

Izrada dijelova iz pločastih materijala

Fošnjar, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:981844>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Fošnjarić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Student:

Dr. Sc. Damir Ciglar, dipl. Ing.

Antonio Fošnjari

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru za podršku i pomoć pri izradi ovog rada.

Također se zahvaljujem cijeloj obitelji i svim prijateljima na podršci i pomoći tijekom studiranja, iskreno mislim da bez vas ne bih ni upisao ovaj fakultet, a kamoli dospio ovoliko daleko!

Antonio Fošnjarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Fošnar** JMBAG: **0035232483**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada dijelova iz pločastih materijala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Production of parts from plate materials**

Opis zadatka:

Pločasti materijali, odnosno ploče velikih dimenzija, karakteristika i debljina, često se koriste kao početni materijal (sirovac) za izradu dijelova. Kružna pila je alatni stroj koji se u pripremi proizvodnje vrlo često koristi za rezanje tih velikih ploča na manje dimenzije. Takvi sirovci su sada pogodni za daljnju obradu i izradu dijelova na ostalim alatnim strojevima. Međutim, ponekad je moguće direktno iz ploče velikih dimenzija izraditi potrebne dijelove prema radioničkom nacrtu.

Prema gore navedenom, u radu je potrebno dati literaturni pregled različitih postupaka obrade koji se koriste za izradu dijelova iz pločastih materijala. Potrebno ih je opisati, dati njihove karakteristike, područja primjene i točnosti dijelova koje se mogu postići pojedinim postupkom obrade.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Damir Ciglar

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. POSTUPCI REZANJA VELIKIH PLOČASTIH MATERIJALA.....	2
2.1. CNC glodanje	3
2.1.1. Konstrukcija CNC glodalice za pločaste materijale (routera)	4
2.1.1.1. Stol CNC glodalice za pločaste materijale	5
2.1.1.2. Alati CNC glodala za pločaste materijale.....	6
2.2. Rezanje vodenim mlazom.....	7
2.2.1. Konstrukcija stroja za rezanje vodenim mlazom	9
2.2.2. Tipovi rezanja vodenim mlazom	11
2.2.2.1. Medij: voda	11
2.2.2.2. Medij: voda-abraziv-zrak.....	11
2.2.2.3. Medij: voda-abraziv.....	12
2.3. Plazma rezanje.....	14
2.3.1. Konstrukcija CNC plazma rezača	15
2.3.1.1. Dostavna konstrukcija CNC plazma rezača.....	15
2.3.1.2. Stol CNC plazma rezača.....	16
2.3.1.3. Glava plazma rezača	17
2.3.1.4. Sustav ventilacije.....	18
2.4. Lasersko rezanje	19

2.4.1.	Konstrukcija stroja za rezanje laserom	22
2.4.1.1.	Laserska glava za fokusiranje.....	23
2.4.1.2.	Izvor laserskih zraka	24
2.4.1.2.1.	CO ₂ izvor laserskih zraka	24
2.4.1.2.2.	Vlaknasti izvor laserskih zraka.....	25
2.5.	Rezanje plamenom	27
2.5.1.	Konstrukcija CNC plamenog rezača.....	28
2.5.1.1.	Rezna glava plamenog rezača	29
2.5.1.2.	Boca acetilena	29
2.6.	Rezanje CNC pilom za panele	31
2.6.1.	Konstrukcija CNC pile za panele	31
2.6.1.1.	Stol CNC pile za panele.....	32
2.6.1.2.	List pile za panele	33
3.	USPOREDBA NAJBITNIJIH FAKTORA OPISANIH POSTUPAKA REZANJA	35
4.	ZAKLJUČAK	36
	LITERATURA	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Proizvodi nastali postupkom rezanja pločastih materijala laserom [1].....	2
Slika 2. Postupak rezanja pločastog materijala CNC routerom [4].....	4
Slika 3. Stol CNC routera sa zamjenjivom MDF pločom [6]	6
Slika 4. Neke od vrsta alata za CNC routere [7]	7
Slika 5. Rangiranje kvalitete površine rezanih rubova vodenim mlazom [10]	8
Slika 6. Oblici poprečnog presjeka reza vodenim mlazom [9]	9
Slika 7. Stol stroja za rezanje vodenim mlazom [13].....	10
Slika 8. 5-osni stroj za rezanje vodenim mlazom [14].....	10
Slika 9. Struktura mlaza s udaljavanjem od mlaznice [9]	12
Slika 10. Presjeci metoda rezanja vodenim mlazom [18]	13
Slika 11. Robotska ruka s plazma rezačem [24].....	16
Slika 12. 5-osni stroj za plazma rezanje velikih pločastih materijala [25].....	16
Slika 13. Izvedbe stola za rezanje plazmom [26].....	17
Slika 14. Presjek izvedbi glava plazma rezača [20]	18
Slika 15. Postupak rezanja pločastog materijala CNC laserom [30].....	20
Slika 16. CNC stroj za lasersko rezanje pločastih materijala [32]	21
Slika 17. Poprečni presjek laserske glave za fokusiranje sa zrcalima i lećom [28]	24
Slika 18. CO2 izvor laserskih zraka [34]	25
Slika 19. Dijagram stvaranja laserskih zraka vlaknastog lasera [35].....	26
Slika 20. CNC plameni rezač s četiri rezne glave [39]	28
Slika 21. Shema rezne glave plamenog rezača tijekom postupka rezanja [40].....	29
Slika 22. Shema boce za acetylen [41].....	30
Slika 23. CNC pila za panele [42].....	32
Slika 24. Prednji dio stola sa sustavom zračne amortizacije i suspenzije [44]	33
Slika 25. Listovi predrezača i pile za rezanje ugrađeni u pomičnoj glavi za rezanje [43].....	34

POPIS TABLICA

Tablica 1. Količina unesene topline za rezanje različitih materijala i debljina postupkom CO2 laserom [28].....	20
Tablica 2. Usporedba najbitnijih faktora opisanih postupaka rezanja velikih pločastih materijala	35

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
ABS	(Akrilonitril Butadien Stiren) - terpolimer akrilonitrila, butadiena i stirena
CNC	(Computer Numerical Control) - računalno numeričko upravljanje
HDPE	(High-Density Polyethylene) – polietilen visoke gustoće
MDF	(Medium Density Fiberboard) - medijapan ploča
PVC	(Polyvinyl Chloride) - polivinilov klorid
SHIP	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
P	kW	snaga lasera
S	mm	debljina čeličnog obratka
V	$\frac{m}{min}$	brzina rezanja

SAŽETAK

Potreba za novijim i efikasnijim postupcima rezanja velikih pločastih materijala potaknula je razvoj novih tehnologija. Neki od postupaka samo su prirodna evolucija već postojećih tehnologija dok su drugi specijalno razvijeni u svrhu rezanja pločastih materijala. U ovom završnom radu opisivat će se najpopularniji postupci rezanja velikih pločastih materijala. Opisom konstrukcije i načina rada strojeva predočit će se najbitnije razlike u samim postupcima rezanja. Mehanizmi rezanja svakog postupka potpuno su drukčiji te zato svaki od njih ima velike razlike glede performansi. Za svaki postupak rezanja nabrojat će se materijali i njihove maksimalne debljine koje je moguće rezati. Dimenzijska točnost izratka i kvaliteta obrađene površine jedni su od najvažnijih faktora kod izrade gotovih proizvoda bez daljnje obrade. Detaljnom razradom ovih tehnologija rezanja velikih pločastih materijala dobiva se poseban uvid u njihove prednosti i mane jedne naspram drugima.

Ključne riječi: veliki pločasti materijali, postupci rezanja, strojna obrada, karakteristike

SUMMARY

The need for newer and more efficient cutting procedures for large sheet materials has stimulated the development of new technologies. Some of the procedures are just a natural evolution of already existing technologies, while others have been specially developed for the purpose of cutting sheet materials. In this final paper, the most popular cutting procedures for large plate materials will be described. By describing the construction and operation of the machines, the most important differences in the cutting procedures themselves will be shown. The cutting mechanisms of each procedure are completely different, and therefore each of them has big differences in terms of performance. For each cutting process, the materials and their maximum thickness that can be cut will be listed. The dimensional accuracy of the workpiece and the quality of the processed surface are one of the most important factors in the production of finished products without further processing. The detailed elaboration of these technologies for cutting large sheet materials gives a special insight into their advantages and disadvantages compared to each other.

Keywords: large sheet materials, cutting processes, machine cutting, characteristics

1. UVOD

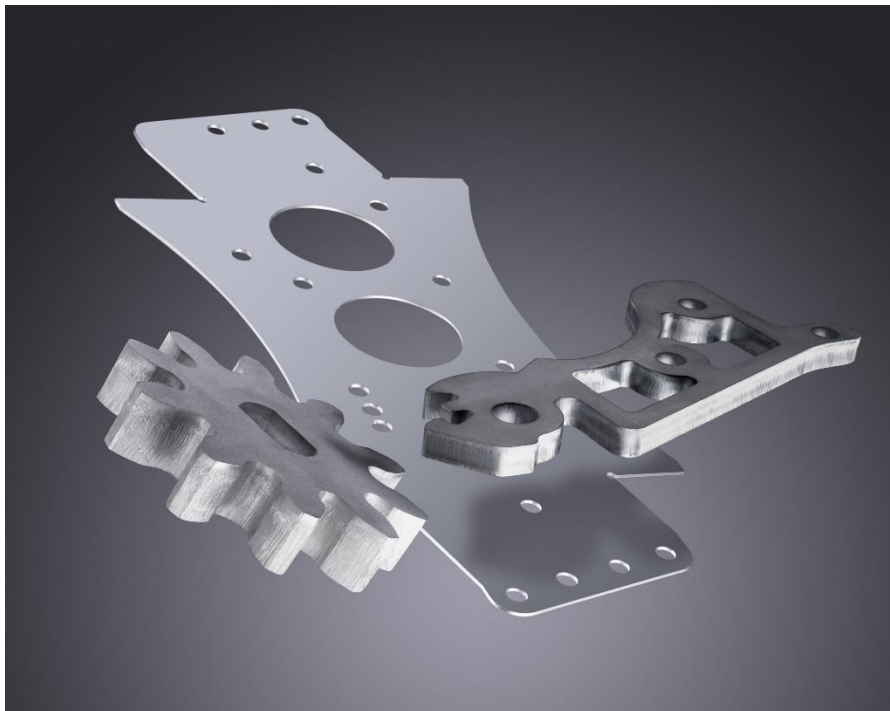
Pločasti materijali velikih dimenzija, u nekim slučajevima i debljina, predstavljaju unikatne probleme u proizvodnji. Kružna pila je alatni stroj koji se u pripremi proizvodnje vrlo često koristi za rezanje tih velikih ploča na manje dimenzije. Takvi sirovci manjih dimenzija su sada pogodni za daljnju obradu i izradu dijelova na konvencionalnim alatnim strojevima ili numerički upravljanim alatnim strojevima (CNC). Dimenzije tih strojeva su sada primjerenije uobičajenim proizvodnim pogonima. Međutim, u nekim slučajevima ekonomičnije je i brže direktno iz ploče velikih dimenzija izraditi potrebne dijelove prema radioničkom nacrtu. Vremenski, a uz to vezano i ekonomski, razlozi potaknuli su razvoj novih tehnologija rezanja koje mogu akomodirati tako velike početne dimenzije sirovaca. Postoji mnogo vrsta postupaka rezanja velikih pločastih materijala od kojih svaki ima svoju posebnu tehnologiju rezanja koja ga čini primjenjivim samo za specifične materijale i njihove debljine. Dimenzijska točnost izratka, kvaliteta rezane površine i potreba za dodatnom obradom također ovise o izabranoj tehnologiji rezanja. Ti faktori daju perspektivu o pozitivnim i negativnim stranama svakog postupka što je vrlo bitno kod izbora strojeva za vlastitu proizvodnu.

2. POSTUPCI REZANJA VELIKIH PLOČASTIH MATERIJALA

Zbog velikih dimenzija sirovaca, a ponekad i gotovih proizvoda, konvencionalni postupci obrade poput glodanja pokazuju se najmanje prikladnima, jer glodalice moraju biti velikih dimenzija što bi rezultiralo u ekstremno visokoj cijeni takve izvedbe. Novije tehnologije obrade specifično takvih oblika sirovaca ostvarile su puno veću efikasnost i smanjenje cijene obrade. Dok su jedne samo drukčije formatirani i prilagođeni sustavi već postojećih tehnologija rezanja, druge tehnologije potpuno su nove kod primjene strojnog rezanja materijala. Najpopularniji od takvih specijaliziranih postupaka rezanja pločastih materijala su:

- Strojno rezanje glodanjem za pločaste materijale
- Rezanje vodenim mlazom
- Plazma rezanje
- Lasersko rezanje
- Rezanje plamenom
- Rezanje pilom za panele

Slika 1. pokazuje neke proizvode izrađene laserski rezanjem iz pločastih materijala.



Slika 1. Proizvodi nastali postupkom rezanja pločastih materijala laserom [1]

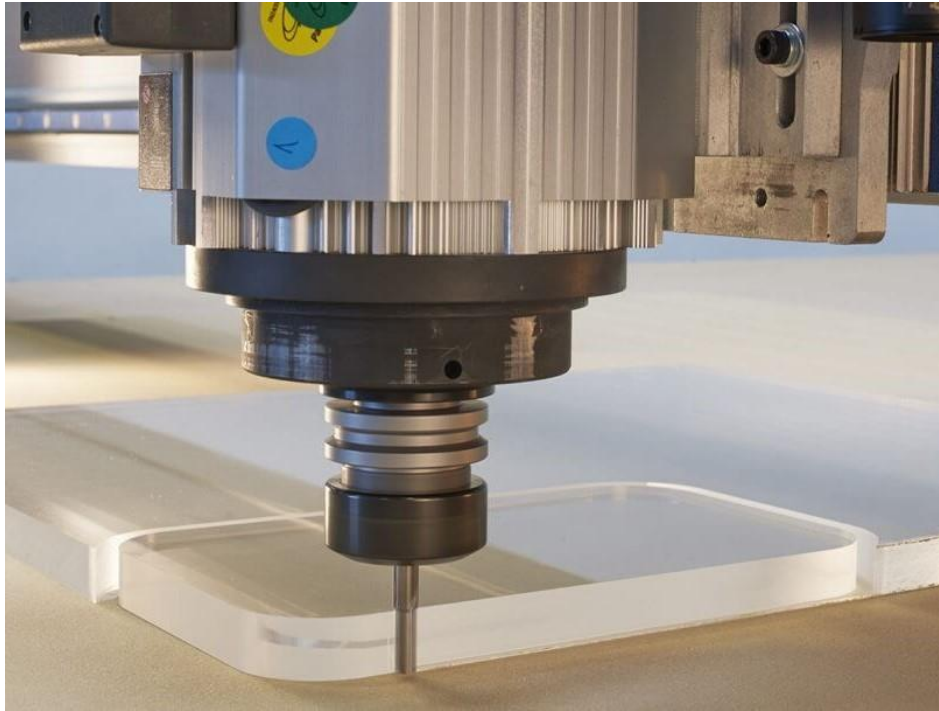
2.1. CNC glodanje

Kod rezanja manjih pločastih sirovaca moguće je koristiti bilo koju glodalicu adekvatnih dimenzija, no za pločaste sirovce velikih dimenzija koriste se posebne glodalice s velikim stolom (router). Takve glodalice su najčešće vrlo jednostavne s dvije ili tri dimenzije glodanja te nižom maksimalnom visinom obratka pošto su specijalno konstruirane za pločaste materijal. Treća dimenzija obrade daje sposobnost ravnjanja površina te čak rezanja na određene dubine što ostalim tehnologijama rezanja pločastih materijala nedostaje. Također postoji mogućnost zamjene alata za rezanje, kojom se mogu postići razni oblici rezane rubne površine. Izmjenom alata ili samo dodatnim prolazom po rubovima s finijim postupkom obrade mogu se, bez micanja obratka sa stola, napraviti završne obrade oštih ili grubo reznih rubova. Time se kod ovog postupka rezanja postižu izvrsne kvalitete reznih rubova. Postoji mnogo vrsta alata kojima se postižu različiti rezovi rubova poput skošenih, s utorom ili pak specijalnih ukrasnih rubova. Time CNC glodalica ima posebnu prednost nad ostalim strojevima za rezanje pločastih materijala pošto on jedini ima sposobnost izrade kompliciranijih i trodimenzionalnih rubova.

Materijali koje je moguće rezati ovom metodom moraju biti dovoljno kruti da se mogu stegnuti za stol te da ne ispadnu iz stezaljki tijekom procesa rezanja. Također materijali ne smiju biti krhki ili pretvrđi pošto se ovom metodom reže uz pomoć oštrica glodala. Tvrdocu obrađivanog materijala koju je moguće rezati određuju karakteristike samog stroja, glodala koje se koristi, vrijeme koje je na raspolaganju za rezanje te budžet (neki materijali vrlo brzo uništavaju oštrice glodala). Brzine rezanja nije lako definirati jer znatno ovise o mnogo faktora poput stroja, materijala koji se reže, alata te željene dimenzijske točnosti i kvalitete površina izratka, no ona je uglavnom jedna od najsporijih među svim postupcima rezanja velikih pločastih materijala. Iz tog je razloga primjena sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) sve češća kod ovakvog postupka rezanja što povećava brzinu rezanja te istovremeno smanjuje trošenje alata. SHIP se dovodi uz pomoć cjevčice usmjerene direktno u mjesto rezanja čime se ta zona hladi i podmazuje smanjujući trenje između obratka i alata.

Najčešće obrađivani materijala ovom obradom su ABS ploče, aluminijske ploče, čelične ploče, drvene ploče, kompozitne ploče poput ploča od karbonskih vlakna ili raznih polimera itd. Maksimalna debljina obratka koju može rezati ovaj proces ovisi o glodalu te vremenu koje je na raspolaganju pošto se rezanje može podijeliti u više prolaza s manjim dubinama rezanja. Prema izvoru [2], dubina rezanja, pa i time broj prolaza potrebnih za potpuno izrezivanje izratka, određuju se prema faktorima kao što su snaga stroja, krutost sustava alat-stroj-obradak, oblik odvojene čestice, utjecaj dubine rezanja na vibracije te geometrija alata. Parametar dubine rezanja prije se određivao iskustveno i procjenom kroz eksperimentalne rezultate rezanja, no danas se on

puno lakše određuje uz pomoć računalnih sustava. Zbog svojih velikih dimenzija, preciznost routera generalno je nešto niža od prosječnih CNC glodalica. Prema izvoru [3], ona se u prosijeku kreće negdje oko $\pm 0,127$ mm u X i Y osi te $\pm 0,025$ mm u Z osi. Na slici 2. je prikazano strojno glodanje pločastog materijala.



Slika 2. Postupak rezanja pločastog materijala CNC routerom [4]

2.1.1. Konstrukcija CNC glodalice za pločaste materijale (routera)

Konstrukcija routera pokušava se što više pojednostaviti za smanjivanje cijene samog stroja. Zbog toga je najčešće korištena mosna konstrukcija glodalice za postizanja bolje krutosti i mobilnosti alata po cijelome prostoru stola. Jednostavnost same konstrukcije i postupka rezanja glavni su razlozi zbog kojih su routeri jedna od najjeftinijih i time najraširenijih opcija za rezanje gotovih proizvoda iz velikih pločastih materijala.

Alat odnosno glodalo je postavljeno na mosnu konstrukciju okvira koji se giba u dvije osi iznad stola, te se uz pomoć treće osi alat vertikalno giba do obratka. Skuplji i versatilniji strojevi imaju opciju pomicanja glodala u pet osi. Pomicanje okvira i glodala postiže se pomoću osnih motora i vodilica. Okvir mora biti što krući i lakši da bi se dobila što veća točnost i brzina rezanja. Zbog veličine stroja, često nema nikakvih zaštitnih barijera ili poklopaca. S time na umu, potrebno je biti vrlo pažljiv oko ovakvih otvorenih strojeva. Kod glodanja mekših materijala, odvojene čestice

moгу сметати или пак бити толико праškасте да лете свугдје по zraku. U slučaju manjih i lakših čestica, pored glavnog vretena, odnosno okolo glodala, postavlja se sustav usisavanja zraka i odvojenih čestica, dok se u slučaju težih odvojenih čestica za njihovo odstranjivanje koristi mlaz SHIP-a. Glavnim vretenom se pokreće alat glodala kojim se reže obradak. To vreteno je najčešće samo elektromotor s pričvršćenom steznom glavom za primanje alata. Veća vretena je zbog velikog stvaranja topline potrebno aktivno hladiti, najčešće rashladnom tekućinom.

Mjesto kontrole cijeloga stroja je sučelje s računalnim kontrolerom. U većini slučajeva ono je računalo dizajnirano i uklopljeno u stroj, no manji jeftiniji strojevi mogu isključiti taj dio da korisnik ima mogućnost povezivanja osobnog računala kao sučelje. Sučeljem se u stroj unose komande pomicanja osi, postavljanja nultočaka, pokretanja G-koda ili mijenjanja alat, dok je računalni kontroler zadužen za prevađanje G-koda u signale za pokretanje motora osi i vretena. Prema izvoru [5], on je mozak operacije stroja te kontrolira, vodi i nadgleda sve detalje postupka tijekom obrade.

2.1.1.1. Stol CNC glodalice za pločaste materijale

Prema izvoru [5], stol routera radna je površina na koju se postavlja obrađivani pločasti materijal. Materijal se najčešće osigurava stezaljkama za stol, no u nekim slučajevima to ni nije potrebno zbog velikih dimenzija i mase samog obrađivanog materijala koji stvaraju potrebnu silu trenjem. Postoje i vakuumski stolovi koji uz pomoć vakuuma pritišću i drže obrađivanu ploču. Kod rezanja pune dubine pločastog materijala, alat zadire u materijal stola te ga time reže. Zbog toga je gornji sloj stola smatran potrošnom površinom pa je on konstruiran i izrađen kao fiksirana zamjenjiva ploča od mekših i jeftinijih materijala poput MDF-a, kompozita ili plastike. Slika 3. pokazuje stol CNC routera sa zamjenjivom MDF pločom.



Slika 3. Stol CNC routera sa zamjenjivom MDF pločom [6]

2.1.1.2. Alati CNC glodala za pločaste materijale

Biranje alata ovisi uvelike o materijalu obratka, željenoj brzini rezanja te željenoj kvaliteti obrađene površine. Kod rezanja pločastih obradaka, širina rezanja treba biti što tanja da se smanji otpadni materijal pa se zato koriste što tanja svrdla. No bitno je i u obzir uzeti da se brzinom rezanja povisuju i sile. Zbog toga se glodala biraju prema parametrima rezanja, ovisno da li se fokusira na što manje otpada ili što bržu proizvodnju. Postoji mnogo različitih oblika glodala za routere no za rezanje pločastih materijala najčešće je korišteno prstasto glodalo s ravnim vrhom. Njime se postižu ravni i kvalitetni rezani rubovi uz najmanji otpadni materijal i minimalno zadiranje glodala u površinu stola. Ostali tipovi glodala poput čeonog za poravnanje površine, V-oblika glodala za skošene rubove te profilnog glodala za kompliciranije oblike rubova manje se koriste.

Slika 4. prikazuje neke od vrsta alata za CNC routere, a najčešće korišteni materijali glodala za rezanje prema izvoru [8] su:

- Brzorezni čelik
- Cementirani karbid
- Volframov karbid
- Polikristalno dijamantno glodalo
- Glodalo s karbidnim vrhom



Slika 4. Neke od vrsta alata za CNC routere [7]

2.2. Rezanje vodenim mlazom

U ovom postupku rezanja kao alat koristi se mlaz vode ili kombinacija vode i abraziva, koji vrlo visokom brzinom izlaze iz mlaznice te udaraju u obradak i time ga režu. Čista voda koristi se za rezanje mekših materijala, dok se za rezanje tvrdih koristi mješavina vode i abraziva. Većina materijala kompatibilna je za rezanje ovim postupkom, no nisu obradivi bolje delikatni materijali poput mekih spužvi ili papira te ekstremno tvrdi i krhki materijali poput temperiranog stakla i dijamanta. Prema informacijama iz izvora [9], tipični strojevi za rezanje vodenim mlazom postižu tlakove vode u mlaznici od 3500 bara na slabijim pa sve do 7000 bara na jačim strojevima. Zbog visokih tlakova, brzina vode na izlazu iz mlaznice može dostići čak mah 3, što je otprilike 760 m/s. Većina strojeva za rezanje vodenim mlazom podržava rezanje u samo dvije dimenzije (osi), no noviji i napredniji strojevi mogu s pet osi rezati u tri dimenzije. Zbog specifičnog mehanizma rezanja ove tehnologije, tehnički nedostaje dubinska dimenzija rezanja pošto mlaz vode prodiere kroz cijelu dubinu obratka pod kutom kojim je izašao iz mlaznice [10].

Širina reza može se regulirati izmjenom dijelova mlaznice te ovisi o tipu korištenog abraziva. Tipične širine rezova mlaza s abrazivom kreću se između 1,0 mm i 1,3 mm, ali najuže su čak 0,51 mm. Čestice abraziva mogu začepiti vrlo uske mlaznice, zato rezovi s čistim mlazom vode, kako

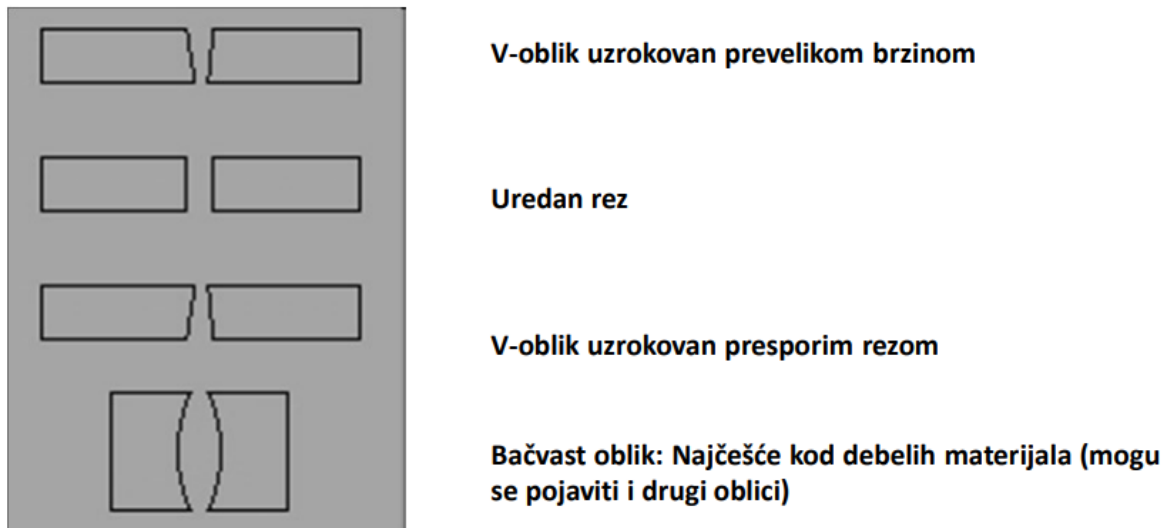
je rečeno u izvoru [10], mogu postići puno uže rezove prosječnih širina između 0,18 mm i 0,33 mm, dok najuži rezovi dostižu minimalne širine od 0,076 mm. Užim se rezovima mogu kod rezanja velikih pločastih materijala izradci postavljati bliže jedan drugome što smanjuje otpad i povećava proizvodnost.

Brzina rezanja znatno utječe na kvalitetu površine rezanog ruba. U dijelovima rezanim vodenim mlazom kvalitete površine rubova se prema izvoru [10] rangiraju po oznakama od Q1 do Q5, tako da viši brojevi označavaju bolju kvalitetu površine. Kod tanjih dijelova razlika u brzini rezanja između kvaliteta Q1 i Q5 kreće se oko tri puta sporije, dok kod debljih ta razlika može dostići i 6 puta sporija brzina rezanja za postizanje najbolje kvalitete. Kod nižih kvaliteta na rezanim se rubovima počinju uočavati linije rezanja zbog „zaostajanja“ mlaza. Izgled tih linija po rangui kvalitete može se vidjeti na slici 5.



Slika 5. Rangiranje kvalitete površine rezanih rubova vodenim mlazom [10]

Maksimalna debljina obratka kojeg je moguće rezati ovisi o njegovom materijalu. Tako na primjer prema izvoru [11], mekši materijali poput polimernih spužva mogu biti i do 90 cm debljine dok tvrđi poput čelika budu maksimalno 30 cm. Maksimalnu debljinu također mogu određivati parametri obrade poput brzine rezanja, abraziva koji se koristi te udaljenosti mlaznice od obratka. Uz kvalitetu površine rezanih rubova, ovi faktori također utječu na oblik poprečnog presjeka reza od kojih se najčešći mogu vidjeti na slici 6. Točnost rezanih proizvoda znatno varira. Ovisno o mediju s kojim se reže i brzini samog mlaza, najbolji rezultati mogući ovim postupkom obrade su točnost od $\pm 0,13$ mm te ponovljivost od $\pm 0,025$ mm što je rečeno u izvoru [10].

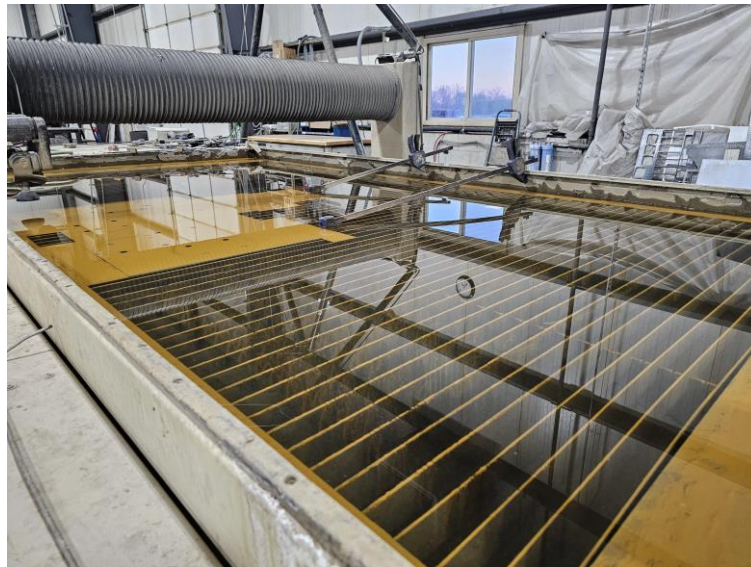


Slika 6. Oblici poprečnog presjeka reza vodenim mlazom [9]

2.2.1. Konstrukcija stroja za rezanje vodenim mlazom

Konstrukcija stroja za rezanje vodenim mlazom slična je konstrukciji CNC glodalice za pločaste materijale. Mlaznica je montirana na mosnu konstrukciju koja se na sličan način giba po vodilicama iznad stola. Konstrukcija ima zadatak pridržavanja i dostavljanja mlaznice do lokacije rezanja. Mlaznica ima mogućnost pomicanja u tri dimenzije tako da reže u dvije a treću koristi kako bi se što više približila obratku, jer što se mlaz više udaljava od mlaznice, on postaje slabiji i raspršeniji. Prema izvoru [10], tipična idealna udaljenost mlaznice od obratka je otprilike 3,2 mm. Postoje izvedbe strojeva s pet osi pomicanja kojima stroj dobiva sposobnost trodimenzijske obrade, slika 8.

Kod ovog postupka rezanja pločastih materijala, stol se također smatra potrošnim, no znatno se razlikuje od stola za glodanje. Sam stol, prikazan na slici 7., izrađen je od čvrstih metalnih rešetki koje su tanke u smjeru tečenja mlaza. Tanji profili rešetki smanjuju otpor i omogućuju lakšu defleksiju vodenog mlaza, čime se smanjuje njihovo trošenje. Ispod stola postavljeni je bazen vode kojim se raspršuje energija mlaza kako bi se spriječilo njegovo dopiranje do dna. Također ima funkciju sakupljanja otpada i potrošenog abraziva kao i prigušivanja zvuka mlaza. Postoje i pomični hvatači mlaza koji se nalaze ispod obratka i stola, unutar bazena, gdje prate mlaz i prigušuju ga uz pomoć metalnih kuglica ili pločica.



Slika 7. Stol stroja za rezanje vodenim mlazom [13]

Prema izvoru [12], pumpe za tlačenje vode dijele se u dvije kategorije. One koje postižu tlak do oko 410 MPa nazivaju se pumpe s normalnim pritiskom dok one iznad imaju naziv hipertlačne pumpe. Hipertlakom dobivaju se nedvojbeno bolji rezultati rezanja, ali se i zato trošenje komponenta pumpi i dostavnog sustava vode eksponencijalno diže s operacijskim tlakom. U nekim slučajevima to dodatno trošenje i potreba za održavanjem može nadmašiti dobitke rezanja hiperstlačenim mlazom. Zato je bitno testirati i balansirati tlakove i abrazive s proizvodnosti u svakom pojedinom slučaju proizvodnje zasebno.



Slika 8. 5-osni stroj za rezanje vodenim mlazom [14]

2.2.2. Tipovi rezanja vodenim mlazom

Glavni mehanizmi rezanja vodenim mlazom su erozija i abrazija. S povećanjem brzine vode povećava se i energija koju ona i abraziv nose, što dodatno povećava abrazijsko trošenje materijala prilikom udara mlaza u njegovu površinu. Pritisak vode i veličina mlaznice reguliraju izlaznu brzinu vodenog mlaza, a ona je direktno povezana s brzinom rezanja i preciznosti što su najvažniji faktori kod proizvodnje. Uz vrijeme proizvodnje najveći trošak je cijena abraziva pa se on nastoji što manje koristiti. Kod mekših materijala moguće je koristiti samo vodu bez abraziva, dok je kod tvrdih materijala njegovo korištenje neizbježno. Jedan od načina uštede abraziva je povećanje brzine vodenog mlaza, što omogućava česticama vode i abraziva da nose više energije, s čime je potrebna manja količina abraziva za postizanje istih (u većini slučajeva čak i boljih) rezultata rezanja što se može vidjeti u izvoru [12].

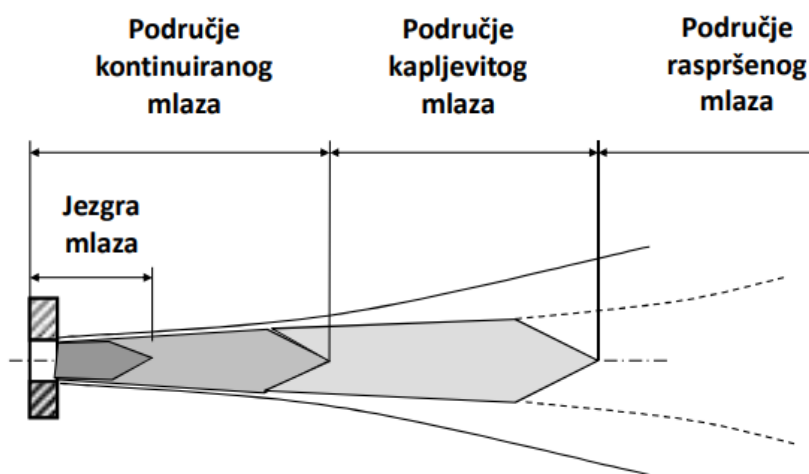
2.2.2.1. Medij: voda

Prema izvoru [15], mlaz vode bez abraziva se kao medij za rezanje koristi za mekše materijale poput gume, drva, raznih spužvi, izolacijskih materijala, tanjih plastika i metalnih folija. Budući da je glavni troškovni faktor (abraziv) eliminiran, ovaj postupak rezanja je znatno jeftiniji i jednostavniji. Trošenje komponenti mlaznice i dostavnog sustava vode znatno se smanjuje izbjegavanjem abraziva. Također, nema potrebe za miješanjem abraziva s vodom, pa je brzina rezanja veća nego da se u istoj situaciji on koristi što dodatno povećava proizvodnost.

2.2.2.2. Medij: voda-abraziv-zrak

Metoda ubrizgavanja abraziva najčešća je među strojevima za rezanje vodenim mlazom. Pruža najbolji balans između cijene, kvalitete proizvoda i svestranosti materijala koje može rezati. Materijali poput granata i aluminijevog oksida, prema izvoru [10], najčešće su korišteni kao abrazivi kod rezanja. Oni su usitnjeni u čestice veličine između 177 μm i 125 μm , kao što je vidljivo u izvoru [16], tako da mogu biti umiješani i suspendirani u vodi te da imaju mogućnost prolaza kroz što užu mlaznicu. Abraziv se uz pomoć Venturijevog efekta ubrizgava u mlaz vode unutar komore za miješanje. Mješavina zatim prelazi u mlaznicu za fokusiranje, iz koje izlazi kao usmjereni i tanki mlaz, što je opisano u izvoru [12]. Negativan aspekt ove metode je da se, uz abraziv, također ubrizgava i zrak te da se kinetička energija nakon miješanja smanjuje zbog potrebe

za ubrzavanjem tih dodatnih komponenti koje same po sebi na početku nemaju gotovo nikakvu kinetičku energiju. Prisutnost zraka u mlazu smanjuje njegovu stabilnost i kohezivnost što ubrzava gubitak kinetičke energije na većim udaljenostima. Mlaz se s udaljavanjem od mlaznice postepeno širi što smanjuje kvalitetu i kutnu točnost rezanih rubova. Ta pojava događa se kod rezanja svakim od medija, no najjači efekt prepoznaje se upravo kod opisivanoga zbog prisutnosti mjehurića zraka. Opis toga efekta i struktura mlaza, prema izvoru [9], prikazani su na slici 9. To može uzrokovati probleme ili čak onemogućiti rezanje tvrdih materijala, poput keramike. Slabije performanse rezanja također rezultiraju u duljem vremenu obrade pa i time povećanjem trošenja opreme u odnosu na količinu izradaka.

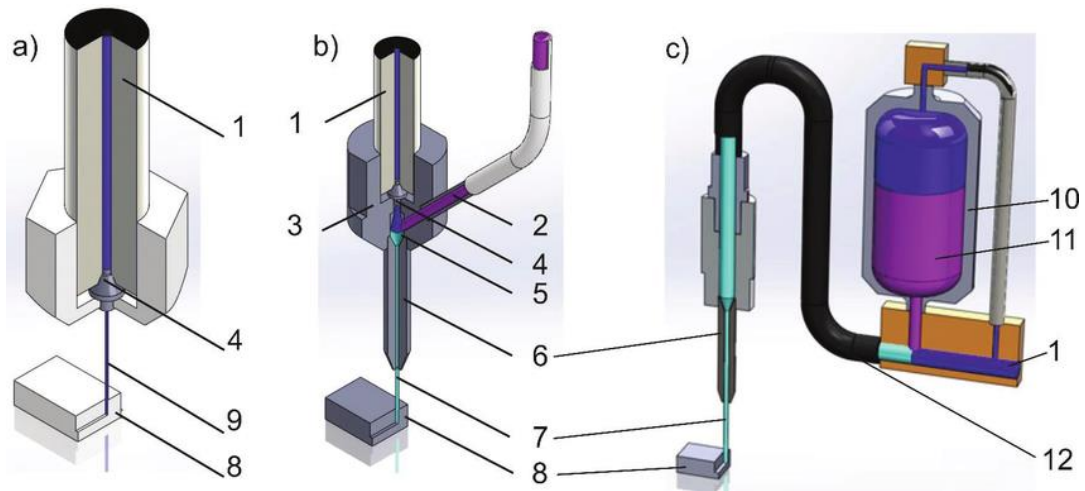


Slika 9. Struktura mlaza s udaljavanjem od mlaznice [9]

2.2.2.3. Medij: voda-abraziv

Opisano u izvoru [17], nazvana metodom suspendiranog abraziva, medij za rezanje je voda i abraziv bez prisustva zraka. Abraziv se miješa u vodu prije stlačivanja unutar zasebne tlačne komore, a ta mješavina se tada koristi kao medij za rezanje. Ovim postupkom miješanja u smjesu se ne dovodi zrak, što rezultira manjom ekspanzijom mlaza, manjim gubitkom kinetičke energije i stabilnijim mlazom na većim dubinama rezanja. Zbog toga ovaj tip rezanja vodenim mlazom pruža najbolje rezultate. Manja potrošnja abraziva, bolje geometrije reza, uži i precizniji rez, puno bolja kvaliteta obrađene površine, posebice kod debljih materijala samo su neke od prednosti one metode nad prijašnjima. Manjim gubitkom kinetičke energije i s dodatnom točnosti, ovom metodom moguće je rezati veću količinu različitih materijala. Tvrđe i bolje krhke materijale, poput kaljenih keramika i čelika, moguće je obrađivati bez pucanja i uz znatno veće brzine rezanja.

Negativna strana ovakve metode je da je veći trošak za nabavu stroja i to što je on kompliciraniji za održavanje zbog ubrzanog trošenja mlaznice i dostavnog sustava medija.



Slika 10. Presjeci metoda rezanja vodenim mlazom [18]

Tipovi rezanja vodenim mlazom prema [18], prikazani su na slici 10.:

- a) Rezanje vodenim mlazom
- b) Rezanje vodenim mlazom uz ubrizgani abraziv
- c) Rezanje vodenim mlazom uz suspendirani abraziv

Dijelovi sustava rezanja vodenim mlazom, koje prikazuje slika 10. su sljedeći:

1. Visokotlačni ulaz za vodu
2. Ulaz za abraziv
3. Glava za rezanje
4. Mlaznica za vodu
5. Komora za miješanje
6. Mlaznica za fokusiranje
7. Vodeni mlaz s abrazivom
8. Obradak
9. Vodeni mlaz
10. Tlačna posuda
11. Mješavina abraziva i vode
12. Visokotlačna fleksibilna cijev

2.3. Plazma rezanje

CNC plazma rezanje vrlo je efektivan i efikasan način rezanja električki vodljivih materijala. Ovim postupkom je, rečeno u izvoru [19], moguće rezati samo isključivo električno vodljive materijale poput raznih čelika, aluminija, bakra i mjedi. Tako uskom pojasu kompatibilnih materijala razlog je princip na koji se oslanja plazma rezanje. Kao što je opisano u izvoru [20], za uspostavljanje električnog luka, tj. plazme, između elektrode i površine, obradak mora biti električno provodljiv da bi se mogao uzemljiti za zatvaranje strujnog kruga. Jedan od načina za uspostavu električnog luka je da se vrh rezača spusti u dodir s obratkom pa se tada digne iznad površine na visinu rezanja. Dodir stvori mali električni luk kojim se ionizira plin čime se on pretvara u vodiča struje za daljnju neprekinutu uspostavu luka na daljinu tijekom cijelog procesa rezanja. Visina rezne mlaznice od obratka ovisi o geometriji mlaznice, materijalu koji se reže te o plinu koji se koristi. Krivo odabrana visina rezanja rezultira u skošenim rezanim površinama i njihovom lošijom kvalitetom. Komprimirani plin vrtloži kroz sapnicu oko elektrode prema obratku gdje ga električni luk ionizira i pretvara u plazmu. Vrtloženje stabilizira i sužuje mlaz plazme što dodatno smanjuje skošenje i poboljšava kvalitetu rezanih površina. Prema izvoru [21], temperature plazme kreću se oko 22000 °C pri kojima se metal tali te ga brzi plin i plazma otpuhuju s mjesta rezanja. Plazma pa i metal koji se reže zbog tako visoke temperature emitiraju jaku svjetlost zbog koje je važno korištenje zatamnenih zaštitnih naočala, što se naglašava u izvoru [20]. Vrsta plina koji se koristi utječe na kvalitetu reza, ali i na cijenu obrade. Kombiniranje plinova često se koristi za postizanje željene kvalitete reza uz što manje troškove. Iz izvora [22] može se vidjeti da se u nekim slučajevima također koriste sekundarni plinovi ili voda za zaštitu i hlađenje sapnica. Strujanjem sekundarnog plina ili vode pospješuje se brzina rezanja te smanjuje promjer mlaza plazme što rezultira većoj točnosti reza i produktivnosti.

Prema izvoru [19] najčešće korišteni plinovi za rezanje te njihova primjena su:

- Argon- koristi se za sporo rezanje, ima loša termo-provodljiva svojstva pa se ne preporučuje njegovo korištenje
- Vodik- najčešće korišten u kombinaciji s argonom, daje najvišu kvalitetu reza
- Dušik- najčešće korišten kao plin za dopunu smjesa plinova vodika i argona
- Kisik- koristi se za rezanje nelegiranih i niskolegiranih čelika te aluminija
- Zrak- najjeftiniji i najjednostavniji za nabavu, ima prihvatljivu kvalitetu reza u većini slučajeva

Strojevi za plazma rezanje tipično imaju mogućnost rezanja obradaka debljine između 1 mm i 50 mm s vrlo dobrim rezultatima i kvalitetom rezanoga ruba, no jači i skuplji strojevi postižu rezove na obradcima maksimalne debljine od čak 150 mm što je rečeno u izvoru [21]. Prema izvoru [23], tolerancije izradaka ovakvih strojeva kreću se između $\pm 0,25$ mm i $\pm 0,77$ mm, ovisno o cijeni i kvaliteti stroja.

2.3.1. Konstrukcija CNC plazma rezača

Sama konstrukcija CNC plazma rezača za velike pločaste materijale vrlo je slična onoj CNC rezača vodenim mlazom. Najčešća je mosna izvedba koja se giba iznad stola da dostavi rezu glavu na mjesto rezanja. Stol je također najčešće rešetkasti za propuštanje plazme i rastaljene troske tijekom rezanja. Postoje izvedbe gdje su rešetke uronjene u bazenu poput onog kod rezača vodenim mlazom, no takve su rijetke. Puno je češća suha izvedba stola ispod kojeg se nalazi samo prazna komora za prikupljanje troske.

2.3.1.1. Dostavna konstrukcija CNC plazma rezača

Najpopularnija izvedba dostavne konstrukcije CNC plazma rezača je standardna mosna konstrukcija koja se po vodilicama giba iznad stola. Za nju je pričvršćen sam plazma rezač koji ima mogućnost kretanja u tri ili pet osi, ovisno o izvedbi. Takva izvedba ima sličnu konstrukciju onoj stroja za rezanje vodenim mlazom. Danas se u nekim situacijama također koriste izvedbe s robotom, slika 11. Na robotsku ruku je pričvršćena glava strojnog plazma rezača, ponekad čak i samo ručni plazma rezač. Takva izvedba rezaču daje sposobnost gibanja u pet osi, ali brže i preciznije nego kod mosne izvedbe. Veliki broj stupnjeva slobode robotske ruke daju ovakvoj izvedbi vrlo veliku svestranost. Pogodna je za primjenu kod rezanja praktički bilo kakvih oblika obratka, ali se za rezanje velikih pločastih materijala manje koristi zbog problema dosega robotske ruke i manje potrebe za rezanjem s pet osi. Stabilni 5-osni stroj za plazma rezanje velikih pločastih materijala prikazuje slika 12.



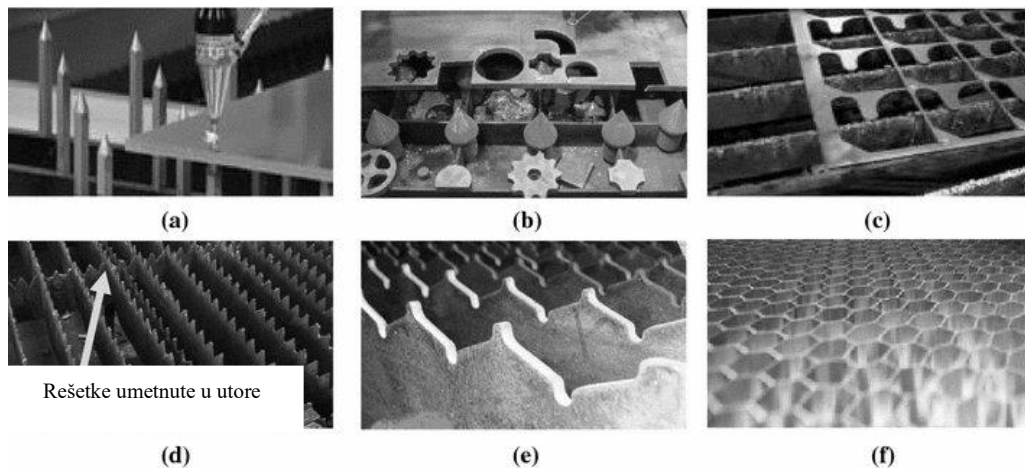
Slika 11. Robotska ruka s plazma rezačem [24]



Slika 12. 5-osni stroj za plazma rezanje velikih pločastih materijala [25]

2.3.1.2. Stol CNC plazma rezača

Stol ima više izvedbi no najpopularnija je s tankim izmjenjivim rešetkama, slična onoj kod stroja za rezanje vodenim mlazom. Na stolu se često nastoje nakupljati naslage troske rastaljenog metala koji se reže. Cijena, jednostavnost čišćenja troske ili pak zamjene rešetke doprinijele su popularnosti ovakve izvedbe. Ostale suhe izvedbe poput metalnih igli, zubastih rešetki i oblika saće također se koriste kod rezanja velikih pločastih materijala, no puno su popularnije kod manjih strojeva. Kod postupka rezanja plazmom pod vodom koristi se stol uronjen u bazenu vode. Opisano u izvoru [22], rešetke stola uronjene su točno do ili ispod površine vode toliko da gornja površina obratka bude na dubini od 50 mm do 75 mm.



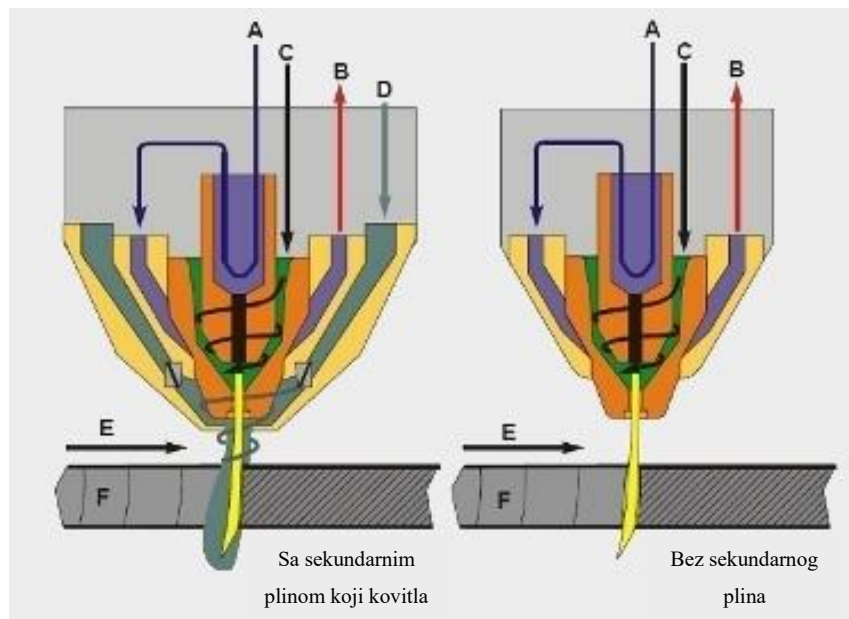
Slika 13. Izvedbe stola za rezanje plazmom [26]

Izvedbe stola za rezanje plazmom prikazane na slici 13. su sljedeće:

- a) Stol od igli
- b) Debele igle (klinovi) za teže obratke
- c) Ravne tanke rešetke
- d) Zubaste tanke rešetke
- e) Nazubljene rešetke s ravnim vrhovima
- f) Krevet oblika saće

2.3.1.3. Glava plazma rezača

Ovisni o izvedbi, postoje dva ili tri glavna dijela glave plazma rezača. Najjednostavnija izvedba sastoji se od elektrode i sapnice, dok se kod druge još nalazi zaštitna pregrada oko sapnice. Bakrena elektroda je pozicionirana unutar sapnice tako da je između njih kanal kroz koji struji plin za rezanje. Sapnica je uglavnom izrađena od bakra ili mjedi. Ako je izvedba rezača sa zaštitnom strujom plina ili vode onda se oko sapnice također nalazi keramička zaštitna pregrada. Između pregrade i sapnice nalazi se sekundarni odvojeni kanal po kojemu struji zaštitni plin ili voda tako da na izlazu potpuno obavija i kovitla oko mlaza plazme. Kod jačih strojeva su u elektrodi i sapnici urezani izolirani kanali kroz koje struji rashladna tekućina, što je sve opisano u izvoru [20]. Zbog ekstremnih uvjeta u kojima se tijekom postupka rezanja nalazi glava plazma rezača, ona se smatra potrošnim materijalom te se, prema izvoru [27], ona periodički mijenja da bi se održala kvaliteta rezova.



Slika 14. Presjek izvedbi glava plazma rezača [20]

Dijelovi glava plazma rezača prikazanih na slici 14. su sljedeći:

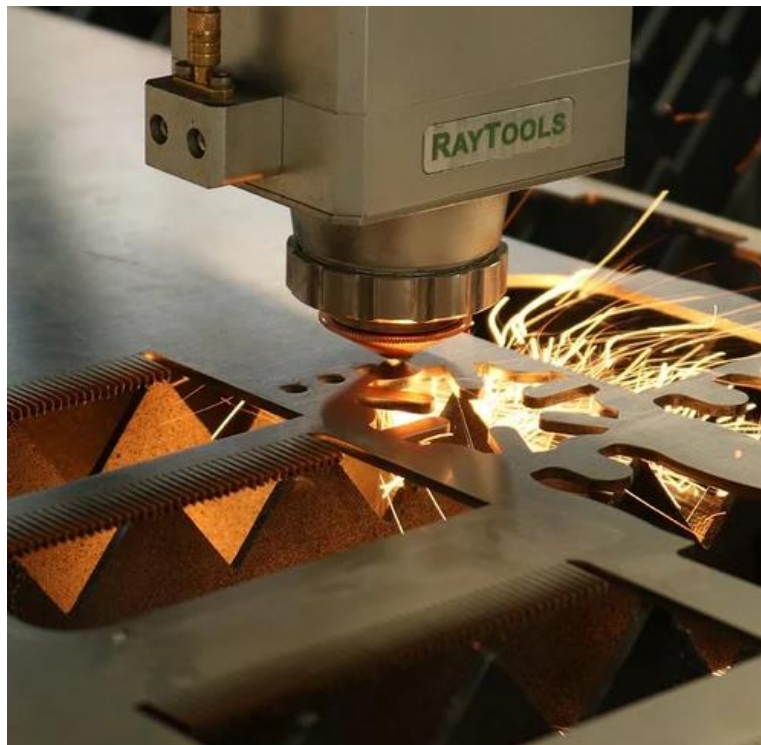
- A - Ulaz rashladne tekućine
- B - Izlaz rashladne tekućine
- C - Plin za rezanje
- D - Zaštitni plin ili voda
- E - Smjer rezanja
- F – Rezana površina

2.3.1.4. Sustav ventilacije

Pošto se tijekom postupka rezanja razvijaju razni plinovi sagorijevanja, metalna prašina te zaostali plinovi vrlo je bitno da u zatvorenim prostorima stroj za plazma rezanje ima sustav ventilacije i filtracije zraka. On može biti dio samog stroja ili pak poseban uređaj koji se priključuje pored rezača. Radi na principu usisavanja zraka iz komore direktno ispod stola za rezanje, te filtracije i ispuštanja tog filtriranog zraka u okoliš. Kod plazma rezanja u vodi on nije potreban jer voda obavlja posao prikupljanja prašine i težih ispušnih plinova.

2.4. Lasersko rezanje

Kod ovog postupka rezanja, kao alat za rezanje, koristi se snažan laser fokusiran u tanki snop. Njime se, ovisno o materijalu koji se reže, tali, isparuje ili spaljuje materijal obratka pri čemu se stvara rez. Zaostali rastaljeni ili spaljeni materijal i razvijeni plinovi otpuhuju se s mjesta rezanja mlazom plina. Prema izvoru [28], laserske zrake se nakon izlaza iz laserskog izvora fokusira uz pomoć leća ili zrcala na promjer od oko 0,025 mm, što rezultira u vrlo tankim rezovima, ovisno o debljini i materijalu obratka u nekim slučajevima moguće je postići širinu reza od 0,10 mm. Snaga lasera strojeva za rezanje dostižu čak 6000 W čime se postižu debljine rezanja obradaka slične onima s plazma rezačima, no takve se snage nalaze samo u vrlo skupim i specijaliziranim strojevima. U nekim slučajevima, kada je materijal osjetljiv na toliko veliku koncentraciju toplinske energije, prema izvoru [28], koristi se način rada lasera pulsiranjem. Naleti laserske energije smanjuju nakupljanje toplinske energije u materijalu obratka te time štite rezane rubove osjetljivijih materijala od taljenja, spaljivanja ili zapaljenja. Dvostrukim pulsiranjem postiže se bolja kvaliteta rezanih rubova tako da prvi puls napravi rez, a drugi sprječava stvaranje naslaga spaljenog materijala ili troske na rezanom rubu. Na maksimalne debljine obradaka koji se ovakvim postupkom mogu rezati uvelike utječu vrsta materijala i snaga stroja za lasersko rezanje. Snaga koju laser mora postići za rezanje određene debljine materijala naziva se unesenom toplinom te se izražava u vatima. Primjeri materijala s njihovim debljinama i potrebnim unesenim toplinama za rezanje prikazani su u tablici 1. Polarizacija lasera ima veliki utjecaj na kvalitetu obrađene površine te brzinu rezanja. Orijehtacijom ravnine polarizacije naspram smjeru brzine rezanja postižu se bolja kvaliteta reza ili povećana brzina rezanja. Najbolja kvaliteta rezane površine dobiva se kada je ravnina polarizacije postavljena pod kutom od 90° naspram smjeru brzine rezanja dok je suprotno slučaj u kojemu želimo povećati brzinu rezanja. Tada se najbolji rezultati postižu pod kutom od 0° između njih, što je opisano u izvoru [29]. Za održavanje željenih parametara rezanja, potrebno je rotirati ravninu polarizacije tako da održava željeni odnos sa smjerom brzine rezanja tijekom postupka. Postupak rezanja pločastih materijala CNC laserom prikazuje slika 15.



Slika 15. Postupak rezanja pločastog materijala CNC laserom [30]

Kvalitete rezanih površina ovakvim postupkom jedne su od najboljih među svim tehnologijama rezanja velikih pločastih materijala. Gruba procjena hrapavosti rezane površine niskougličnog čelika, prema izvoru [28], može se izračunati priloženom formulom (2.1), no ona nije uvijek potpuno točna zbog gore navedenih parametara polarizacije.

$$Rz = \frac{12.528 * S^{0.542}}{p^{0.528} * V^{0.322}} \quad (2.1)$$

Tablica 1. Količina unesene topline za rezanje različitih materijala i debljina postupkom CO₂ laserom [28]

Materijal	Debljina materijala				
	0,51 mm	1,0 mm	2,0 mm	3,2 mm	6,4 mm
Nehrđajući čelik	1000 W	1000 W	1000 W	1500 W	2500 W
Aluminij	1000 W	1000 W	1000 W	3800 W	10000 W
Meki čelik	-	400 W	-	500 W	-
Titanij	250 W	210 W	210 W	-	-
Iverica	-	-	-	-	650 W
Bor/epoksi	-	-	-	3000 W	-

Zbog velike versatilnosti rezanja laserom, malo je materijala koji nisu pogodni za obradu njime. Primjeri nepogodnih materijala za rezanje laserom, prema izvoru [31], su:

- Stakloplastika- tijekom rezanja, komponenta stakloplastike zvana epoksi, emitira toksične plinove
- Polipropilenska pjena- lako zapaljivi materijal koji se tali i ispušta zapaljene kapljice materijala
- ABS plastika- lako zapaljivi i također se lagano tali ostavljajući naslage koje je teško očistiti, tijekom rezanja emitira vrlo toksičan plin cijanid
- PVC i vinil- tijekom rezanja ispuštaju plinoviti klor koji je toksičan te korodira metalne dijelove stroja i uništava optičke komponente lasera
- Deblje polikarbonatne ploče- polikarbonatne ploče deblje od 1 mm lako su zapaljive te se tale ostavljajući neravne i loše obrađene rubove
- HDPE- vrlo zapaljiv u doticaju s laserom te ostavlja naslage spaljenog materijala
- Prozirni ili reflektirajući materijali- optički prozirni materijali propuštaju laserske zrake dok ih vrlo reflektirajući odbijaju

Prema izvoru [31], prosječni strojevi za rezanje laserom, slika 16., mogu rezati debljine obradaka do približno 20 mm, no maksimalna debljina ovisi o samoj snazi lasera i materijalu koji se reže. S točnosti od $\pm 0,01$ mm i ponovljivosti od $\pm 0,005$ mm, što je napisano u izvoru [28], ovaj postupak je najkvalitetniji među strojevima za rezanje velikih pločastih materijala.



Slika 16. CNC stroj za lasersko rezanje pločastih materijala [32]

2.4.1. Konstrukcija stroja za rezanje laserom

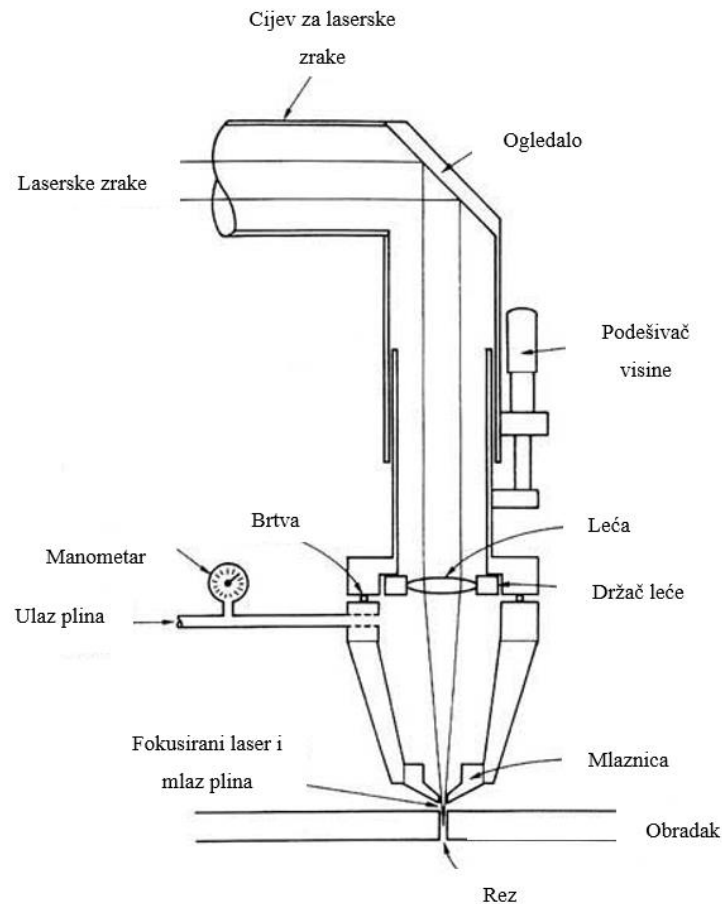
Postoje tri glavne izvedbe strojeva za rezanje laserom. Izvedba u kojoj se obradak giba s mirujućim laserskim sustavom, ona u kojoj se laserski sustav giba s mirujućim obratkom te hibridna izvedba u kojoj se oboje gibaju. Kod rezanja velikih pločastih materijala gotovo uvijek se koristi izvedba u kojoj se giba samo laserski sustav pošto su obradci vrlo veliki i teški. Cijela konstrukcija vrlo je bliska onoj za rezanje velikih pločastih materijala CNC plazma rezačem. Mosna konstrukcija giba se iznad stola da dostavi laserski sustav do lokacije rezanja. Rezna laserska glava uglavnom ima slobodu kretanja u tri osi, dok skuplji i napredniji strojevi imaju sposobnost pomicanja glave u pet osi. Glava za fokusiranje i izvor laserskih zraka dva su glavna dijela sustava za rezanje. Zbog vrlo visoke točnosti i kvalitete rezane površine, sposobnost gibanja u pet osi bolje je korisna kod postupka laserom od ostalih postupaka rezanja gotovih proizvoda iz velikih pločastih materijala. Pošto je u većini slučajeva rezani rub dovoljno dobre kvalitete za gotove proizvode, oni se ne trebaju dodatno obrađivati. Visoka cijena ovakvih strojeva dodatno daje poticaj za ugradnju pomicanja rezne glave u pet osi pošto tada takav sustav pomicanja ima puno manji utjecaj na ukupnu cijenu stroja naspram versatilnosti koju mu dodaje.

Stol je najčešće izrađen od izmjenjivih nazubljenih rešetki kod većih strojeva ili pak rešetki oblika saće kod manjih. Gustoća rešetki diktira se veličinom izradaka koja se planira rezati tako da se oni ne dislociraju ili padnu ispod stola tijekom procesa rezanja gdje bi ih laser mogao oštetiti. Ispod stola postavljena je polica od vatrootpornog ili reflektivnog materijala za prikupljanje troske te zaštite poda i konstrukcije od lasera. Fokusna točka lasera najснаžniji mu je dio te se njegove zrake postepeno raspršuju i time slabe što se više udaljava od te točke čime se smanjuje potrebna zaštita dna stola. Proces pomicanja laserske rezne glave i samog rezanja kontrolira se uz pomoć CNC računalnog kontrolera i sučelja. Neki strojevi za rezanje laserom imaju zaštitni poklopac koji štiti operatere i okolinu od štetnih utjecaja laserskih zraka te toksičnih plinova. Zaštitni poklopac je u nekim izvedbama postavljen preko cijelog stroja ili pak samo preko rezne glave. Razvijeni plinovi se sustavom za ventilaciju ispod stola usisavaju te filtriraju prije ispuštanja filtriranog zraka u okoliš.

2.4.1.1. Laserska glava za fokusiranje

Najraširenija konstrukcija laserske glave za fokusiranje je sa zrcalima i lećama čiji je poprečni presjek vidljiv na slici 17. Laserske zrake se od izvora do sapnice dovode uz pomoć zrcala i leća. Leća ima vrlo važnu ulogu fokusiranja laserskih zraka u što manju točku za uske i precizne rezove. Prema izvoru [33], leće dolaze u mnogo različitih oblika i materijala te je za najbolje rezultate važno odabrati onu adekvatnu za vrstu postupka i materijal koji se reže. Kod CO_2 lasera najpovoljnije su leće od taljenog silicija zbog njihove visoke transparentnosti. Zrcala imaju zadaću usmjeriti laserske zrake od izvora pa sve do leće za fokusiranje. Ona moraju imati iznimno visoki faktor refleksije pošto je u pitanju vrlo visoki stupanj energije i svaki postotni bod više reflektiranih zraka znači znatno produljenje vijeka trajanja i snage rezanja lasera. Kod snažnijih strojeva zrcala se usprkos visokom faktoru refleksije toliko zagrijavaju da ih je potrebno hladiti aktivnim sistemom s rashladnom tekućinom. Sva ta toplina, izgubljena je energija što je potaknulo razvoj novije tehnologije dostavljanja laserskih zraka do leće uz pomoć optičkih kablova. Takvom izvedbom ostvaruje se puno veća snaga i efikasnost stroja. Izvor laserskih zraka time može stajati pored stroja pa se sva ta masa miče od rezne glave i mosne konstrukcije omogućujući time puno veću preciznost, brzinu rezanja i snagu stroja. Optička vlakna unutar kablova imaju svrhu pojačanja i prijenosa laserskih zraka od izvora do leće rezne glave. Njihov sastav je većinskim udjelom vrlo transparentno silikatno staklo dopirano s velikim brojem lantanoida poput erbija, iterbija, neodima i disprozija te obavijen zaštitnom oblogom. Optički kabel priključuje se na glavu za fokusiranje puno bliže leći što zauzvrat smanjuje šansu da u prostor između njih uđe strano tijelo poput prašine, što je sve opisano u izvoru [35].

Ispod leće upuhuje se plin koji se usmjeruje prema mjestu rezanja na obratku uz pomoć keramičke mlaznice. Plin ima svrhu zaštite i hlađenja leće od razvijenih plinova rezanja te zaštite i hlađenja mjesta rezanja na obratku. U takvu svrhu potrebno je koristiti inertne plinove poput argona, ugljikovog dioksida i helija da ne dođe do kemijskih reakcija s komponentama lasera, obratkom ili pak razvijenim plinovima tijekom rezanja.



Slika 17. Poprečni presjek laserske glave za fokusiranje sa zrcalima i lećom [28]

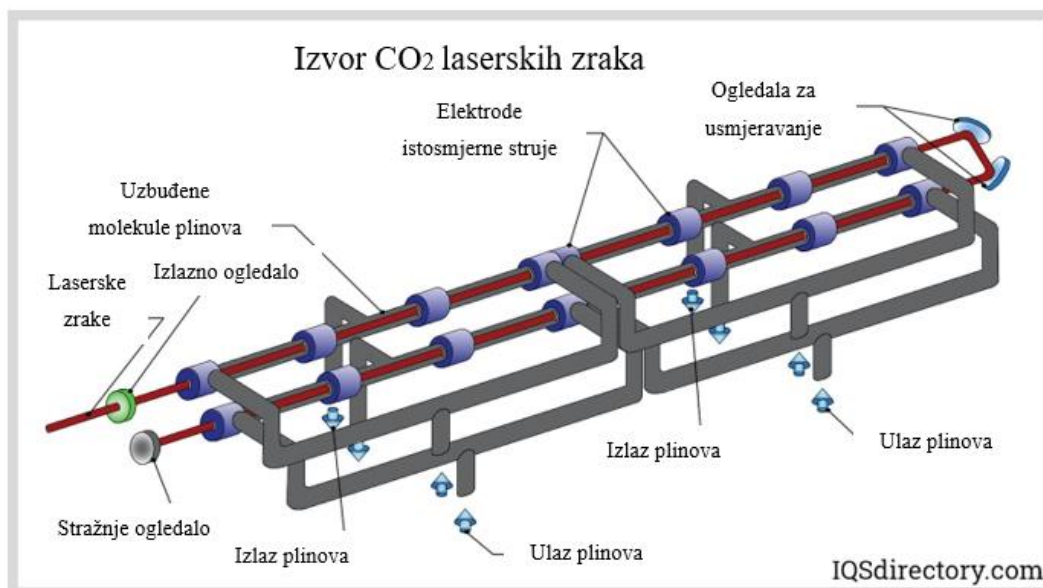
2.4.1.2. Izvor laserskih zraka

Postoji mnogo vrsta izvora laserskih zraka koje se koriste u industriji. Svaka od njih koristi potpuno drugačije fizikalne principe stvaranja i amplifikacije laserskih zraka. Također se zbog svojstva i snage dobivenih laserskih zraka one koriste u različite svrhe te za rezanje različitih materijala. Dvije najpopularnije tehnologije stvaranja i amplifikacije laserskih zraka kod rezanja počastih materijala su CO_2 i vlaknasti izvor laserskih zraka.

2.4.1.2.1. CO_2 izvor laserskih zraka

CO_2 laseri trenutno su najpopularniji izvori za primjenu strojnog rezanja obradaka. Prema opisu tehnologije stvaranja i amplifikacije iz izvora [34] i slike 18., laserske zrake stvaraju se u kvarcnoj komori plina koji se uzbuđuje uz pomoć istosmjerne ili izmjenične struje ili pak u novijim strojevima uz pomoć radiofrekventne energije. Plin unutar cilindrične komore promjera 2,5 cm i

dužine oko 5 m, mješavina je ugljikovog dioksida, dušika i helija u tipičnom omjeru od 1:2:3. Uvođenjem energije u komoru, atomi dušika prelaze u viši stupanj energije. On je odabran kao komponenta mješavine jer ima sposobnost zadržavanja više energije te kroz dulje vrijeme bez emitiranja fotona. Energija se prenosi s molekula dušika nakon kolizije s molekule ugljikovog dioksida što njih također stavlja u viši stupanj energije. U tom stupnju energije ugljikov dioksid ima svojstvo spontanog emitiranja fotona koji kolizijom s drugim energiziranim elektronima ugljikovog dioksida također rezultiraju u daljnjoj kaskadnoj emisiji fotona. Helij ima svrhu hlađenja molekula plinova i same komore. Konstrukcija komore je takva da je na jednoj strani cilindra vrlo reflektivno zrcalo, a na drugoj djelomično reflektivno zrcalo kroz koje se propušteni fotoni gledaju kao izvorna točka lasera. Ta ogledala dijelovi su optičkog rezonatora koji ima svrhu odbijanja fotona po cijeloj komori kako bi se dalje što više i brže oslobodila veća količina novih fotona. Za uštedu prostora mogu se koristiti dodatna zrcala koja odbijaju zrake pod kutom od 180° čime se zadržava tehnička duljina komore uz smanjenje fizičke duljine. Time se dobiju dvije ili više paralelnih kraćih komora spojenih tim zrcalima. Standardna valna duljina izlaznih laserskih zraka je $10,6 \mu\text{m}$ no postoje izvori alternativnih valnih duljina poput $10,25 \mu\text{m}$ ili $9,3 \mu\text{m}$ za rezanje nekih materijala koji ih bolje apsorbiraju.



Slika 18. CO₂ izvor laserskih zraka [34]

2.4.1.2.2. Vlaknasti izvor laserskih zraka

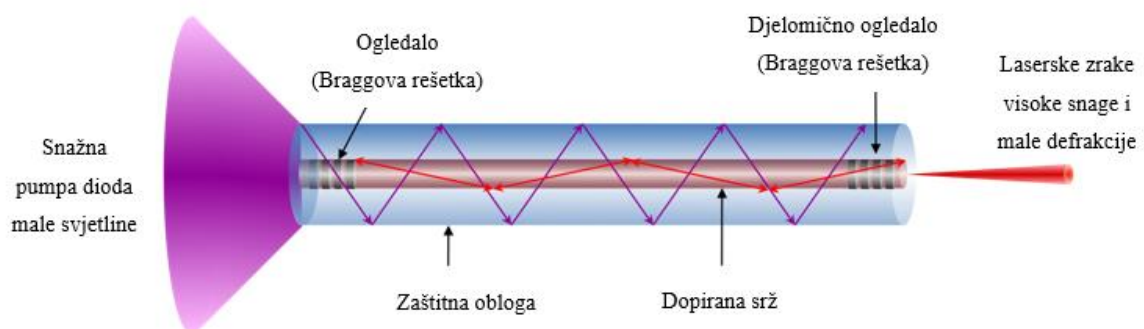
Novija tehnologija stvaranja laserskih zraka koja se danas sve više koristi zove se vlaknasti laser. Sredstvo za stvaranje laserskih zraka u čvrstome je stanju te se nalazi unutar optičkih vlakna što povećava pouzdanost i smanjuje troškove rezanja. Optički kabel napravljen je od silikatnog stakla

dopiranog različitim lantanoidima čijom se količinom i vrstom reguliraju valne duljine emitiranih laserskih zraka. Velikim rasponom valnih duljina laserskih zraka moguće je rezati više vrsta materijala koje upijaju samo određene valne duljine te se ukupna efikasnost rezanja znatno povisuje.

Najčešći lantanoidi u sastavu te njihove emitirane valne duljine su sljedeće:

- Neodim- 780 nm do 1100 nm
- Iterbij- 1000 nm do 1100 nm
- Praseodimij- 1300 nm
- Erbij- 1460 nm do 1640 nm
- Tulij- 1900 nm do 2500 nm

Kao izvor energije koristi se električna energija koja napaja laserske diode pumpe. One emitiranjem svjetlosti u optička vlakna stimuliraju lantanoidne elemente u dopiranoj srži optičkog kabela. Elektroni lantanoida tada prelaze u viši stupanj energije čime se povisuje šansa za spontano vraćanje elektrona u niži stupanj energije te time njihovo ispuštanje fotona. Slobodni fotoni odbijaju se unutar optičkog kabela i sudaraju s drugim elektronima na višem stupnju energije time stvarajući lančanu reakciju ispuštanja dodatnih fotona. Ovakva „sirova“ laserska svjetlost mora se filtrirati u korisne valne duljine što se čini uz pomoć Braggovih rešetki ugrađenih unutar dopirane srži. Kao rešetka koriste se isjecci materijala različitog indeksa loma svjetlosti od one u srži postavljeni na specifične udaljenosti. Propuštaju se samo željene valne duljine dok se one rezonantne s periodom udaljenosti postavljenih isječaka reflektiraju. Propuštene laserske zrake dalje se vode kroz optički kabel do laserske glave za fokusiranje. Opis ove tehnologije stvaranja i amplifikacije lasera napisan je prema informacijama iz izvora [35] te je njegov dijagram prikazan na slici 19.



Slika 19. Dijagram stvaranja laserskih zraka vlaknastog lasera [35]

2.5. Rezanje plamenom

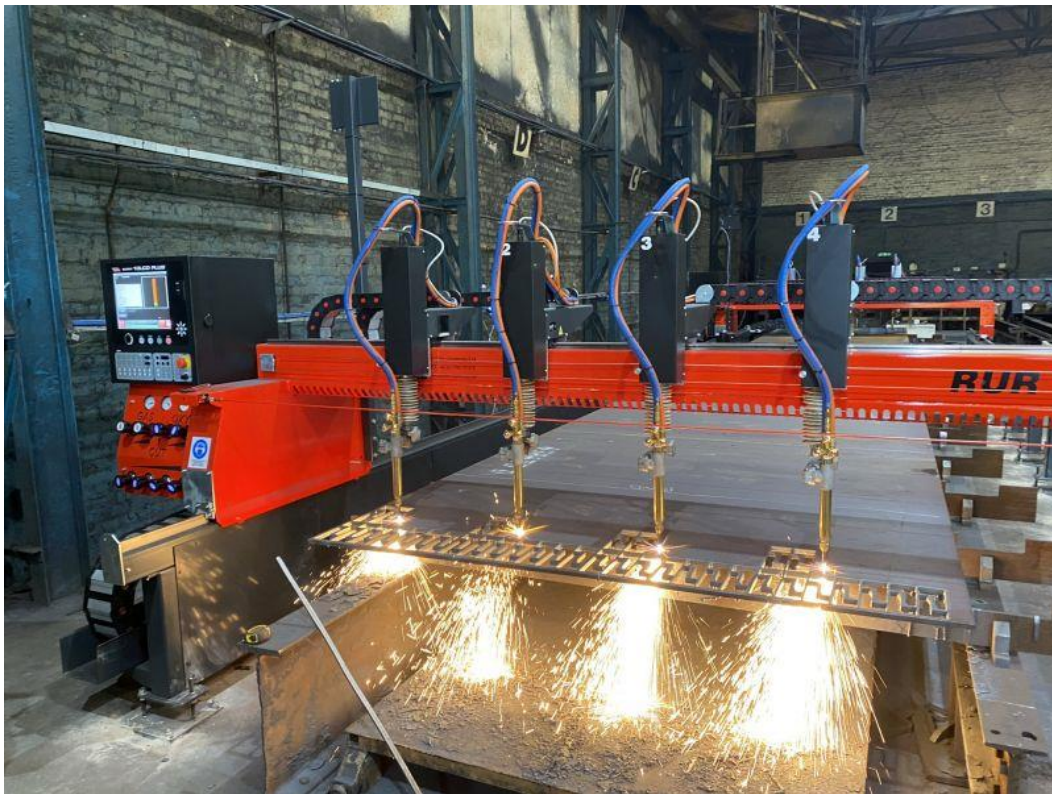
Rezanje plamenom je najstariji postupak strojnog rezanja velikih pločastih materijala. Zbog svoje jednostavnosti i sposobnosti rezanja vrlo debelih čeličnih obradaka koristi se još i danas. Prema izvoru [36], za rezanje je potreban mlaz plamena dobiven izgaranjem mješavine plinova te sekundarni mlaz čistog plinovitog kisika. Uz pomoć mlaza plamena zagrijava se mjesto rezanja na temperaturu malo nižu od točke taljenja materijala koji se reže. Sekundarnim mlazom plinovitog kisika minimalne čistoće od 99,5 %, zagrijani metal počinje naglo oksidirati. Oksidni sloj se pod velikim temperaturama tali i pretvara u rastaljenu trosku, nakon čega se otpuhuje s mjesta rezanja. Što viši postotak kisika u sekundarnome mlazu vrlo je bitan jer umanjenje čistoće od samo 0,1 % rezultira 10 % manjom brzinom rezanja, te postotni udio manji od 99,5 % zaustavlja cijelu reakciju. Tako mala razlika u čistoći može biti rezultat loših ventila, spojki ili cijevi te se zato one često pregledavaju i testiraju. Za plameni mlaz se, prema izvoru [37], kao najčešća mješavina gorivnih plinova koristi acetilen i kisik no postoje izvedbe s kisikom i drugim plinovima poput propilena, propana, prirodnog plina ili vodika.

Ovim postupkom moguće je rezati samo metale kod kojih njihovi oksidi imaju manju temperaturu taljenja od samog metala. Pošto rezanje radi na principu oksidacije i uklanjanja tih rastaljenih oksida s mjesta obrade, nije moguća obrada materijala poput nehrđajućeg čelika ili aluminija čiji oksid ima temperaturu taljenja od preko 2000 °C naspram one elementarnog aluminija od 660 °C. Čelici sastava ugljika od preko 1,6 % također nisu obradivi zbog pucanja materijala tijekom hlađenja te nakupljanja krute troske na mjestu rezanja. To, kao što je rečeno u izvoru [38], ostavlja vrlo malu listu kompatibilnih materijala poput niskougličnih i niskolegiranih ili nelegiranih čelika.

Glavni razlog korištenja ove metode je niska cijena rezanja uz mogućnost rezanja vrlo debelih obradaka. Debljine materijala koje je moguće rezati ovim postupkom, prema izvoru [37], kreću se od 5 mm do 300 mm, dok u posebnim izvedbama stroja mogu biti i do 1000 mm. Iz izvora [38], točnost rezova se kod modernih strojeva kreće između $\pm 0,1$ mm i $\pm 0,3$ mm, no zbog vrlo velike količine toplinske energije koje je unesena u obradak, on se tijekom hlađenja skuplja pa devijacija može, ovisno o debljini i veličini izratka, biti do čak ± 3 mm. Kvaliteta rezanih rubova također nije najbolja što u većini slučajeva rezultira potrebom dodatne obrade za postizanje željenih točnosti i kvalitete rubova.

2.5.1. Konstrukcija CNC plamenog rezača

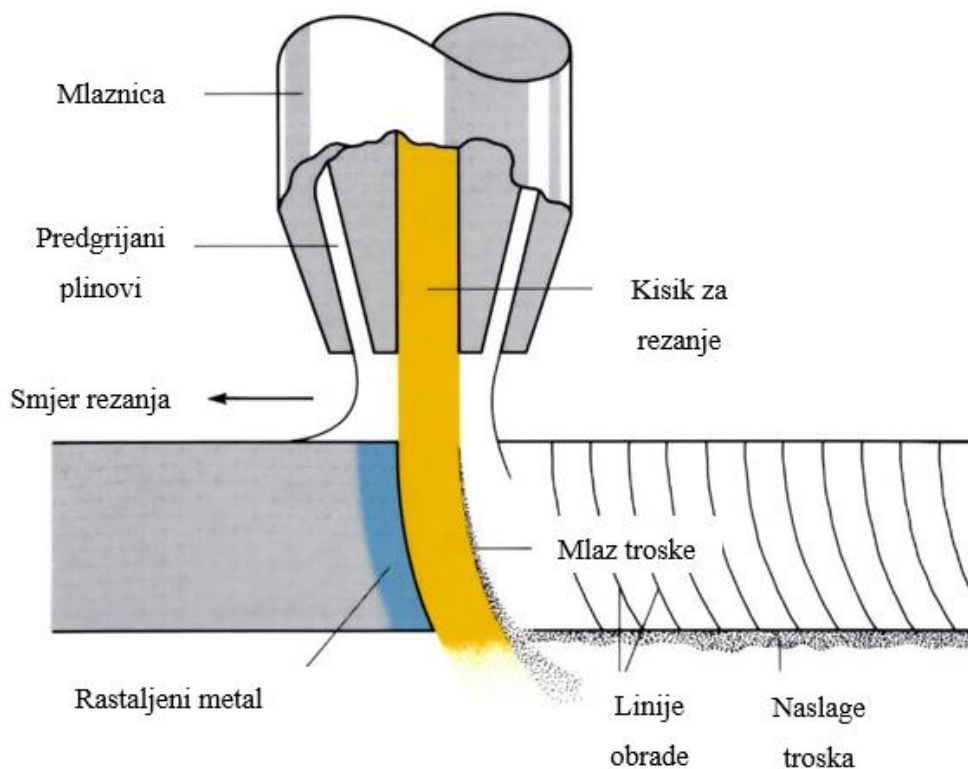
Za rezanje velikih pločastih materijala, na tržištu dominira klasična mosna konstrukcija. Ona po vodilicama klizi u dvije dimenzije iznad stola da dostavi glavu rezača na točnu lokaciju rezanja gdje se tada kreće u trećoj visinskoj dimenziji za reguliranje udaljenosti mlaznice od obratka. Na tu konstrukciju je najčešće pričvršćena jedna rezna glava, no danas se sve češće koriste izvedbe s više reznih glava, jedna pored druge, u svrhu rezanja više identičnih izradaka u isto vrijeme, slika 20. Cijevima su za reznu glavu pripojene boce plinova za rezanje koje najčešće stoje pored stroja. Stol za rezanje plamenom je praktički identičan onome za rezanje plazmom uz iznimku da su rešetke puno deblje za potporu vrlo debelih i teških obradaka te za bolju otpornost na plamen.



Slika 20. CNC plameni rezač s četiri rezne glave [39]

2.5.1.1. Rezna glava plamenog rezača

Konstrukcija rezne glave vrlo je jednostavna. Izvedena je kao dvije mlaznice postavljene jedna u drugoj. Vanjska mlaznica, nazvana plamenom mlaznicom, ima zadatak dobave i usmjeravanja mlaza mješavine gorivnog plina koji se izgara na izlazu iz nje prema mjestu rezanja na obratku. Unutarnja mlaznica stvara brzi mlaz plinovitog kisika za rezanje fokusiran i usmjeren u što manju točku rezanja na obratku. Obje mlaznice izrađene su najčešće od bakra ili mjedi, u rjeđim slučajevima od nehrđajućeg čelika. Shema konstrukcije glave plamenog rezača tijekom postupka rezanja vidljiva je na slici 21.

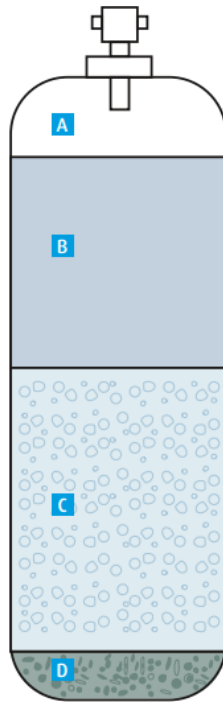


Slika 21. Shema rezne glave plamenog rezača tijekom postupka rezanja [40]

2.5.1.2. Boca acetilena

Acetilen je pod velikom pritisku vrlo reaktivan plin. Ima tendenciju spontanog razlaganja što oslobađa toplinu i može dovesti do samozapaljenja ili eksplozije. Zbog toga je, kako je opisano u izvoru [41], konstrukcija boca za skladištenje acetilena malo kompliciranija od običnih, slika 22. Da se izbjegnu visoki tlakovi uz što veću količinu plina u boci, acetilen je otopljen u otapalu, acetonu. Tipičan tlak boce za acetilen kreće se oko 3 MPa. Unutar boce nalazi se porozna masa u

kojoj je ta mješavina jednoliko raspoređena. Svrha porozne mase je razdvajanje acetilena na što manje jedinice te da u slučaju spontanog razlaganja ona upije svu toplinsku energiju i time spriječi eksploziju. Boca je smeđe boje za lako raspoznavanje točnog sadržaja među bocama drugih plinova.



Slika 22. Shema boce za acetylen [41]

Dijelovi boce za acetylen sa slike 22. su sljedeći:

- A- prostor za ekspanziju; oko 15 % volumena
- B- otopljeni acetylen; oko 33 % volumena
- C- aceton; oko 42 % volumena
- D- porozna masa; oko 10 % volumena

2.6. Rezanje CNC pilom za panele

Rezanje pločastih materijala se kod ovog postupka obavlja uz pomoć kružnog lista pile. Brzim okretanjem lista, oštrice na njemu zadiru u materijal obratka pri čemu se odvajaju čestice tog materijala stvarajući rez. Automatizacijom rezanja pile za panele znatno se povisila njena produktivnost i točnost što je navelo na sve veće usvajanje ovakve CNC tehnologije rezanja velikih pločastih materijala. Ovaj postupak rezanja postao je najpopularniji u postrojenjima za proizvodnju namještaja zbog velike brzine rezanja te točnosti uz vrlo malo otpadaka i troškova operacije. Tehnologija ovog postupka rezanja limitira geometriju rezova na samo ravne linije uzduž površine pločastog materijala, što znači da nisu mogući zakrivljeni ili obli rezovi.

Prema izvoru [42], pila za panele koristi se uglavnom za mekše materijale poput MDF-a, šperploča, furnira, raznih plastika i mekših kompozita. Prije početka rezanja pile, na površini materijala po liniji rezanja, prođe predrezač koji napravi plitki utor po putanji rezanja glavne rezne pile. Time se osiguravaju što ravniji i oštrij rezani rubovi izratka bez pojave krhotina. Kvaliteta rezanih površina je time, prema izvoru [43], vrlo dobra te se dimenzijska točnost kreće oko $\pm 0,1$ mm. Maksimalne se debljine materijala koje je moguće rezati diktiraju veličinom lista pile, no uglavnom se kreću oko 90 mm.

2.6.1. Konstrukcija CNC pile za panele

Konstrukcija CNC pile za panele, slika 23., znatno se razlikuje od one ostalih postupaka rezanja pločastih materijala. Rezanje se događa po dužini obratka u samo jednoj osi te ako je potrebno rezati više dimenzija, obradak se mora rotirati. Rezna glava klizi po vodilicama u jednoj osi po predodređenoj putanji od jedne strane stola na drugu time stvarajući rez na obratku koji joj se nalazi na putu. Ona se sastoji od listova rezne i predrezne pile te zasebnih elektromotora koji ih pokreću. Također ima sposobnost reguliranja visine pila radi akomodacije različitih debljina obradaka. Ispred rezne pile nalazi se manja pila suprotne rotacije nazvana predrezač. Njome se prije rezanja glavnom pilom urezuje fini plitak urez na površini obratka što sprječava oštećivanje rubova izratka tijekom glavnog postupka rezanja. Stol se kod ovakvog stroja nalazi u ravnini s pilom tako da je postavljen vodoravno s obje strane linije rezanja ostavljajući prazan prostor na putanji rezne glave. Obradak se prije rezanja mora pozicionirati i pričvrstiti za stol što se radi automatski u sve tri njegove dimenzije. S gornje strane pritišće ga stezna greda, sa stražnje strane u dimenziju dubine pozicioniraju ga i pridržavaju posebno dizajnirane hvataljke dok se sa strane nalazi valjak kojim se obradak pozicionira i pridržava po širini. Takvim se automatiziranim

sustavom pozicioniranja i pridržavanja smanjuju greške te povisuje brzina ukupnog postupka obrade. Operater mora postaviti obradak na stol, ali bitno u dobrom smjeru rezanja, te pokrenuti program rezanja, s ostatak postupka odradi se potpuno automatizirano. No negativna strana ovakve izvedbe je da ima limitiranu minimalnu veličinu izratka dimenzija od oko 35 mm s 45 mm, prema primjeru stroja opisanog u izvoru [43].

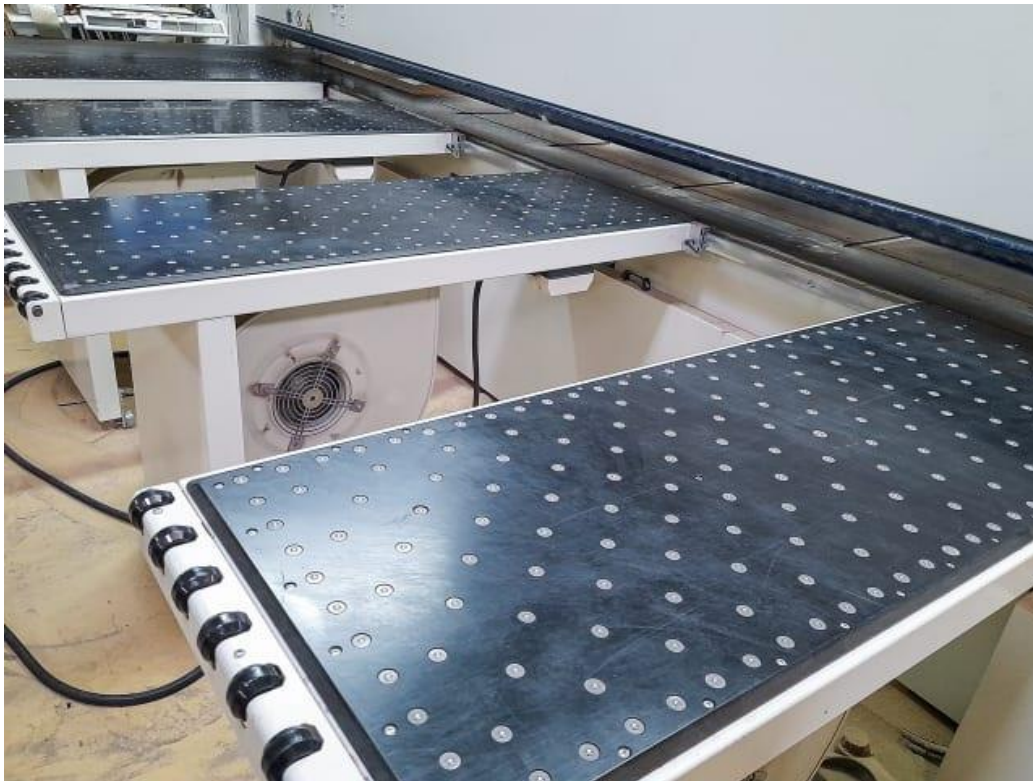


Slika 23. CNC pila za panele [42]

2.6.1.1. Stol CNC pile za panele

Stol je postavljen s obje strane linije rezanja tako da može podupirati obratke s obje strane tijekom i nakon postupka rezanja. Konstrukcije stola sa svake strane linije rezanja imaju velike razlike. Prema izvoru [43], s prednje strane on je izrađen od plastike s ugrađenim sustavom zračne amortizacije i suspenzije za zaštitu površine obradaka koji se može vidjeti na slici 24. Sa stražnje strane linije rezanja obradak podupire konstrukcija s kotačićima za smanjenje trenja i habanja prilikom kretanja obradaka u i van iz stroja. Sustav zračne amortizacije i suspenzije konstruiran je kao velik broj malih rupa na stolu koje su začepljene metalnim kuglicama uz pomoć opruge ili pretlaka s donje strane. Ispod kuglica u stolu nalazi se komora komprimiranog zraka. Kada obradak sjedne na stol, on pritisne kuglice i time odčepi dotok komprimiranog zraka što amortizira pad i suspendira obradak na tankom sloju zraka i vrhovima slobodno rotirajućih kuglica. Time se

smanjuje trenje između stola i obratka što olakšava postavljanje obratka te štiti površinu od habanja.



Slika 24. Prednji dio stola sa sustavom zračne amortizacije i suspenzije [44]

2.6.1.2. List pile za panele

Prema izvoru [45], kod ovakve obrade mekših materijala najčešći materijal lista pile je čelični disk s tvrdim legiranim zupcima od karbida. Postoje mnoge vrste oblika zupci kojima se mijenjaju karakteristike rezanja no kod rezanja pločastih materijala najčešće su korištene pile s lijevim i desnim zupcima s pozitivnim prednjim kutem zbog njihove odlične kvalitete rezanih rubova. Veličina lista pile odabire se prema debljini materijala koji se reže te prema maksimalnoj veličini lista koju stroj može koristiti. Manji listovi generalno imaju manje zahtjeve za snagu stroja te su stabilniji i daju bolje kvalitetne rezove, no smanjivanjem veličine također se smanjuje i maksimalna debljina obratka koja se može rezati. Širina reza diktirana je širinom lista pile i geometrijom zupci. Poželjno je imati što tanji rez za što manje otpatka i odvojenih čestica no s tanjim listovima dolaze problemi stabilnosti te time točnosti tijekom rezanja. Zato se debljina listova odabire prema debljini i materijalu obratka koji se reže da se postigne najbolji omjer stabilnosti i količine otpada. Listovi pila za predrezače generalno su napravljeni od istih materijala

kao glavne pile, no oni su što manjih promjera radi postizanja što boljih kvaliteta rezanih rubova pošto im je svrha rezanje samo vrlo plitkih ureza. Rotacije listova predrezača i glavne pile suprotnih su smjerova da se dodatno poboljša kvaliteta rezanih rubova što se može vidjeti na slici 25.



Slika 25. Listovi predrezača i pile za rezanje ugrađeni u pomičnoj glavi za rezanje [43]

3. USPOREDBA NAJBITNIJIH FAKTORA OPISANIH POSTUPAKA REZANJA

Tablica 2. Usporedba najbitnijih faktora opisanih postupaka rezanja velikih pločastih materijala

Faktor Postupak rezanja	Materijali obratka koje je moguće/nemoguće rezati	Maksimalna debljina obratka	Maksimalna brzina rezanja	Dimenzijska točnost i kvaliteta izratka	Cijena stroja	Cijena rezanja i održavanja
Rezanje CNC routerom	Nije moguće rezati vrlo mekane i vrlo tvrde materijale, najpogodniji za drvo i mekše metale poput aluminija i bakra	Ovisi o glodalu, tipično između 15 mm i 30 mm	Vrlo sporo rezanje	$\pm 0,127$ mm u X i Y osima, $\pm 0,025$ mm u Z osi; kvaliteta rezane površine je iznimno dobra	€€€€	€€€€
Rezanje vodenim mlazom	Nije moguće rezati temperirano staklo i dijamante te materijale koji nisu otporni na vodu, većina ostalih materijala je pogodna za obradu	Mekši materijali do 90 cm, čelici do 30 cm	O srednja brzina rezanja	$\pm 0,13$ mm; kvaliteta rezane površine je vrlo dobra, no ovisi o debljini obratka	€€€€€€	€€€€€€
Plazma rezanje	Pogodni za rezanje su samo električno vodljivi materijali poput bakra, aluminija i čelika	Tipično 50 mm, s boljim strojevima do 150 mm	Vrlo brzo rezanje	Kreće se između $\pm 0,25$ mm i $\pm 0,77$ mm; kvaliteta rezane površine je dobra	€€€	€€€
Lasersko rezanje	Većina materijala su pogodna za rezanje, no nisu pogodni vrlo zapaljivi, prozirni, reflektirajući te materijali koji ispuštaju toksične plinove tijekom rezanja	Prosječan stroj do 20 mm	Brzo rezanje	Otprilike $\pm 0,01$ mm; kvaliteta rezane površine je vrlo dobra no kod nekih materijala ostavlja spaljene rubove (samo estetski problem)	€€€€€€	€€€€€€
Plameno rezanje	Pogodni samo nelegirani, niskolegirani te niskougljični čelici do sastava 1.6 % ugljika	Prosječan stroj do 30 cm, jači strojevi do 100 cm	Sporo rezanje	Između $\pm 0,1$ mm i $\pm 0,3$ mm te u najgorim slučajevima čak do ± 3 mm; kvaliteta rezane površine je relativno loša, bolji strojevi imaju bolje rezultate no i dalje najgore među svim opisanim postupcima	€	€
Rezanje pilom za panele	Samo za mekše materijale poput MDF-a, šperploča, furnira, raznih plastika i mekših kompozita.	Oko 90 mm	Brzo rezanje	Kreće se oko $\pm 0,1$ mm; dobra kvaliteta rezanih rubova	€€	€€

4. ZAKLJUČAK

Specifikacije faktora svakog stroja vrijedi usporediti jedne s drugima te napraviti listu njihovih važnosti za potrebe proizvodnje koje se imaju na umu. Najpregledniji način za takvu strategiju odabira stroja je tablica. U tablici 2, tako se mogu vidjeti najbitniji faktori te prosječne specifikacije strojeva svakog od postupaka rezanja velikih pločastih materijala koji su bili opisani u ovom završnom radu.

Materijali koje je moguće rezati variraju zbog samih tehnologija rezanja, jedan od primjera toga je plazma rezanje koje se oslanja na svojstvo električne vodljivosti obratka za stvaranje luka što time limitira listu kompatibilnih materijala. Najversatilniji postupak glede materijala je rezanje vodenim mlazom dok je plameno rezanje najlimitiranije s mogućnosti rezanja samo čelika specifičnih sastava. Plamenim rezanjem se zato mogu rezati najdeblji materijali do čak 100 cm, no zbog limitiranih materijala bolji izbor bi u većini slučajeva bilo rezanje vodenim mlazom koje postiže debljine mekših materijala do 90 cm te tvrdih poput čelika do 30 cm. Najveće brzine rezanja ima plazma rezanje dok je najsporije plameno zbog male koncentracije toplinske energije u mjestu rezanja. Kod rezanja manjih izradaka plameno rezanje također ima najmanju točnost zbog toplinskog skupljanja izratka nakon hlađenja. Suprotno tome, kod većih izradaka plazma rezanje se može smatrati najnetočniji postupak. Rezanje laserom postižu se najveće točnosti dok se rezanjem routerom postižu najbolje kvalitete rezanih površina. Cijene strojeva i njihovog održavanja otprilike su proporcionalne. Najskuplji stroj za kupnju i održavanje je nedvojbeno onaj za rezanje vodenim mlazom. Moderne hipertlačne pumpe te mlaznice otporne na trošenje jedni su od razloga visoke cijene stroja dok su potrošni materijali poput vode i abraziva velik uzročnici rasta cijene održavanja. Zbog vrlo jednostavne konstrukcije te jeftinijih potrošnih materijala i dijelova, plameno rezanje zauzelo je titulu najjeftinijeg stroja za rezanje velikih pločastih materijala.

Kod odabira strojeva za izradu dijelova iz velikih pločastih materijala potrebno je pregledati sve opcije. Ima mnogo faktora koji mogu utjecati na odabir postupka rezanja pa tako i stroja. Krivi odabir stroja za vlastite potrebe proizvodnje može rezultirati u vrlo velikom financijskom udaru pa je zato bitno što detaljnije pregledati svaki od faktora prije finalne odluke.

LITERATURA

- [1] <https://www.vandf.co.uk/plant-list/laser-cutting-sheet-metal/> (pristup 04.08.2024.)
- [2] T. Staroveški, Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem, ak. god. 2023./2024.
- [3] <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/77771/47982718-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (pristup 05.08.2024.)
- [4] <https://www.axyz.com/plastic-fabrication-using-cnc-routers-part-three/> (pristup 05.08.2024.)
- [5] <https://sendcutsend.com/blog/cnc-routing/> (pristup 05.08.2024.)
- [6] <https://cncrouter.uk> (pristup 05.08.2024.)
- [7] <https://www.avidcnc.com/cnc-router-bit-set-p-427.html> (pristup 07.08.2024.)
- [8] https://www.speedtigertools.com/solution/ins.php?index_id=103 (pristup 07.08.2024.)
- [9] T. Staroveški, Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem, ak. god. 2023./2024.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter (pristup 07.08.2024.)
- [11] <https://www.techniwaterjet.com/waterjet-cutting-pressure/> (pristup 07.08.2024.)
- [12] <https://fandmmag.com/2015/04/understanding-the-impact-of-pressure-and-velocity-in-waterjet-cutting/> (pristup 08.08.2024.)
- [13] https://www.reddit.com/r/submechanophobia/comments/1aviaii/water_jet_table/ (pristup 14.08.2024.)
- [14] <https://phoenixcnc.in/product/aqua-impel-br-series/> (pristup 14.08.2024.)
- [15] <https://www.techniwaterjet.com/abrasive-vs-pure-water-jet-cutting/> (pristup 13.08.2024.)
- [16] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiS49Cm7ayIAxVnh_0HHbemFV0QFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS2212827118311934%2Fpdf%3Fmd5%3D52192479b5dc7c8556d817516062a6b3%26pid%3D1-s2.0-S2212827118311934-main.pdf&usq=AOvVaw2dIAT5kusVfv4BGZzgbDpk&opi=89978449 (pristup 13.08.2024.)
- [17] <https://www.techniwaterjet.com/how-thick-can-waterjet-cut/> (pristup 14.08.2024.)
- [18] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-Water-Jt-cutting-and-b-Abrasive-Water-Jet-cutting-cAbrasive_fig1_305318343 (pristup 13.08.2024.)

- [19] <https://www.laser-ing.hr/blog/sve-sto-morate-znati-o-rezanju-metala-plazmom/> (pristup 14.08.2024.)
- [20] <https://www.idacontrol.com/articles.php?nid=11> (pristup 21.08.2024.)
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_cutting (pristup 20.08.2024.)
- [22] https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezanje_plazmom (pristup 24.08.2024.)
- [23] <https://machitech.com/how-accurate-is-plasma-cutting/> (pristup 21.08.2024.)
- [24] <https://www.harsle.com/Automatic-Plasma-Robot-Cutting-System-pd47210460.html> (pristup 24.08.2024.)
- [25] <https://www.fadexim.com.tr/en-mg.html> (pristup 28.08.2024.)
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Different-bed-designs-used-in-laser-plasma-cutting-machines-to-support-sheet-metal-being_fig1_316440001 (pristup 22.08.2024.)
- [27] <https://www.cutting systems.com/information-center/resources/what-are-plasma-cutter-consumables> (pristup 21.08.2024.)
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cutting (pristup 25.08.2024.)
- [29] https://www.wlt.de/lim/Proceedings/Stick/PDF/Contribution175_final.pdf (pristup 25.08.2024.)
- [30] https://m.rebound-cnc.com/news/Industry_News/How_to_determine_CNC_fiber_laser_cutting_process_parameters.html (pristup 28.08.2024.)
- [31] <https://www.accurl.com/blog/laser-cutting/> (pristup 28.08.2024.)
- [32] <https://radoxgroup.com/en/laser/Fiber-Laser-cutting-CNC-machine-Open-type-Open-large-size> (pristup 28.08.2024.)
- [33] <https://baisonlaser.com/blog/choose-the-ideal-focusing-lens-for-laser-cutting/> (pristup 28.08.2024.)
- [34] <https://www.iqsdirectory.com/articles/laser/co2-lasers.html> (pristup 28.08.2024.)
- [35] <https://fractory.com/fibre-lasers-explained/> (pristup 28.08.2024.)
- [36] https://esab.com/au/apc_en/esab-university/blogs/what-is-flame-cutting-process-and-how-does-it-work/ (pristup 1.09.2024.)

- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Oxy-fuel_welding_and_cutting (pristup 3.09.2024.)
- [38] <https://microstep.com/en/Expert-know-how/Oxyfuel-cutting> (pristup 1.09.2024.)
- [39] <https://patricksteelltd.co.uk/news/2-x-new-rur-3500g-oxy-fuel-cutting-machines-installed> (pristup 3.09.2024.)
- [40] <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/flame-cutting> (pristup 3.09.2024.)
- [41] https://www.boconline.co.uk/en/images/Facts-about-acetylene_tcm410-262700.pdf (pristup 3.09.2024.)
- [42] <https://www.huahuacnc.com/advantages-of-cnc-panel-saw-over-manual-panel-saw/> (pristup 8.09.2024.)
- [43] <https://kdtmac.com.ua/en/formatno-raskroechnyj-tsentr-s-chpu-ks-832h> (pristup 8.09.2024.)
- [44] <https://www.ferwoodgroup.com/ww/machines/gruppi/ex-customer-site/sigma-prima-67/005517> (pristup 9.09.2024.)
- [45] <https://www.313mac.com/en/news/How-to-choose-a-saw-blade-for-a-panel-saw.html> (pristup 9.09.2024.)