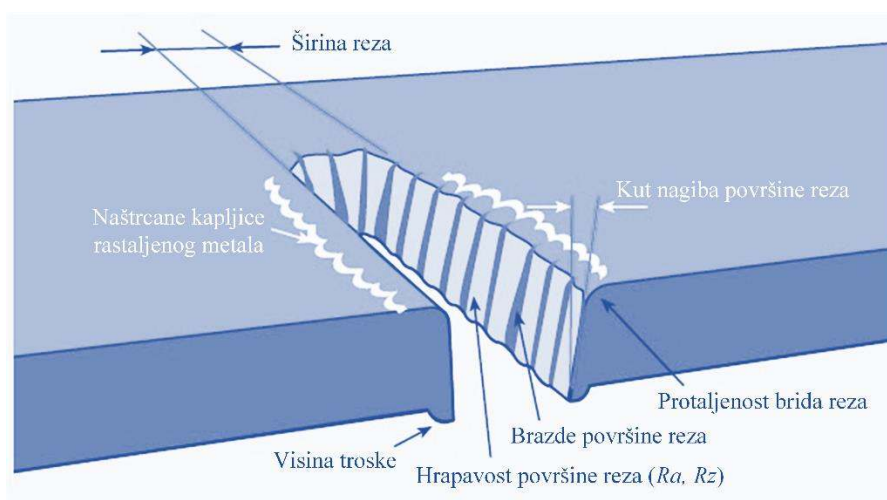
	Vrsta materijala	Plazmeni plin	Vrtložni plin
Rezanje na suhom	Konstrukcijski čelik	O ₂ , Zrak	Zrak
	Nehrđajući čelik	Ar/H ₂ , Ar/N ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂
	Aluminij	Ar/H ₂	Zrak, N ₂
Rezanje pod vodom	Konstrukcijski čelik	O ₂ , Zrak	Zrak
	Nehrđajući čelik	Ar/H ₂ , Ar/N ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	Zrak, N ₂



Slika 2.33. Postupak rezanja s povećanim suženjem plazmenog mlaza, [51]

3. UTJECAJNI FAKTORI NA KVALITET REZA

Cilj svake obrade plazmenim mlazom je postići maksimalnu moguću kvalitetu reza i minimizirati potrebnu naknadnu obradu, a time i troškove proizvodnje. Karakteristike kvalitete reza koje se najčešće promatraju nakon rezanja su: širina reza na ulazu i izlazu plazmenog mlaza iz predmeta obrade, kut nagiba površine reza, hrapavost površine reza (R_a , R_z), visina troske na izlazu plazmenog mlaza iz predmeta obrade, protaljenost brida reza na ulazu mlaza u predmet obrade, slika 3.1. Također, pored karakteristika kvalitete ravnog reza moguće je promatrati i kvalitetu kružnog reza u vidu odstupanja od dimenzija i kružnosti te kuta nagiba cilindrične površine reza.



Slika 3.1. Karakteristike kvalitete reza

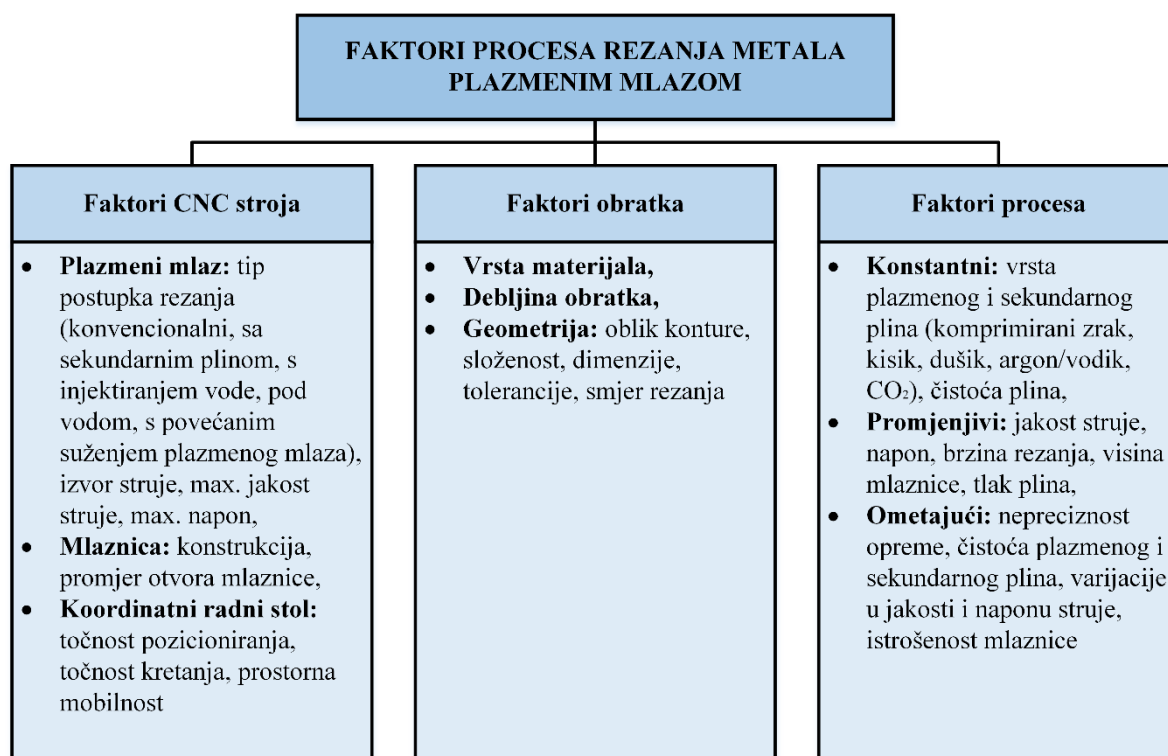
Širina reza predstavlja količinu materijala koja je rastaljena i ispuhana plazmenim mlazom iz predmeta obrade. Ona je proporcionalna veličini promjera otvora mlaznice. Cilj svake obrade plazmenim mlazom je da širina reza bude što je moguće manja. Manja širina reza se može poistovjetiti i većom preciznošću obrade. Širina reza je uvelike pod utjecajem različitih ulaznih faktora obrade.

Druga važna karakteristika kvalitete reza je i kut nagiba površine reza. Cilj je postići minimalni nagib površine reza. Kod korištenja plazma tehnologije s povećanim vrtloženjem plazmenih plinova često se razlikuje nagib između lijeve i desne strane površine reza. Nagib na lijevoj strani se uglavnom kreće od 3° do 9° , a na desnoj od 1° do 3° . Kod konvencionalnog postupka rezanja s laminarnim strujanjem plazmenog plina nagib površine reza može iznositi od 4° do 10° , a razlika između lijeve i desne strane površine reza često nije primjetna [58].

Protaljenost i zakrivljenost brida reza na ulazu mlaza ovisi također o odabranom postupku rezanja plazmenim mlazom te o odabranom plazmenom plinu. Primjenom postupaka sa sekundarnim plinom i s injektiranjem vode u plazmeni mlaz smanjuje se zakrivljenost gornjeg brida reza. Do ove pojave dolazi zbog toga što plazmeni mlaz ima najvišu temperaturu i energiju u trenutku izlaza iz mlaznice.

Također, prilikom promatranja kvalitete reza potrebno je obratiti pozornost i na visinu troske na izlazu mlaza iz predmeta obrade i količinu štrcanja metala uz brid reza na ulazu mlaza. Kod obje ove pojave radi se o nakupinama rastaljenog metala koji je plazmenim mlazom otpuhan iz zone reza. Kao i prethodno spomenute tako i ove dvije pojave ovise uglavnom o podešavanjima ulaznih faktora procesa rezanja.

Kao što je već rečeno, na karakteristike kvalitete reza kod procesa rezanja plazmenim mlazom utječe čitav niz različitih faktora. Tu spadaju faktori CNC stroja, faktori obratka, i faktori samog procesa obrade, slika 3.2. Od promjenjivih faktora procesa najutjecajni su: jakost struje, brzina rezanja, visina mlaznice od predmeta obrade, te tlak plina (plazmenog i/ili sekundarnog).

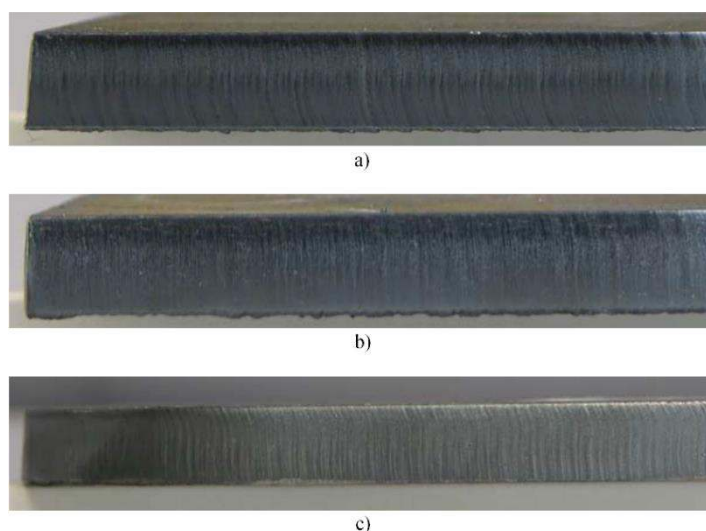


Slika 3.2. Faktori procesa rezanja metala plazmenim mlazom

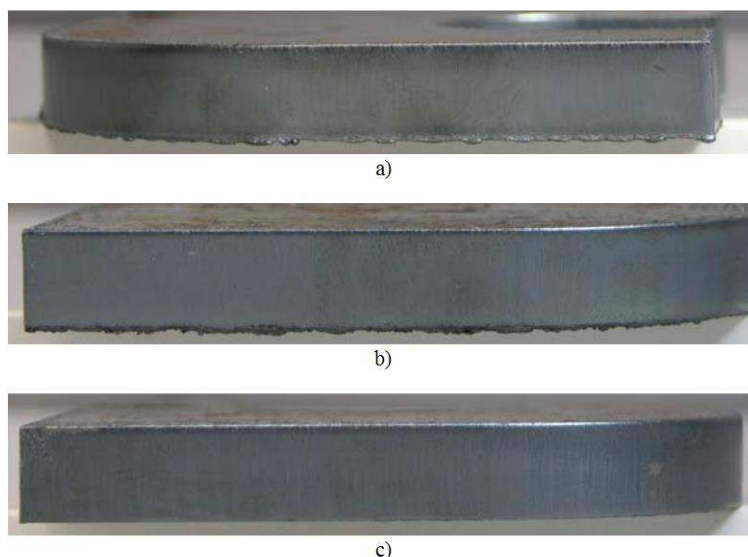
Rezanje plazmenim mlazom se odvija pri istosmjernoj struji, prenesenim lukom i elektrodom spojenom na negativni pol. Izlazna jakost struje iz izvora se može kretati od 10 do 1000 A.

Jakost struje ovisi o vrsti i debljini materijala koji se reže, brzini rezanja te vrsti mlaznice tj. njezinom promjeru otvora. Ukoliko se zahtijeva visoka proizvodnost tada se koriste veće vrijednosti brzine rezanja, visoka jakost struje i mlaznica s većim promjerom otvora. S druge strane, ako je cilj veća kvaliteta reza tada je potrebno koristiti druge vrijednosti jakosti struje i brzine. Uži i precizniji rez se postiže pri manjim strujama. Okomitiji rez se postiže s manjim brzinama rezanja, manjom jakosti struje i manjim promjerom otvora mlaznice. Potrebno je voditi računa da jakost struje ne bude premala jer ona označava i malu energiju plazmenog mlaza što za posljedicu ima nefokusirani mlaz i prljav rez. Promjer otvora mlaznice treba biti proporcionalan s jakošću struje. Što je promjer otvora mlaznice veći to on može podnijeti i veću jakost struje. Promjer otvora mlaznice od 1.5 mm može podnijeti jakost struje do 100 A, dok onaj od 6 mm može podnijeti i do 1000 A.

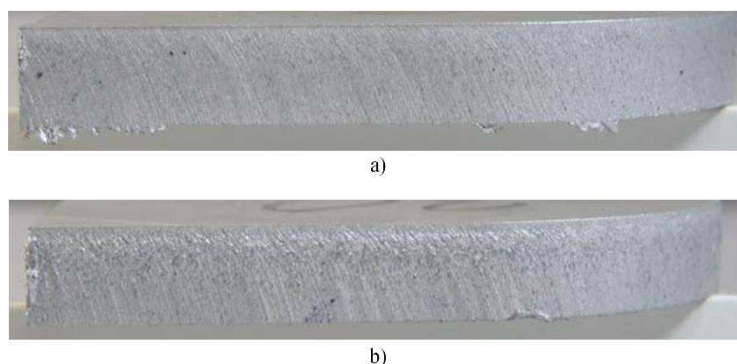
Brzina rezanja koja je prevelika ili premala, također je uzrok boljoj ili lošijoj konačnoj kvaliteti reza, slike 3.3, 3.4 i 3.5. Prevelika brzina rezanja rezultira zaostajanjem, oscilacijama i nestabilnijim plazmenim mlazom (veća širina reza) što može dovesti čak do toga da plazmeni mlaz ne uspije penetrirati u materijal. Također, pri velikim brzinama rezanja povećava se i nagib reza. S druge strane, širina reza je obrnuto proporcionalna brzini rezanja. Prevelika i premala brzina rezanja dovodi i do stvaranja troske na izlazu plazmenog mlaza iz predmeta obrade pri čemu je troska koja nastane pri većim brzinama teže za ukloniti od one koja nastane pri manjim brzinama rezanja.



Slika 3.3. Utjecaj brzine rezanja na kvalitetu površine reza kod konstrukcijskog čelika
(plin: zrak), a) veće vrijednosti brzine rezanja, b) manje vrijednosti brzine rezanja,
c) ispravno postavljena brzina rezanja, [56]



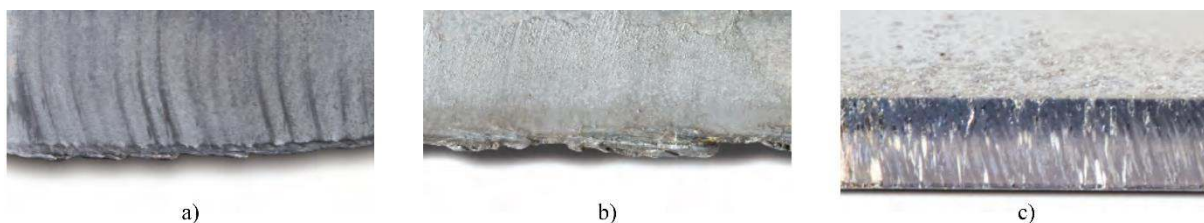
Slika 3.4. *Utjecaj brzine rezanja na kvalitetu površine reza kod konstrukcijskog čelika (plin: O₂), a) veće vrijednosti brzine rezanja, b) manje vrijednosti brzine rezanja, c) ispravno postavljena brzina rezanja, [56]*



Slika 3.5. *Utjecaj brzine rezanja na kvalitetu površine reza kod aluminija (plin: zrak), a) veće vrijednosti brzine rezanja, b) manje vrijednosti brzine rezanja, [56]*

Brzina rezanja je obrnuto proporcionalna debljini materijala koji se reže, a jakost struje treba podešavati tako da se za deblje limove koriste veće vrijednosti.

Pravilno podešavanje visine mlaznice od predmeta obrade je također vrlo bitno za postizanje zadovoljavajuće kvalitete reza. Prevelika visina mlaznice od lima koji se reže dovodi do zaobljenja gornjeg brida reza, šireg i nepreciznijeg reza te većeg kuta nagiba površine reza. Također, previsoki položaj mlaznice od predmeta obrade rezultira i štrcanjem metala te nakupljanjem kapljica uz sami brid reza na ulazu mlaza, slika 3.6. Jedan od uzročnika takvoj pojavi je i prevelika brzina rezanja.



Slika 3.6. a) i b) izgled troske na izlazu mlaza iz predmeta obrade, c) *naštrcane kapljice* metala uz brid reza na ulazu mlaza u predmet obrede, [57]

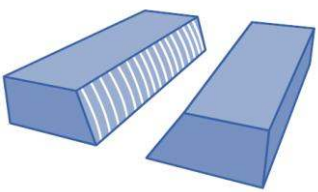
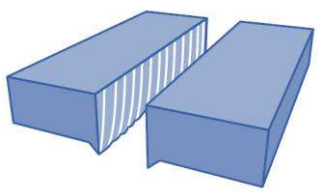
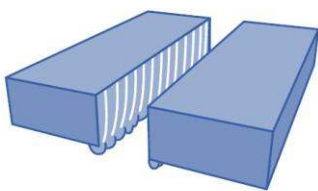
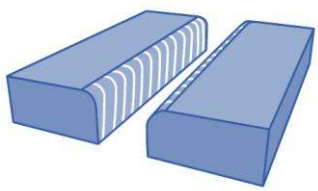
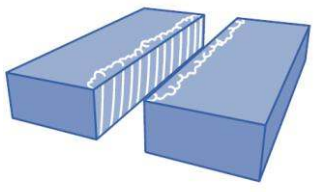
Pored prethodno spomenutih faktora procesa koji se podešavaju od strane operatera, na kvalitetu reza uvelike utječe i istrošenost elektrode i mlaznice. Njihovim trošenjem povećava se kut nagiba površine reza, smanjuje se preciznost obrade, i povećava se količina nakupljenog rastaljenog metala na ulazu i izlazu mlaza iz predmeta obrade.

Kao što je već prethodno spomenuto na kut nagiba reza utječe odabarni postupak rezanja plazmenim mlazom. Ukoliko se koristi tehnologija s povećanim vrtloženjem plinova tada se može očekivati na jednoj strani površine reza veći nagib nego na drugoj. Uzrok tome je taj što plazmeni plin svojim povećanim vrtloženjem uklanja s jedne strane reza veću količinu materijala. Ako se pak koristi konvencionalni postupak rezanja samo s jednim plazmenim plinom tada nema tako primjetne razlike u nagibu površine reza između lijeve i desne strane. U skladu s tim, može se zaključiti kako je kod postupka s povećanim vrtloženjem plinova potrebno pravilno odabrati i smjer rezanja kako bi manji nagib površine reza bio na željenom izradku, a veći na škartu, dok je kod konvencionalnog postupka manje bitno koji se smjer rezanja koristi (osobito kod debljina lima ispod 10 mm) budući da nema primjetne razlike u nagibu lijeve i desne strane reza [58]. To pokazuje i slika 3.7.



Slika 3.7. *Nagib lijeve i desne strane površine reza, a) konvencionalni postupak, b) postupak rezanja s povećanim vrtloženjem plinova, [58]*

Tablica 3.1. *Različite pojave koje utječu na kvalitetu reza i mogući uzroci*

Pojava	Mogući uzroci
 Veliki kut nagiba površina reza	Prevelika visina mlaznice od predmeta obrade Premala jakost struje Prevelika brzina rezanja Petrošena mlaznica/elektroda
 Troska na izlazu mlaza iz predmeta obrade Uži rez	Velika brzina rezanja Mala jakost struje Velika visina mlaznice od predmeta obrade
 Troska na izlazu mlaza iz predmeta obrade Širi rez	Mala brzina rezanja Velika jakost struje Velika visina mlaznice od predmeta obrade
 Protaljeni i zaobljeni gornji brid reza	Neprikladan sekundarni plin Velika visina mlaznice od predmeta obrade Velika brzina rezanja
 Naštrcane kapljice rastaljenog metala uz gornji brid reza	Mala brzina rezanja Velika visina mlaznice od predmeta obrade Petrošena mlaznica

U tablici 3.1. su navedene različite pojave koje utječu na kvalitetu reza. Iz tablice je evidentno da različiti faktori različito utječu na karakteristike kvalitete. Također, može se zaključiti i da optimalnu kvalitetu reza nije moguće postići pravilnim podešavanjem samo jednog od ulaznih faktora već je potrebno uzeti u obzir i druge faktore, budući je često slučaj da se pravilnim podešavanjem jednog faktora maksimizira jedna karakteristika kvalitete, a

minimizira druga. Time se nameće zaključak kako je potrebno sveobuhvatno analizirati utjecaj više različitih faktora na više različitih karakteristika kvalitete reza te odrediti njihove optimalne vrijednosti. Veliki broj autora je u posljednjih par godina proveo opsežna znanstvena istraživanja usmjerena na matematičko modeliranje i optimiranje spomenutih karaktersitika kvalitete reza. Najznačajnija od njih navedena su u sljedećem poglavlju.

4. DOSADAŠNJA ZNANSTVENA ISTRAŽIVANJA

Kechagias et al. [59] su analizirali utjecaj sedam različitih faktora na kut nagiba cilindrične površine kružnog reza. Ulazni faktori koji su uzeti u obzir su debljina lima, brzina rezanja, jakost struje, napon struje, tlak plazmenog plina, visina mlaznice u trenutku probijanja lima i visina mlaznice od predmeta obrade za vrijeme rezanja. Materijal koji je korišten u eksperimentima je konstrukcijski čelik St37 debljine 6.5 i 10 mm. Istraživanje je provedeno prema Taguchi planu eksperimenata L_{18} . Uzorke su predstavljali kružni rezovi promjera 20 mm. Na kraju je provedena analiza srednjih vrijednosti i analiza varijance kako bi se definirali najutjecajniji parametri obrade i kako bi se odredile približno optimalne vrijednosti kojima se postiže minimizacija kuta nagiba cilindrične površine kružnog reza. Autori su zaključili da jakost struje ima najveći utjecaj na analizirani odziv.

Ravi Kumar et al. [60] su proveli eksperimente na nehrđajućem čeliku 21Cr debljine 5 mm prema Taguchi planu eksperimenata L_9 . Ulazni faktori čije su vrijednosti varirane u eksperimentima su tlak zraka, brzina rezanja, jakost struje i visina mlaznice od predmeta obrade. Analizirane izlazne karakteristike kvalitete su hrapavost (R_a) i kut nagiba površine reza. Nakon obavljenih mjerenja provedena je optimizacija kombiniranjem TOPSIS metode i sive relacijske analize s ciljem pronalaska vrijednosti ulaznih faktora kojima se postiže minimizacija obiju funkcija cilja.

Pawar et al. [61] su proučavali utjecaj brzine rezanja, napona struje i tlaka plazmenog plina na širinu reza i kut nagiba površine reza kod rezanja nehrđajućeg čelika 316L. Kao plazmeni plin korišten je komprimirani zrak. Eksperimenti su provedeni prema Taguchi planu L_9 na tri različite debljine lima, 4, 8 i 12 mm. Mjerenje odzivnih veličina je provedeno na ravnim rezovima duljine 150 mm. Po završetku mjerenja, kako bi se provela višeciljna optimizacija, za svaku debljinu lima izvršena je analiza varijance i siva relacijska analiza.

Venugopal et al. [62] su proveli istraživanje na nehrđajućem čeliku SS420 debljine 10 mm. Eksperimenti su izvršeni prema Taguchi planu L_{27} variranjem tri ulazna faktora: jakosti struje, brzine rezanja i visine mlaznice od predmeta obrade. Analizirani odzivi su hrapavost površine reza (R_a) i proizvodnost (MRR) (eng. Material removal rate). Regresijskom analizom su dobiveni matematički modeli koji izražavaju ovisnost razmatranih odziva o ulaznim faktorima. Višeciljna optimizacija je, kako bi se istovremeno postiglo smanjenje hrapavosti površine reza i povećanje proizvodnosti, provedena korištenjem sive relacijske analize.

Salonitis et al. [63] su analizirali utjecaj 4 različita ulazna faktora: brzine rezanja, jakosti struje, visine mlaznice od predmeta obrade i tlaka plazmenog plina na: hrapavost površine reza (R_a), nagib površine reza (izražen u postocima) i širinu zone utjecaja topline. Izabrani materijal obratka je konstrukcijski čelik S235 debljine 15 mm. Za rezanje je korišten dualni sustav s primarnim i sekundarnim plazmenim plinom. Kao primarni plin je korišten kisik, a kao sekundarni zrak. Realizacija eksperimenata je izvršena prema Taguchi planu L_9 . Po završetku mjerenja odzivnih veličina provedena je jednociljna Taguchi optimizacija analizom odnosa signal-šum (eng. Signal to Noise ratio, S/N) te analiza varijance kako bi se definirali najutjecajniji ulazni faktori. Visina mlaznice od predmeta obrade se pokazala kao faktor s najvećim utjecajem na nagib površine reza i hrapavost, a jakost struje je najutjecajnija kod analize širine zone utjecaja topline. Također, u radu je provedeno i matematičko modeliranje regresijskom analizom te su izrađeni dijagrami utjecaja interakcija ulaznih faktora procesa na razmatrane karakteristike kvalitete reza.

Teja et al. [64] su ispitivali kvalitetu reza kod konstrukcijskog čelika debljine 8, 10, 14 i 16 mm. Pored debljine lima ulazni faktori su još i brzina rezanja te jakost i napon struje. Autori su proveli ekperimente u skladu s Taguchi L_{16} planom koristeći argon kao plazmeni plin. Razmatrane odzivne veličine procesa su širina reza i hrapavost površine reza (R_a). Višeciljna optimizacija karakteristika kvalitete reza provedena je sivom relacijskom analizom i analizom varijance.

Sandeep et al. [65] su proveli višeciljnu optimizaciju hrapavosti površine reza (R_a) i proizvodnosti kod rezanja nehrđajućeg čelika SS420 debjine 10 mm. Eksperimenti su realizirani prema Taguchi L_9 planu eksperimenata. Ulazni faktori čiji je utjecaj analiziran u radu su brzina rezanja, jakost struje i visina mlaznice od predmeta obrade. Višeciljna optimizacija je provedena uz pomoć sive relacijske analize i analize varijance. Također, izvršeno je i matematičko modeliranje metodom odzivne površine uz pomoć Design Expert softvera te su dobiveni dijagrami utjecaja interakcija ulaznih faktora na razmatrane odzivne veličine procesa. Iz kreiranih prikaza je vidljivo da jakost struje ima najveći utjecaja na hrapavost površine reza, a na proizvodnost i jakost struje i brzina rezanja.

Tsiolikas et al. [66] su proveli optimizaciju hrapavosti površine reza (R_a i R_z) korištenjem Taguchi metode i analize varijance. Kao materijal obratka korišten je konstrukcijski čelik St37 debljine 16 mm, a kao plazmeni plin komprimirani zrak. Realizacija eksperimenata je izvršena prema Taguchi L_{27} planu variranjem tri ulazna faktora: brzine rezanja, visine mlaznice od

radnog komada i napona struje. Analizom varijance je utvrđeno da je napon struje faktor s najvećim utjecajem na odzivne veličine hrapavosti površine reza.

Kumar Das et al. [67] su analizirali utjecaj tlaka plazmenog plina, jakosti struje i visine mlaznice od predmeta obrade na hrapavost površine reza i proizvodnost. Hrapavost površine reza je izražena preko pet različitih parametara: srednjeg aritmetičkog odstupanja profila (R_a), srednjeg kvadratnog odstupanja profila (R_q), koeficijenta asimetrije profila (R_{sk}), koeficijenta spljoštenosti profila (R_{ku}) i srednjeg koraka elemenata profila (R_{sm}). Eksperimenti su provedeni na čeličnom limu EN 31 debljine 10 mm u skladu s Taguchi L_{27} planom eksperimenata. U eksperimentima je kao plazmeni plin korišten komprimirani zrak. Za višeciljnu optimizaciju analiziranih funkcija korištena je analiza glavnih komponenti i metoda težinskih koeficijenata (eng. Weighted principal component analysis). Analizom varijance su određene optimalne vrijednosti ulaznih faktora i iskazan je njihov utjecaj na izračunati višoodzivni indeks performansa (eng. Multi-response performance index). Također, isti autori su u drugom radu [68] koristili isti radni komad, iste ulazne faktore i odzivne veličine, ali su višeciljnu optimizaciju proveli sivom relacijskom analizom i analizom varijance. Također, kreirani su i dijagrami utjecaja interakcija ulaznih faktora na razmatrane odzivne veličine hrapavosti površine reza i proizvodnosti. Iz prikaza se može zaključiti da s porastom tlaka plazmenog plina raste proizvodnost, a istovremeno i pada hrapavost površine reza, te da s porastom jakosti struje raste hrapavost površine reza. Utjecaji ostalih faktora i njihovih interakcija su manje izraženi.

Srinivasa Raju et al. [69] su proveli istraživanje na konstrukcijskom čeliku E350 debljine 6.5 mm korištenjem kisika kao plazmenog plina i zraka kao sekundarnog plina. Eksperimenti su realizirani u skladu s Taguchi L_9 planom variranjem tri ulazna faktora, jakosti struje, brzine rezanja i visine mlaznice od predmeta obrade. Kao odzivna veličina procesa mjeren je kut nagiba površine reza. Korištenjem analize srednjih vrijednosti i analize varijance autori su definirali parametre obrade pri kojima se postiže optimalna vrijednost odziva te su definirali utjecaje pojedinih faktora. Kao najutjecajniji faktor se pokazala brzina rezanja. Također, kreiran je i matematički model koji opisuje ovisnost ulaza o analiziranom izlazu. Za modeliranje je korištena regresijska analiza.

Chauhan et al. [70] su ispitali utjecaj tlaka plazmenog plina, jakosti struje i visine mlaznice od predmeta obrade na širinu reza, hrapavost površine reza (R_a) i proizvodnost. Obrada je izvršena na materijalu Inconel 625 debljine 10 mm prema Taguchi L_{27} planu eksperimenata. Za svaki odziv je izvršeno matematičko modeliranje primjenom regresijske analize i analiza

srednjih vrijednosti kojom su određeni optimalni nivoi ulaznih faktora. Na kraju je provedena višeciljna optimizacija primjenom sive relacijske analize.

Kechagias et al. [71] su istraživali kako ulazni faktori procesa: brzina rezanja, visina mlaznice od predmeta obrade te napon struje utječu na odstupanje od dimenzija izradka. Izradak je izrezan u obliku pravokutnika. Kao odzivne veličine procesa korištene su srednja vrijednost svih mjerenja poprečne dimenzije te razlika između maksimalne i minimalne izmjerene dimenzije izradka. Materijal koji je korišten u eksperimentima je čelik St37 debljine 16 mm. Kao plazmeni plin korišten je komprimirani zrak. Eksperimenti su realizirani prema Taguchi L₂₇ planu. Analizom srednjih vrijednosti definirani su nivoi ulaznih faktora kojima se postiže minimizacija odstupanja od dimenzija, a analizom varijance utjecaji pojedinih faktora. Autori su zaključili da brzina rezanja ima najveći utjecaj na dimenzijsku točnost izradka.

Barodiya et al. [72] su analizirali utjecaj visine mlaznice od predmeta obrade, brzine rezanja, napona struje i jakosti struje na proizvodnost i hrapavost površine reza (Ra) kod čelika E250. Eksperimenti su realizirani u skladu s Taguchi L₉ planom. Analizom varijance je definiran utjecaj svakog od ulaznih faktora na analizirane odzive. Na kraju su autori proveli višeciljnu optimizaciju uz pomoć sive relacijske analize.

Patel et al. [73] su variranjem dva ulazna faktora, brzine rezanja i tlaka plazmenog plina analizirali hrapavost površine reza (Ra) i proizvodnost kod rezanja čelika visoko otpornog na trošenje oznake Quard 400 debljine 12 mm. Kao plazmeni plin u procesu rezanja korišten je kisik. Analizom varijance utvrđeno je da i brzina rezanja i tlak zraka imaju određeni utjecaj na obje odzivne veličine. Analizom poželjnosti (eng. Desirability analysis) uz pomoć softvera Design Expert provedena je optimizacija obje funkcije cilja istovremeno te su definirani optimalni nivoi ulaznih faktora kojima se postiže maksimizacija proizvodnosti i minimizacija hrapavosti površine reza.

Bhuvnesh et al. [74] su istraživali utjecaj ulaznih faktora: tlaka plazmenog plina, jakosti struje, brzine rezanja i visine mlaznice od predmeta obrade na hrapavost površine reza (Rz) i proizvodnost kod rezanja konstrukcijskog čelika AISI 1017 debljine 6 mm. Eksperimenti su realizirani prema Taguchi planu L₉. Tijekom rezanja kao plazmeni plin korišten je komprimirani zrak. Rezultati mjerenja odzivnih veličina su analizirani preko odnosa signal-šum. Autori su zaključili da se s porastom brzine rezanja i proizvodnosti smanjuje hrapavost površine reza.

Adalarasan et al. [75] su primjenili sivu relacijsku analizu u kombinaciji s metodom odzivne površine za višekriterijsko optimiranje karakteristika kvalitete reza kod plazma rezanja nehrđajućeg čelika 304L debljine 5 mm. Eksperimenti su provedeni prema Taguchi L₁₈ planu variranjem četiri ulazna faktora: tlaka plazmenog plina, brzine rezanja, jakosti struje i visine mlaznice od predmeta obrade. Odzive procesa su predstavljali hrapavost površine reza (Ra) i širina reza. Višekriterijski problem optimiranja je transformiran u jednokriterijski preko izračuna sivog relacijskog stupnja (eng. Grey relational grade) za koji je napravljen i matematički model metodom regresije. Model je validiran usporedbom izmjerenih i predviđenih vrijednosti izlaza. Rezanje spomenutog čelika je izvršeno korištenjem komprimiranog zraka kao plazmenog plina.

Chen et al. [76] su analizirali kvalitetu kružnog reza preko kuta nagiba cilindrične površine reza i odstupanja od kružnosti. Za izradu eksperimenata korišten je Taguchi L₉ plan u kojem su varirane vrijednosti četiri ulazna faktora, vrsta mlaznice, brzina rezanja, napon struje i jakost struje. Također, pored tih ulaznih faktora korišteni su još i tlak plazmenog plina i vrijeme probijanja te je svaki od njih tijekom eksperimenata držan konstantnim na dva nivoa. U skladu s tim ukupan broj eksperimenata je iznosio 36. Nakon obavljenih mjerenja provedena je optimizacija svake od razmatranih karakteristika kvalitete analizom odnosa signal-šum te su određeni približno optimalni nivoi ulaznih faktora kojima se postiže najmanji kut nagiba cilindrične površine kružnog reza i najmanje odstupanje od kružnosti. Također, za analizu utjecaja pojedinih ulaznih faktora na odzive korišten je statistički t-test.

Maity et al. [77] su istraživali utjecaj brzine rezanja, jakosti struje, napona struje i visine mlaznice od predmeta obrade na više izlaznih karakteristika kvalitete reza: proizvodnost, hrapavost površine reza (Rz), širinu reza, visinu trsoke na izlazu mlaza iz predmeta obrade te odstupanje od okomitosti površine reza. Eksperimenti su provedeni prema planu metode odzivne površine na nehrđajućem čeliku AISI 316 debljine 120 mm. Kao plazmeni plin korišten je kisik. Za svaku razmatranu odzivnu veličinu su izrađeni matematički modeli primjenom regresijske analize i analize varijance. Višeciljna optimizacija svih izlaznih karakteristika kvalitete reza je izvršena preko sive relacijske analize. Kao najutjecajniji ulazni faktor na ukupni sivi relacijski stupanj se pokazala visina mlaznice od radnog komada.

Lazarević et al. [78] su analizirali utjecaj brzine rezanja na širinu reza, kut nagiba površine reza i hrapavost površine reza (Rz) kod rezanja nhrđajućeg čelika EN 10025 debljina 4, 6, 8, 12 i 15 mm pri različitim jakostima struje. Nakon provedenih eksperimenata izrađeni su grafički prikazi utjecaja ulaznog faktora na razmatrane odzive. Autori su zaključili da se kod svih

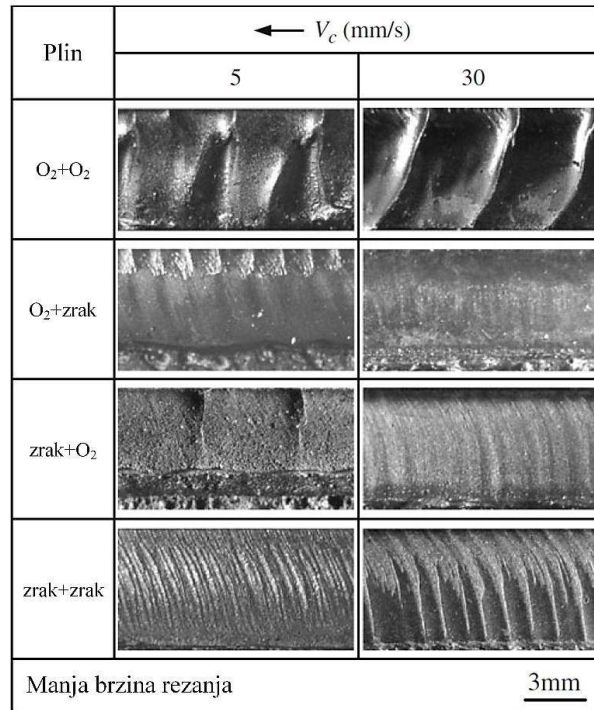
debljina lima s porastom brzine rezanja smanjuje širina reza, a povećava hrapavost i kut nagiba površine reza s time da je taj trend manje izražen kod debljina lima 12 i 15 mm i pri jakosti struje od 130 A.

Illi et al. [79] su proveli istraživanje na nehrđajućem čeliku AISI 304 debljine 4 i 6 mm prema punom faktorskom planu eksperimenata. Pored debljine lima kao ulazni faktori su još varirani i brzina rezanja i jakost struje. Analizirana karakteristika kvalitete je hrapavost površine reza (R_a). Regresijskom analizom je izrađen matematički model koji opisuje njenu ovisnost o ulaznim faktorima. Također, pored hrapavosti analizirana je i pojava troske na izlazu plazmenog mlaza iz predmeta obrade. Za obradu je korišten dualni plazmeni sustav pri čemu je i kao primarni i kao sekundarni plin korišten dušik.

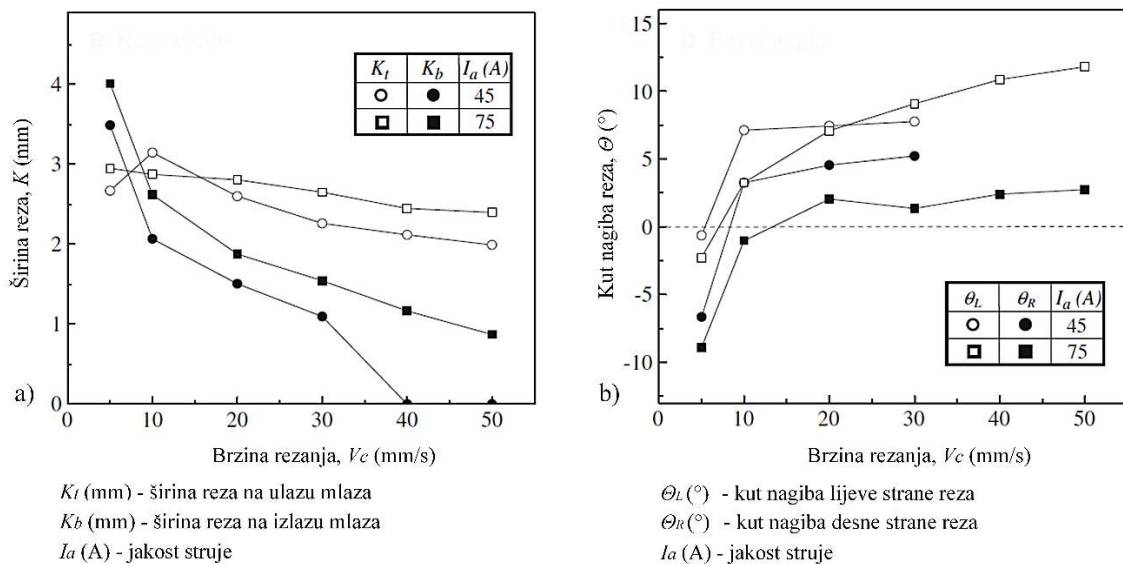
Ferreira et al. [80] su istraživali kvalitetu reza kod čelične ploče S355 debljine 15 mm. Analizirane izlazne karakteristike kvalitete su: širina reza, odstupanje od okomitosti površine reza i površina troske na izlazu plazmenog mlaza iz predmeta obrade. Eksperimenti su provedeni prema centralno kompozitnom planu variranjem četiri ulazna faktora: jakosti struje, voltaže struje, tlaka primarnog i tlaka sekundarnog plazmenog plina. Kao primarni plin je korišten kisik, a kao sekundarni zrak. Za svaki izlaz je napravljen matematički model metodom odzivne površine. Validacija modela je provedena usporedbom s eksperimentalno dobivenim vrijednostima. Također, analiziran je i odnos brzine rezanja i ukupnog troška po metru obrade. Ukupni trošak je izražen zbrojem troška električne energije i plinova koji se koriste u procesu rezanja.

Wang et al. [81] su proučavali kvalitetu reza kod procesa rezanja plazmenim mlazom s povećanim vrtloženjem plina. Kao materijal obrade korišten je konstrukcijski čelik debljine 6 mm. Autori su analizirali kako brzina rezanja, jakost struje i sastav plinova utječe na širinu reza na ulazu i izlazu mlaza, kut nagiba površine reza, visinu troske i sam izgled površine reza. Kombinacije plinova koje su korištene u radu su: kisik-kisik, kisik-zrak, zrak-kisik i zrak-zrak. Autori su zaključili da se kod svih kombinacija plinova povećanjem brzine rezanja i smanjenjem jakosti struje smanjuje širina reza, a povećava kut nagiba površine reza. Pri manjoj brzini rezanja se postiže manji kut nagiba površine i manje je uočljiva troska na izlazu plazmenog mlaza iz predmeta obrade. Smanjenjem udijela kisika kao plina smanjuje se širina reza, troska je veća, a kut nagiba površine reza je varijabilan, slike 4.2 i 4.3. Ako se kao plin u procesu koristi samo kisik ili samo zrak pri malim brzinama rezanja se javlja najmanji kut nagiba površine reza. Najgrublja površina reza nastaje korištenjem kisika i kao primarnog i kao sekundarnog plina, slika 4.1. Također, autori su potvrdili i ono što je navedeno u prethodnom

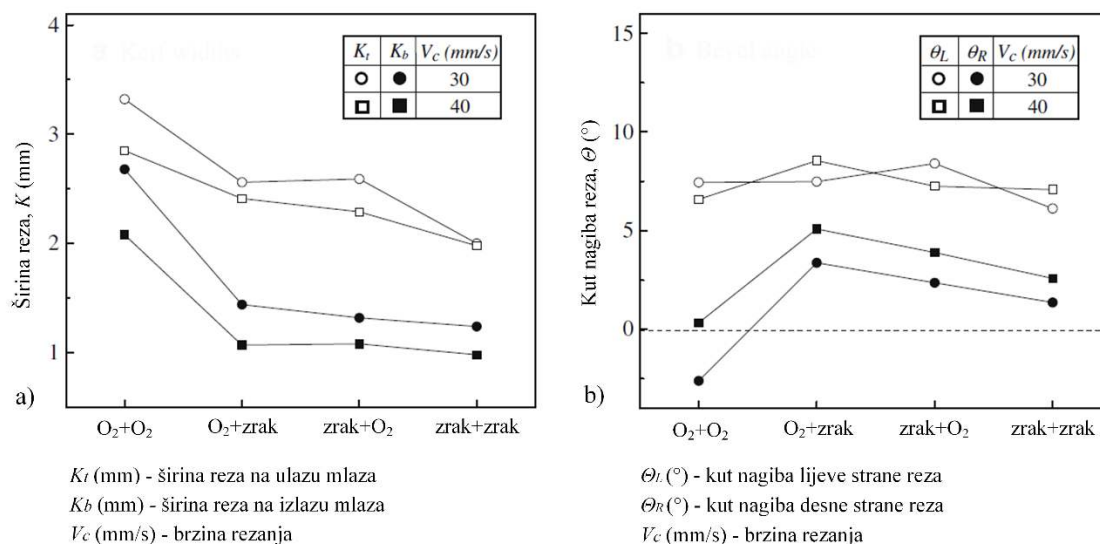
poglavlju, a to je da je u dualnim plazma sustavima s povećanim vrtloženjem plina uočljiva razlika u nagibu lijeve i desne strane površine reza koja inače nije tako primjetna kod konvencionalnog postupka samo s osnovnim plazmenim plinom zbog većeg zaobljenja gornjeg brida reza, slika 3.7.



Slika 4.1. Izgled površine reza pri jakosti struje 60 A i visini mlaznice 2 mm, [81]



Slika 4.2. Ovisnost širine reza i kuta nagiba površine reza o brzini rezanja i jakosti struje, a) širina reza na ulazu i izlazu mlaza, b) lijevi i desni kut nagiba površine reza, [81]

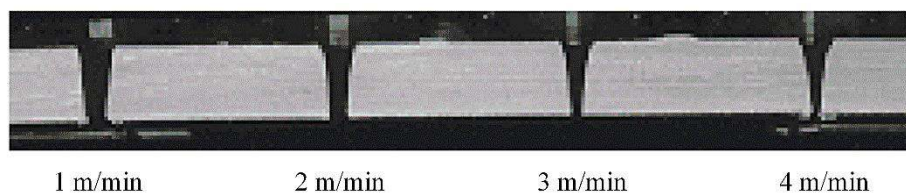


Slika 4.3. Ovisnost širine reza i kuta nagiba površine reza o brzini rezanja i kombinaciji plinova, a) širina reza na ulazu i izlazu mlaza, b) lijevi i desni kut nagiba površine reza, [81]

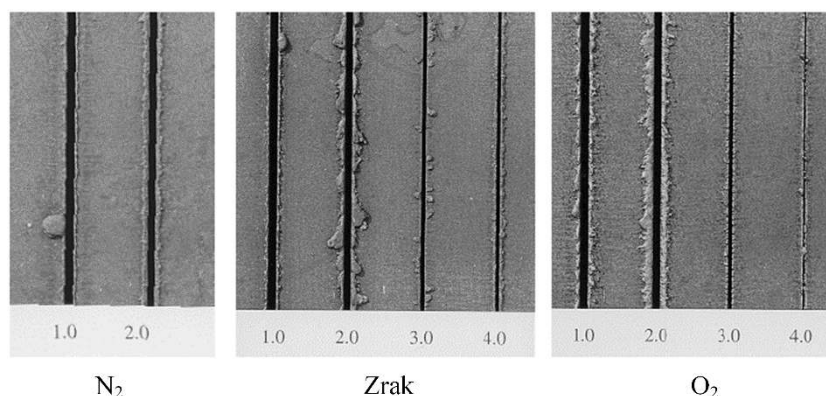
Bini et al. [82] su također koristili visoko precizni dualni plazma sustav za ispitivanje kvalitete reza. Kao primarni plin korišten je kisik, a kao sekundarni vrtložni plin mješavina kisika i dušika. Predmet obrade je lim konstrukcijskog čelika debljine 15 mm. U radu je ispitan utjecaj ulaznih faktora: brzine rezanja, napona struje, protoka primarnog plina, protoka sekundarnog plina tj. plinske mješavine i udjela plinova u mješavini na odstupanje od okomitosti površine reza. Mjerenja su izvršena na pravokutnom izradku sa sve četiri strane na način da se ticalom određivao pložaj sedam različitih točaka po visini površine reza, a zatim je odstupanje od okomitosti izraženo preko maksimalne udaljenosti horizontalnih koordinata položaja svih sedam točaka. Realizacija eksperimenata je izvršena prema faktorskom planu. Za analizu rezultata mjerenja korištena je analiza varijance i analiza srednjih vrijednosti. Matematičko modeliranje je izvršeno primjenom regresijske analize. Autori su zaključili da i brzina rezanja i napon struje imaju značajan utjecaj na odstupanje od okomitosti površine reza.

Ramakrishnan et al. [83] su analizirali utjecaj plazmenog plina na oblik reza kod konstrukcijskog čelika debljine 6 mm. Eksperimentalna istraživanja su izvršena pri brzinama rezanja od 1, 2, 3 i 4 m/min i pri jakosti struje 100 A. Za rezanje su korištena tri različita plazmena plina: dušik, komprimirani zrak i kisik. Autori su zaključili da iako su vidljive male nesimetričnosti između lijeve i desne strane površine reza, ipak je njihova kvaliteta s obzirom na odstupanje od okomitosti površine reza približno ista (slika 4.4) te se ne može sa sigurnošću ustvrditi da je kvaliteta jedne strane reza bolja od druge. Također, zaključeno je i da se s porastom brzine rezanja smanjuje širina reza i na ulazu i izlazu mlaza bez obzira na vrstu

plazmenog plina. Pored širine reza promatrana je i pojava troske. Uočeno je da se troska na izlazu mlaza iz predmeta obrade javlja kako pri nižim tako i pri višim vrijednostima brzine rezanja, slika 4.5.



Slika 4.4. Oblik reza kod različitih brzina rezanja i primjene zraka kao plazmenog plina, [83]



Slika 4.5. Troska kod različitih plinova i brzina rezanja, [83]

Chamarthi et al. [84] su proveli eksperimente na čeličnom limu Hardox 400 debljine 12 mm te su ispitivali utjecaj brzine rezanja, napona struje i protoka plazmenog plina na odstupanje od okomitosti površine reza. Mjerenja su izvršena na pravokutnom izradku sa sve četiri strane na način da su se ticalom određivale koordinate četiri različite točke po visini površine reza, a odstupanje od okomitosti je dobiveno kao maksimalna horizontalna udaljenost između točaka. Za analizu dobivenih rezultata je korištena analiza varijance pri čemu je utvrđeno da najveći utjecaj na odstupanje od okomitosti površine reza ima protok plazmenog plina, kisika. Optimizacija, s ciljem pronalaska nivoa ulaznih faktora kojima se postiže minimalno odstupanje od okomitosti, je izvršena analizom poželjnosti (eng. Desirability analysis), primjenom softvera Design Expert.

Gariboldi et al. [85] su ispitivali kvalitetu reza kod lima izrađenog iz čistog titana debljine 5 mm. Rezanje je izvršeno s visoko preciznim postupkom rezanja plazmenim mlazom korištenjem dušika kao sekundarnog plina s povećanim vrtloženjem. Ulazni faktori varirani u eksperimentima su: vrsta primarnog plina, dušik ili kisik te brzina rezanja. Analizirane izlazne karakteristike kvalitete su: odstupanje od okomitosti lijeve i desne strane površine reza, kut

nagiba lijeve i desne strane površine reza, širina reza na ulazu i izlazu plazmenog mlaza te hrapavost površine reza (R_z). Autori su se u radu osvrnuli i na zonu utjecaja topline, njezinu širinu i mikrostrukturne promjene. Provedena su također i mjerenja temperature uz putanju mlaznice te se pristupilo njenom numeričkom modeliranju.

Radovanović et al. [86] su izvršili matematičko modeliranje hrapavosti površine reza (R_z) u ovisnosti o debljini lima, jakosti struje i brzini rezanja primjenom umjetnih neuronskih mreža. Rezanje je izvršeno na čeliku EN 10025 debljine 4, 6, 8, 12 i 15 mm. Izrađeni matematički model je validiran korištenjem srednje kvadratne greške i koeficijenta korelacije. Tim pokazateljima su uspoređene vrijednosti odziva predviđene modelom i one dobivene na temelju eksperimenata. Također, na temelju modela izrađeni su i grafički prikazi koji prikazuju utjecaj interakcija ulaznih faktora na hrapavost površine reza. Ti prikazi su ujedno poslužili i za determinaciju optimalnog područja obrade.

Kechagias et al. [87] su proveli istraživanje na konstrukcijskom čeliku St37 debljine 6.5 i 10 mm. Analizirali su utjecaj brzine rezanja, jakosti struje, napona struje, tlaka plazmenog plina (zrak), visine mlaznice od predmeta obrade u trenutku probijanja lima i za vrijeme rezanja o kutu nagiba cilindrične površine kružnog reza. Eksperimenti su realizirani prema Taguchi L_{18} planu izradom kružnih rezova promjera 20 mm. Za promatrani odziv izvršeno je matematičko modeliranje primjenom umjetnih neuronskih mreža. Visoki koeficijenti korelacije (iznad 0.8) i vrlo niska srednja kvadratna greška potvrdili su točnost izrađenog matematičkog modela. Na kraju su kreirani dijagrami utjecaja interakcija analiziranih ulaza na kut nagiba cilindrične površine kružnog reza. Iz prikaza se može zaključiti da se kut povećava s povećanjem visine mlaznice od predmeta obrade za vrijeme rezanja, brzine rezanja i debljine lima, a da se smanjuje s povećanjem jakosti struje.

5. ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Na temelju svega do sada navedenog te na temelju dosadašnjih znanstvenih istraživanja vidljivo je da je tehnologija rezanja metala plazmenim mlazom pored svoje široke zastupljenosti u industriji također i predmet bavljenja velikog broja znanstvenika. Tu je prije svega riječ o daljnjem unaprijeđenju tehnologije rezanja, a osobito kvalitete reza. Objavljeni znanstveni radovi upućuju na to da se radi o itekako aktualnoj problematici u znanstveno-istraživačkoj sferi.

Pregledom do sada dostupnih objavljenih znanstvenih radova može se zaključiti da su najutjecaniji faktori procesa rezanja plazmenim mlazom brzina rezanja, jakost struje, visina mlaznice od predmeta obrade za vrijeme procesa te tlak plazmenog i/ili sekundarnog plina. Karakteristike kvalitete reza koje su najčešće analizirane od strane autora su širina reza na ulazu i izlazu plazmenog mlaza, kut nagiba površine reza, hrapavost površine reza izražena preko srednjeg aritmetičkog odstupanja profila (Ra) i srednje maksimalne visine neravnina (Rz). Također, nekoliko radova se bavi i analizom visine troske na izlazu mlaza iz predmeta obrade te kvalitetom kružnih rezova izraženom preko kuta nagiba cilindrične površine te odstupanja od dimenzija. U svim radovima koji su do sada objavljeni kao materijal obrade korišten je konstrukcijski ili nehrđajući čelik različitih debljina. U svega nekoliko dostupnih radova eksperimenti su izvršeni na čeliku visokootpornom na trošenje oznake Hardox ili Quard te na titanu. Vidljivo je da rezljivost kao i kvaliteta reza kod ostalih metalnih materijala do sada uopće nije istražena.

Također, analizom dosadašnjih znanstvenih istraživanja utvrđeno je i da su autori vršili matematičko modeliranje i optimiranje analiziranih odziva tj. karakteristika kvalitete reza s ciljem opisivanja i unaprijeđenja procesa rezanja i minimiziranja naknadne obrade. Za matematičko modeliranje u većini radova je korištena regresijska analiza, a za potrebe determinacije nivoa ulaznih faktora kojima se postiže optimalna kvaliteta reza te analize njihovih utjecaja primjenjena je Taguchi metoda u kombinaciji s analizom varijance i analizom srednjih vrijednosti. Za optimiranje više funkcija cilja istovremeno u većini radova je primjenjena siva relacijska analiza te analiza glavnih komponenti s metodom težinskih koeficijenata. Bitno je spomenuti da su ovim metodama dobivena tek približno optimalna rješenja budući da spomenute metode ograničavaju optimizaciju na određene vrijednosti ulaznih faktora. Umjetne neuronske mreže su korištene za matematičko modeliranje u samo dva rada iz čega je evidentna odsutnost primjene umjetne inteligencije u ovoj problematici.

U skladu s onim što je do sada zaključeno nameću se i smjernice za buduća istraživanja. Budući da je do sada istražena samo rezljivost i kvaliteta reza kod čeličnih materijala, cilj daljnjih istraživanja će biti usmjeriti se na ostale metalne materijale. Tu se prije svega misli na aluminij. Aluminij je za razliku od čelika mekši materijal, karakterizira ga mala gustoća u usporedbi s ostalim metalima, veća toplinska vodljivost i visoka otpornost na koroziju (osobito legura 5xxx) zbog čega se često koristi za izradu različitih konstrukcija, a naročito u brodogradnji. Zbog njegovih svojstava prilikom obrade plazmenim mlazom, unatoč postojanja preporuka proizvođača, prisutna je određena doza nesigurnosti kod definiranja vrijednosti parametara tehnološkog procesa. Ovo iziskuje provedbu opsežnog istraživanja kako bi se definirali uvjeti postizanja optimalne kvalitete reza. Također, zahtijeva se i definiranje matematičkih modela koji opisuju ovisnost karakteristika kvalitete reza o faktorima procesa i njihova optimizacija. Iako se matematički modeli dobiveni regresijskom analizom mogu naći u velikom broj radova, za modeliranje kompleksnih proizvodnih procesa s izraženijim nelinearnostima i interakcijama između faktora pokazale su se prikladnije metode umjetne inteligencije. Također, one su i otpornije na pojavu šumova i nekontroliranih vanjskih utjecaja na proces. Pored ovih metoda za modeliranje, budući napori će biti usmjereni i na primjenu suvremenih metaheurističkih metoda optimiranja karakteristika kvalitete reza. Poznato je da se njima, za razliku od Taguchi metode i sive relacijske analize, mogu dobiti točnija optimalna rješenja.

Pored ovih prethodno spomenutih, interesantni prijedlozi za daljnja istraživanja bi mogli biti i: istraživanje rezljivosti plazmenim mlazom čelika visoko otpornih na trošenje, te usporedba kvalitete reza različitih metalnih materijala kod različitih varijanti postupka rezanja plazmenim mlazom pri različitim uvjetima obrade, osobito pri korištenju različitih plazmenih plinova i njihovih mješavina.

LITERATURA

- [1] Cebalo, R.: "Obradni strojevi i sustavi: podsjetnik za pripremu ispita", Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1996.
- [2] Gjeldum, N.: "Oblikovanje odzivnih veličina obrade rotacijskih elemenata elektroerozijom", doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2011.
- [3] Jameson, E.C.: "Electrical discharge machining", ISBN 0-87263-521-X, Society of Manufacturing Engineers, SAD, 2001.
- [4] Klocke, F.: "Manufacturing Technology I, Laboratory for Machine Tools and Production Engineering, WZL/RWTH Aachen, 2001.
- [5] Rajurkar, K.P.; Sundaram, M.M.; Malshe, A.P.: "Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining", The seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, Procedia CIRP, Vol. 6, pp. 13-26, 2013.
- [6] S Interneta, <http://www.xactedm.com>, 13.2.2017.
- [7] Saindane, T.Y.; Patil, H.G.: "Electrical Discharge Machining – A State of Art", International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Iss. 2, February 2016.
- [8] Steigerwald, K.H.; Sayegh, G.; Powers, D.: "An international history of Electron Beam Welding", pro beam AG & Co., Germany, 2007.
- [9] Sobhan, A.; Govindan, P.: "Electron beam technique for controlled metal removal – an analysis", Journal of Harmonized Research in Engineering, 2 (4), pp. 400-407, 2014.
- [10] Milikić, D.: "Nekonvencionalni postupci obrade", Priručnik za studije i praksu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002.
- [11] Moarrefzadeh, A.: "Finite-Element Simulation of Electron Beam Machining (EBM) Process", International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 2, No. 6, September 2011.
- [12] Li, H.; Liu, H.; Yu, H.; Yiping, H.: "Applications of the Electron Beam Machining Technology in Research of Materials Science", Applied Mechanics and Materials, Vol. 666, pp. 17-21, 2014.
- [13] S Interneta, <http://www.aijiemo-eb.com>, 2.3.2017.
- [14] S Interneta, <http://www.mechanicatech.com/NTMachining/ebm.html>, 6.3.2107.
- [15] S Interneta, <https://basicmechanicalengineering.com/electron-beam-machining-ebm-principles/>, 6.3.2017.
- [16] Tseng, A.A.: "Recent developments in micromilling using focused ion beam technology", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 15-34, 2004.
- [17] Qin, Y.: "Micromanufacturing Engineering and Technology", Second Edition, Elsevier Inc., UK, Oxford, 2015.
- [18] Volkert, C.A.; Minor, A.M.: "Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining", Mrs Bulletin, Vol. 32, May 2007.
- [19] Repetto, L.; Firpo, G.; Valbusa, U.: "Applications of focused ion beam in material science", Materials and technology, Vol. 42, No. 4, pp. 143-149, 2008.
- [20] Reyntjens, S.; Puers, R.: "A review of focused ion beam applications in microsystem technology", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 11, pp. 287-300, 2011.
- [21] S Interneta, <http://science.duel.life/index.php/compare-instruments/fib-focused-ion-beam>, 9.3.2017.

-
- [22] Hilton, P.A.: "The early days of laser cutting", Proceedings of 11th Nordic Laser Materials Processing Conference, Nolamp 2007, Lappeenranta, Finland, pp. 1-10, 2007.
- [23] Kumar Dubey, A.; Yadava, V.: "Laser beam machining – A review", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, Iss. 6, pp. 609-628, 2008.
- [24] Radovanovic, M.; Madić, M.: "Experimental investigations of CO₂ laser cut quality: A review", Nonconventional Technologies Review, No. 4, 2011.
- [25] Sun, S.; Brandt, M.: "Laser Beam Machining", Nontraditional Machining Processes, Springer-Verlag, London 2013.
- [26] Meijer, J.: "Laser Beam Machining (LBM), state of the art and new opportunities", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 2-17, 2004.
- [27] Radovanović, M.: "Automatizovano projektovanje tehnologije obrade laserom", doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš, 1995.
- [28] Ion, J.C.: "Laser Processing of Engineering Materials", Elsevier, Butterworth Heinemann, 2005.
- [29] Radovanović, M.; Girniceanu, G.; Dobrota, D.: "Lasersko sečenje metalnih limova", 28. naučno stručni skup HIPNEF 2002, Vrnjačka Banja, Zbornik radova, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu i SMEITS, Niš, pp. 467-472, 2002.
- [30] Schuocker, D.: "Handbook of the EuroLaser Academy, Springer, 1998.
- [31] Steen, W.M.; Mazumder, J.: "Laser Material Processing", Springer, 2010.
- [32] Breck Hitz, C.; Ewing, J.J.; Hecht, J.: "Introduction to laser technology", IEE Press, Wiley, New Jersey, 2012.
- [33] Antolić, A.: "Zavarivanje laserom", završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [34] S Interneta, <https://lasersdbw.larc.nasa.gov/tutorials/laser/>, 11.4.2017.
- [35] Bistričić, L.: "Fizika lasera", Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2014.
- [36] Vlahov, M.: "Optimizacija parametara laserskog rezanja", diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [37] S Interneta, <http://www.laser-community.com/en/limitations-what-limitations/>, 12.4.2017.
- [38] S Interneta, <http://www.orc.soton.ac.uk/61.html>, 13.4.2017.
- [39] Radonjić, S.; Kovač, P.; Mitrović, A.: "Defining new processing parameters in laser cutting", 16th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", Dubai, UAE, September 2012.
- [40] Meijer, J.: "Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 2-17, 2004.
- [41] Panić, V.: "3D Robotizirano rezanje plazma postupkom", SERVUS d.o.o., Čakovec, S Interneta, <http://servus.hr/pdf/strucniclanci/Robotizirano%20Plazma%20rezanje.pdf>, 18.4.2017.
- [42] Szataniak, P.; Novy, F.; Ulewicz, R.: "HSLA steels – comparison of cutting techniques", 23rd International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2014, Brno, Czech Republic, May 2014.
- [43] Peržel, V.; Hloch, S.; Tozan, H.; Yagimil, M.; Hreha, P.: "Comparative analysis of abrasive waterjet (AWJ) technology with selected unconventional manufacturing processes", International Journal of the Physical Sciences, Vol. 6 (24), pp. 5587-5593, 2011.
-

-
- [44] Harničarova, M.; Valiček, J.; Čep, R.; Tozan, H.; Mullerova, J.; Grznarik, R.: "Comaprison of non-traditional technologies for material cutting from the point of view of surface roughness", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 69, pp. 81-91, 2013.
- [45] Harničarova, M.; Valiček, J.; Zajac, J.; Hloch, S.; Čep, R.; Džubakova, I.; Tofil, S.; Hčavaček, P.; Klich, J.; Čepova, L.: "Techno-economical comparison of cutting material by laser, plasma and oxygen", Technical Gazette, Vol. 19, No. 4., pp. 813-817, 2012.
- [46] Milošević, S.: "Plazma, svjetlost i spektroskopija", Institut za fiziku, Zagreb, Podloge za radionicu, 2008., s Interneta, <http://www.azoo.hr/images/stories/dokumenti/Plazma-svjetlost-spektroskopija.pdf>, 1.5.2017.
- [47] S Interneta, <http://www.mechanicalengineeringblog.com/3702-plasma-arc-welding-paw-process-transferred-plasma-arc-welding/>, 13.5.2017.
- [48] S Interneta, http://www.boc-gas.co.nz/internet.lg.lg.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology435_68107.pdf?v=1.0, 14.5.2017.
- [49] S Interneta, <http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/starting-from-scratch>, 14.5.2017.
- [50] Hatala, M.: "Variations of the plasma processes and effect of various plasma and shield gases", 1th International workshop "Advanced methods and trends in production engineering", Faculty of Manufacturing Technologies, Technical University Košice, Slovakia
- [51] Samardžić, I.; Stoić, A.; Klarić, Š.; Pavić, J.: "Possibilities of cost effective plasma cutting application", 4th DAAM Interantional Conference on Advanced Technologies for Developing Countries, Slavonski Brod, Croatia, September, 2005.
- [52] Simler, H.; Krink, V.; Laurisch, F.: "Modern technology of plasma cutting", Croatian journal of welding and allied techniques", Vol. 48, No. 1/2., pp. 5-12, 2005.
- [53] S Interneta, <https://www.interstahl.com/produkte-u-leistungen/mechanische-bearbeitung/stahl-plasmabrennen.html>, 14.5.2017.
- [54] S Interneta, <http://www.kjellberg.de/>, 15.5.2017.
- [55] Panić, V.: "Plazma rezanje nehrđajućih čelika", radni materijali, SERVUS d.o.o., Čakovec
- [56] S Interneta, <http://www.thermal-dynamics.com>, 16.5.2017.
- [57] S Interneta, <https://www.hypertherm.com>, 16.5.2017.
- [58] Krink, V.; Rumenapp, T.; Schnick, M.; Donicke, N.: "Laer or Plasma Cutting – Is there a choice?", Lasers in Manufacturing Conference, German Scientific Laser Society, Munich, Germany, 2015.
- [59] Kechagias, J.; Billis, M., Maropoulos, S.: " A parameter design of CNC plasma arc cutting of carbon steel plates using robust design", International Journal of Experimental Design and Process Optimization, Vol. 1, No. 4, 2010.
- [60] Ravi Kumar, H.; Thileepan, S.: "Analysis in plasma arc cutting of 21Cr ferritic stainless steel", International Journal of ChemTech Research, Vol. 8, No. 11, 2015.
- [61] Pawar, S. S.; Inamdar, K. H.: "Experimental Analysis of Plasma Arc Cutting Process for SS 316L Plates", Journal of Mechanical and Civil Engineering, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, pp. 75-80, 2017.
- [62] Venugopal, B.; Ramachandra, R.; Sreenivasulu, B.: "Experimental Investigation and Optimization of Process Parameters in Plasma Arc Cutting Process", International Journal of Engineering Science and Computing, Vol. 6, No. 8, pp. 2146-2151, 2016.
-

-
- [63] Salonitis, K.; Vatosianos, S.: "Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process", *Procedia CIRP* 3 (2012), pp. 287-292
- [64] Siva Teja, S.; Karthik, G.; Sampath, S.; Shaj, M.: " Experimental Investigations to Study the Impact of Machining Parameters on Mild Steel Using Plasma Arc Cutting", *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 5, Issue 8, pp. 83-88, 2015.
- [65] Sandeep, R.; Sudhakara, D.; Sreenivasulu, B.: "Multi objective optimization of process parameters in plasma arc cutting of SS 420 using Grey Taguchi analysis", *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 2, Issue 11, pp. 46-52, 2015.
- [66] Tsiolikas, A.; Kechagias, J.; Salonitis, K.; Mastorakis, N.: "Optimization of cut surface quality during CNC Plasma Arc Cutting process", *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*, Vol. 10, pp. 305-308, 2016.
- [67] Kumar Das, M.; Kumar, K.; Barman, T. K.; Sahoo, P.: "Optimization of MRR and Surface Roughness in PAC of EN 31 Steel Using Weighted Principal Component Analysis", *Procedia Technology* 4 (2014), pp. 211-218
- [68] Kumar Das, M.; Kumar, K.; Barman, T. K.; Sahoo, P.: "Optimization of Process Parameters in Plasma Arc Cutting of EN 31 Steel Based on MRR and Multiple Roughness Characteristics Using Grey Relational Analysis", *Procedia Materials Science* 5 (2014), pp. 1550-1559
- [69] Srinivasa Raju, V. S. S.; Kodanda Ram, K.; Satyanarayana, S. S.; Nishood Goud, M. S.: "Optimization of Process Parameters of Plasma Arc Cutting Using Taguchi's Robust Design Methodology", *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, pp. 124-128, 2016.
- [70] Chauhan, N.; Chauhan, R.; Patel, J. D.: "Parametric optimization of plasma arc cutting on Inconel 625 material by regression analysis", *International Journal of advance research and inovative ideas in education*, Vol. 2, Issue 5, 2016.
- [71] Kechagias, J.; Petousis, M.; Vidakis, N.; Mastorakis, N.: "Plasma Arc Cutting Dimensional Accuracy Optimization employing the Parameter Design approach", *ITM Web of Conferences*, Vol. 9, 2017.
- [72] Barodiya, D.; Desai, U.; Rathod, S.: "Plasma Arc Cutting Response to IS 2062 (E250) Steel Material", *International Journal of Advance Research in Engineering, Science and Technology*, Vol. 4, Issue 2, 2017.
- [73] Patel, P.; Soni, S.; Kotkunde, N.; Khanna, N.: "Study the effect of process parameters in plasma arc cutting on Quard-400 material using analysis of variance", *Materials Today Proceedings XX* (2017),
- [74] Bhuvnesh, R.; Norizaman, M. H.; Abdul Manan, M. S.: "Surface Roughness and MRR Effect on Manual Plasma Arc Cutting Machining", *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 459-462, 2012.
- [75] Adalarasan, R.; Santhanakumar, M.; Rajmohan, M.: "Application of Grey Taguchi based response surface methodology (GT-RSM) for optimizing the plasma arc cutting parameters of 304L stainless steel", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, pp. 1161-1170, 2015.
- [76] Chen, J. C.; Li, Y.; Cox, R. A.: "Taguchi based Six sigma approach to optimize plasma cutting process: an industrial case study", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, pp. 760-769, 2009.
- [77] Maity, K. P.; Bagal, D. K.: "Effect of process parameters on cut quality of stainless steel of plasma arc cutting using hybrid approach", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, 2014.
- [78] Lazarević, A.: "Experimental research of the plasma arc cutting process", *Journal of Applied Engineering Science*, Vol. 12, No. 4, pp. 291-296, 2014.
-

-
- [79] Illi, S. M.; Coteata, M.; Munteanu, A.: "Experimental results concerning the variation of surface roughness parameter (Ra) at plasma arc cutting of a stainless steel workpiece", *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol. 2, No. 1, pp. 31-36, 2010.
- [80] Ferreira, P.; Melo, I.; Goncalves Coelho, A.; Mourao, A.: "Plasma cutting optimization by using the response surface methodology", *The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*, pp. 213-218, 2009.
- [81] Wang, J.; Zhu Z.; He, C.; Yang, F.: "Effect of dual swirling plasma arc cutting parameters on kerf characteristics", *International Journal of Material Forming*, Vol. 4, pp. 39-43, 2011.
- [82] Bini, R.; Colosimo, B. M.; Kutlu, A. E.; Monno, M.: "Experimental study of the features of the kerf generated by a 200 A high tolerance plasma arc cutting system", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, pp. 345-355, 2008.
- [83] Ramakrishnan, S.; Shrinet, V.; Polivka, F. B.; Kearney, T. N.; Koltun, P.: "Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 33, pp. 2288-2299, 2000.
- [84] Chamarthi, S.; Sinivasa Reddy, N.; Kumar Elipey, M.; Ramana Reddy, D. V.: "Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox 400 material", *Procedia Engineering* Vol 64, pp. 854-861, 2013.
- [85] Gariboldi, E.; Previtali, B.: "High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, pp. 77-89, 2005.
- [86] Radovanović, M.; Madić, M.: "Modeling the plasma arc cutting process using ANN", *Nonconventional Technologies Review*, Vol. 15, No. 4, pp. 43-48, 2011.
- [87] Kechagias, J.; Pappas, M.; Karagiannis, S.; Petropoulos, G.; Iakovakis, V.; Maropoulos, S.: "An ANN approach on the optimization of the cutting parameters during CNC plasma arc cutting", *Proceedings of the ASME 2010, 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey, July 12-14, 2010*

SAŽETAK

Nekonvencionalni termoelektrični postupci obrade metala su uveliko prisutni u suvremenoj industrijskoj proizvodnji. Oni omogućuju efikasnu izradu proizvoda konstrukcijskih i geometrijskih značajki koje ne dopuštaju primjenu tradicionalnih tehnoloških rješenja, skraćuju vrijeme trajanja proizvodnog procesa i povećavaju razinu kvalitete proizvoda. Postupak rezanja metala plazmenim mlazom se odlikuje optimalnom kombinacijom kvalitete reza, proizvodnosti i troškova te mogućnošću rezanja materijala širokog raspona debljina. Također, njime se postižu i velike uštede u samoj tehnologiji rezanja zbog čega neizostavno nalazi primjenu u metaloprerađivačkoj industriji i brodogradnji. Pored efikasnosti i nižih troškova obrade cilj rezanja plazmenim mlazom je postići i optimalnu kvalitetu reza koja zahtijeva minimalnu potrebnu naknadnu obradu. U ovom radu je dan opsežan pregled dostupnih do sada objavljenih znanstvenih postignuća i radova koji se bave opisivanjem, modeliranjem i optimiranjem karakteristika kvalitete reza postupka rezanja metala plazmenim mlazom te je determiniran prostor za daljnji znanstveno istraživački rad.

Ključne riječi: termoelektrični postupci obrade, rezanje plazmenim mlazom, kvaliteta reza