

PROJEKTIRANJE LADICE ZA AUTOMATSKU IZMJENU MLAZNICA NA LASERU

PROJECTING LASER NOZZLE REPLACEMENT SYSTEM

Miroslav Duspara¹, Mislav Bošnjak¹, Marija Stoić¹, Antun Stoić¹

¹ Mechanical engineering faculty in Slavonski Brod

Key words: designing, laser nozzle replacement system

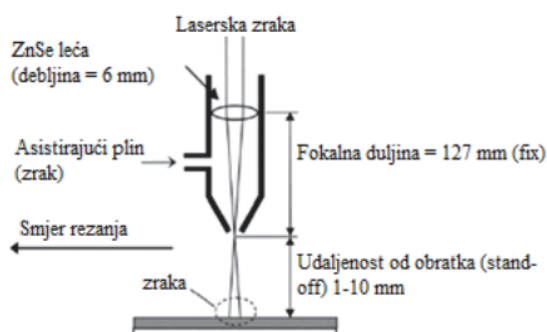
Ključne riječi: projektiranje, rezanje laserom, sustav zamjene mlaznica lasera

Sažetak: U radu je proveden proces projektiranja sustava za automatsku izmjenu mlaznica na laserskom stroju. Budući da jedan od trenutnih trendova u industriji obrade metala težnja za automatizacijom; implementacija navedenog sustava uvelike bi omogućila veću produktivnost strojeva koji se koriste laserom pri obradi. Kroz ovaj rad je prikazana i opća primjena laserskog rezanja metala u današnjici te njezine karakteristike prilikom korištenja različitih mlaznica. Teorijska analiza je pokazala mnoštvo prednosti koje su vezane na obradu laserskog rezanja te veliku perspektivu prilikom razvoja navedenih sustava u budućnosti. Procesom projektiranja je utvrđeno kako je za razvoj i proizvodnju sustava za automatsku izmjenu laserskih mlaznica; potreban mali broj jednostavnih komponenata koje su lako nabavljive na tržištu. Također, sustav je vrlo agilan u smislu izvedbi i moguće je prilagoditi sustav prema različitim izvedbama strojeva. Kroz razmatranje različitih mogućih izvedbi, zaključuje se da je moguć široki raspon različitih prijenosa momenta kroz sustav kako bi se omogućili željeni pomaci pri korištenju sustava. Pozicija kućišta mlaznica je također vrlo lako prilagodljiva.

Abstract: The paper deals with the process of designing a system for automatic nozzle exchange on a laser machine. Whereas one of the current trends in the metalworking industry is the pursuit of automation; the implementation of said system would greatly enable higher productivity of machines used by laser in machining. This paper also presents the general application of laser metal cutting in today and its characteristics when using different nozzles. Theoretical analysis has shown many advantages related to the processing of laser cutting and a great perspective in the development of these systems in the future. The design process has determined how to develop and manufacture a system for automatic laser nozzle replacement; requires a small number of simple components that are easily available on the market. Also, the system is very agile in terms of performance and it is possible to adapt the system to different machine designs. Through consideration of different possible embodiments, it is concluded that a wide range of different torque transmissions through the system is possible to allow the desired shifts in the use of the system. The position of the nozzle housing is also very easily adjustable.

1 SVRHA I KARAKTERISTIKE MLAZNICA PRI LASERSKOM REZANJU

Mlaznica u smislu komponente je zadnja komponenta postrojenja na laserskim rezačima kroz koju laserska zraka prolazi prije dodira obratka i vršenja obrade. Glavna zadaća mlaznice jest precizno usmjeriti lasersku zraku koja se emitira kroz sustav leća do obratka. Uz navedeno, mlaznica štiti leću od nepoželjnog utjecaja prašine na leću. Mlaznice variraju u mnoštvu parametara koji ovise o proizvođaču, a najčešći dimenzijski parametri su veličina izlaznog promjeka kroz koji struji laserska zraka, duljina kanala mlaznice i sustav, različiti dodaci u obliku nastavaka na standardne mlaznice koji dodatno uvjetuju geometriju izlaznog dijela mlaznice itd.

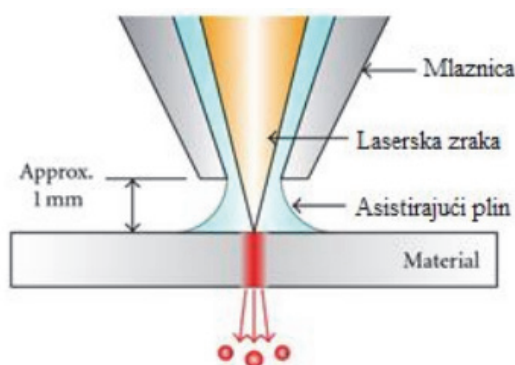


Slika 1. Prikaz karakterističnih udaljenosti i njihovog nazivlja prilikom rezanja laserom [1]

Kroz mlaznicu također i struji plin pod tlakom-ovisno o vrsti i namjeni obrade. Zadaća asistirajućeg plina jest višestruka i ovisi o vrsti plina koju koristimo. Primjerice, zadaće plinova mogu biti od štíćenja izlaznog segmenta mlaznice od ulaska sitnih čestica prašine, dima i komadića obratka; sve do utjecaja na reakcije u dodiru laserske zrake i obratka. Nadalje, posljedica korištenja komprimiranog zraka na izlazu iz mlaznice je i kontrola difuzije plina na područje u okolici zasjeka pri obradi čime se uvelike utječe na kvalitetu reza. Najčešće vrste plinova u upotrebi pri laserskom rezanju su:

- Reaktivni plinovi koji ubrzavaju proces rezanja-egzotermne reakcije.
- Plinovi koji uklanjaju okside i ne reagiraju sa rastaljenim metalom.

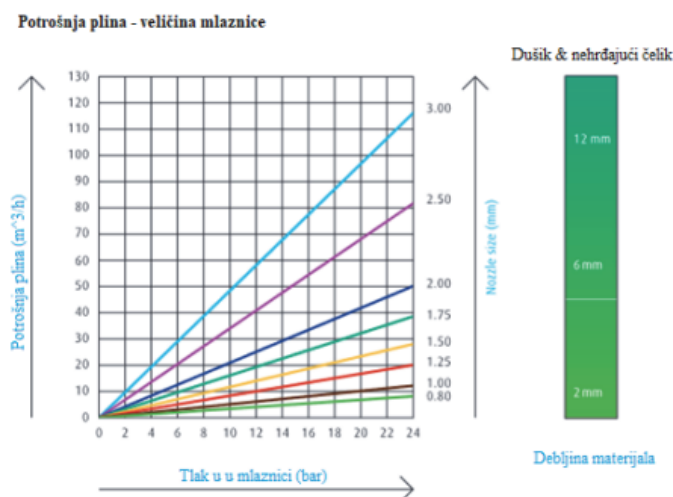
Kao primjer prve skupine (reaktivni plinovi) može se navesti kisik kao česti asistirajući plin u procesima laserskog rezanja. Kisik egzotermno reagira sa rastaljenim metalom u točki dodira i prenosi toplinu u okolno područje metala koji se obrađuje. Time se proizvodi veća toplinu u neposrednoj blizini obrade što uzrokuje brži proces rezanja. Kao negativna strana korištenja kisika prilikom rezanja laserom može se navesti potencijalno oštećenje rubova pri rezu zbog oksidacije. Nadalje, pri težnji uklanjanja oksida iz neposredne blizine obrade često se kao asistirajući plin koristi dušik. Dušik ne reagira sa rastaljenim metalom u točki dodira na visokoj temperaturi i time osigurava kvalitetniju geometriju rubova nakon rezanja



Slika 2. Izlazni dio mlaznice prilikom obrade rezanja [2]

2 KRITERIJI ODABIRA ADEKVATNE MLAZNICE I KONSTRUKCIJSKE KARAKTERISTIKE

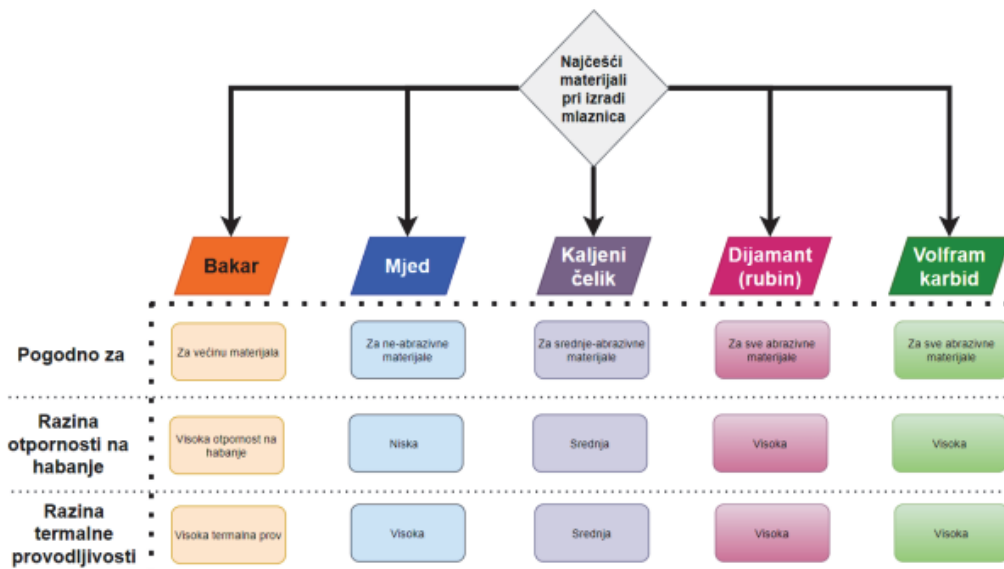
Debljina stijenke materijala koji obrađujemo uvelike utječe na odabir dimenzija i geometrijskih karakteristika mlaznice. Kao što je već i spomenuto, utjecaj asistirajućeg zraka uvelike utječe na kvalitetu reza i pri tome je vrlo bitno odabrati adekvatnu geometriju izlaznog promjera na mlaznici. Primjerice, prema iskustvenim podacima (www.xtlaser.com), ukoliko je potrebno rezati lim tanji od 3 mm, preporuka je koristiti mlaznicu sa promjerom od 1 mm. Nadalje, kod rezanja lima debljeg od 3 mm – preporuča se koristiti mlaznicu sa izlaznim promjerom od 1,5 mm. Prilikom rezanja debljih metalnih materijala, preporuča se koristiti mlaznicu promjera minimalno 2 mm ili više.[4-8]



Slika 3 Usporedba utjecaja debljine obratka na odabir fizikalnih parametara mlaznice-Linde Gas Technology [3]

Kvalitetno odabran materijal mlaznice je esencijalan kako bi se omogućila dugotrajna produktivnost pri korištenju mlaznice. Glavna svojstva koja se zahtijevaju prilikom odabira materijala za mlaznicu su [15, 16]:

- visoka termalna provodljivost - preferabilno bakar nasuprot mjestu
- niski koeficijent trenja
- otpornost na trošenje



Slika 4. Prikaz korištenja materijala i njihovih prioritarnih svojstava prilikom razvoja mlaznica [9]

Jedan od temeljnih zahtjeva za kvalitetno izrađenu mlaznicu jest geometrijska tolerancija koncentričnosti izlaznog promjera mlaznice kroz koji laserska zraka prolazi do obratka. Prema nekim izvorima (XTlaser), ova tolerancija za većinu mlaznica mora iznositi 0,03 mm. Kod mlaznica sa izlaznim promjerom manjim od 1 mm, tolerancija koncentričnosti izlaznog promjera bi trebala iznositi 0,02 mm. Razlozi strogih tolerancija na izlaznu geometriju mlaznica su:

- Izbjegavanje oštećenja laserske glave prilikom dodira visoko-energetskih laserskih zraka u unutrašnju stijenku mlaznice (u slučaju odstupanja osi laserske zrake i mlaznice).
- Mogućnost otklanjanja različitih potencijalnih geometrijskih smetnji i grešaka prilikom obrade.
- Velika produktivnost sa obzirom na dulji period trajanja-ukoliko mlaznica nema.

oštećenja od strane laserskih zraka, vrlo usporen proces trošenja izlaznog dijela mlaznice-dulji vijek trajanja

Cilj kvalitetne površine mlaznice se direktno povezuje sa težnjom smanjenja adhezije (prijanjanja) rastopljenog materijala. Navedeni fenomen se može dogoditi ukoliko je udaljenost mlaznice i obratka vrlo mala. Kako bi se on uspješno spriječio, potrebna je glatka površina i antioksidacijski tretman materijala prilikom izrade kako bi se reakcija u dodiru sa rastaljenim materijalom spriječila. Time uvelike utječemo i na vijek trajanja mlaznice.

Kvalitetni i precizni rez ostvaruje se kombinacijom pravilno postavljenih parametara te odabirom adekvatne mlaznice za određenu vrstu obrade. Prema geometrijskim karakteristikama, najčešća je podjela prema gabaritnim dimenzijama i geometriji izlaznog kanala mlaznice. Kao validni primjer, mogu se spomenuti vrste mlaznica (TroTec): [10-12]

- Kratka mlaznica sa velikim izlaznim promjerom.
- Kratka mlaznica sa malim izlaznim promjerom.
- Duga mlaznica sa malim izlaznim promjerom.
- Mlaznice sa različitim nastavcima (za standardne izlazne promjere).

Jedan od vrlo bitnih faktora za proces obrade je udaljenost mlaznice od obratka koja se namještaja na upravljačkoj jedinici prije početka procesa obrade. Udaljenost od obratka uvelike utječe na kvalitetu reza. Točnije, manja udaljenost između vrha mlaznice i obratka ima za posljedicu kvalitetniji rez. Najmanja udaljenost vrha mlaznice i obratka koja se može iskoristiti pri rezanju se aproksimira na 0,635 mm. Mala udaljenost također uvjetuje i sigurniji rez i manje odstupanje laserske zrake od njezine inicijalne putanje na izlazu iz mlaznice u slučaju pomaka osi lasera.

3 UTJECAJ KONKRETNIH KONSTRUKCIJSKIH VARIJACIJA NA RAD, ISPRAVCI POTENCIJALNIH GREŠAKA U OBRADI

3.1 Prisutni odmak osi/središta mlaznice i lasera

Prilikom pomaknutih osi/centara središta mlaznica i laserskih zraka, postoji opasnost od loše raspodjele nasturjavanja plina po obratku prilikom operacija rezanja. Time se uzrokuje nejednoliko korištenje plina prema njegovoj namjeni (ovisno o vrsti plina). Primjerice, prisutna je opasnost od lokalnog zagrijavanja sa jedne strane zasjeka i slabijeg stupnja zagrijavanja nasuprotne strane zasjeka. Što je veći iznos debljine stijenke rezanog lima, ova je opasnost veća budući da sa debljinom lima raste i izražaj neadekvatnog centriranja osi mlaznice i laserskih zraka. Nadalje, pri operaciji bušenja/perforiranja debljih metalnih stijenki materijala, postoji opasnost od prevelikog lokalnog zagrijavanja koje bi uzrokovalo ekstenzivno natapanje i pretaljivanje stijenke rastaljenim metalom na određenom segmentu obrade. U konačnici, ukoliko je prisutan problem razilaženja osi/centara osi laserskih zraka i mlaznice laser, može se očekivati i loš utjecaj na kvalitetu oštih bridova nakon rezanja. Točnije, vrlo vjerojatno je za očekivati lokalno pretaljivanje stijenke materijala, pogotovo prilikom obrade oštih i malih rubova. Kod debljih metalnih stijenki, moguće je očekivati i nemogućnost pravilnog rezanja [13].

3.2 Utjecaj korištenja različitih izlaznih promjera mlaznice

Neki od standardnih izlaznih promjera mlaznica su 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm itd. Mlaznica sa izlaznim promjerom od 1,5 mm je pogodna za lim od 3 mm. Ukoliko pri obradi lima od 3 mm iskoristimo izlazni promjer mlaznice od 2 mm, moguće je očekivati deblju površinu reza i zaszeka zajedno sa većim udjelom rastopljenih rubova. Za limove debljine veće od 3 mm potrebna je veća snaga rezanja i za očekivati je duži proces raspodjele i disipacije unošene topline u okolinu zaszeka. Pri tome, zbog veće snage rezanja, brzina rezanja se relativno povećava. Ukoliko se za lim debljine 3 mm koristi mali izlazni promjer mlaznice od 1,5 mm, područje raspršenja plina je vrlo malo i potrebno je obratiti pažnju prilikom dugotrajnog rezanja na kvalitetu reza. Sa druge pak strane, ukoliko za lim debljine 3mm koristimo izlazni promjer mlaznice od 2 mm, povećava se područje raspršenja asistiraćeg plina. Pri tome, budući da povećavamo izlazni presjek mlaznice, za očekivati je sporije nastrojavanje na zaszek budući da je tlak izlazne struje plina malo veći od onog pri promjeru od 1,5 mm. Sporije nastrojavanje uzrokuje i veću stabilnost pri rezanju lima od 3 mm te se za velike serije preporuča 2 mm iako promjer od 1,5 mm može također biti korišten uz obraćanje pažnje na kvalitetu reza i stabilnost operacija. U konačnici, izlazni promjer mlaznice od 2,5 mm je prihvatljiv za metalne ploče većih debljina (> 10 mm). Naposljetku, različiti izlazni promjeri mlaznice uvelike utječu na sljedeće karakteristike pri obradi laserskog rezanja:

- Kvaliteta rezanja i širina zaszeka.
- Profil i fizikalne karakteristike nastrojavanja asistiraćeg plina (brzina, tlak).
- Veličinu područja raspršenja asistiraćeg plina.
- Brzinu uklanjanja odvojenih čestica, dima i prašine.

3.2 Mogući problemi prilikom pojave rezova lošije kvalitete

Ukoliko se nakon analiziranja reza primijeti loša kvaliteta reza, problematična orijentacija reznih linija i kosi kutevi reza (taper), ostaci rastaljenog metala sa donje strane ploče i slične karakteristike loše obrade laserskog rezanja, potrebno je analizirati izvor problema. Prema LindeGas Technology, popis najčešćih problema koji mogu uzrokovati probleme pri laserskom rezanju su:

Tablica 1. Potencijalni uzroci rezova loših kvaliteta i aproksimativno vrijeme ispravljanja pojedinog problema na stroju [14]

| Stavka za provjeru/analizu/ispravak/podešavanje | Aproksimativno vrijeme popravka (min) - t_p |
|---|---|
| Onečišćenje leće | 1-2 |
| Neadekvatni iznos snage lasera, rezolucija impulsa i frekvencija lasera | 1-5 |
| Neadekvatna brzina rezanja | 1-2 |
| Neadekvatno odabrani asistiraćuci plin | 1-2 |
| Neispravno pozicioniranje/centriranje mlaznice | 1-2 |
| Kriva vrsta mlaznice, krivo postavljanje mlaznice loši uvjeti postavljanja i rada korištene mlaznice | 1-10 |
| Podudaranje parametara rezanja za obrađivani materijal | 1-5 |
| Kriva vrste leće / način postavljanja / radni uvjeti | 10-20 |
| Stanje i namještena pozicija leće/ogledalca za odbijanje i preusmjeravanje laserske zrake kroz mlaznicu | 5-60 po jednoj leći/ogledalcu |
| Polarizacija lasera i uvjeti rada lasera (distribucija energije u laserskoj zruci = mod lasera) | 20-40 |

4 PROJEKTIRANJE LADICE ZA AUTOMATSKU IZMJENU MLAZNICA NA LASERU

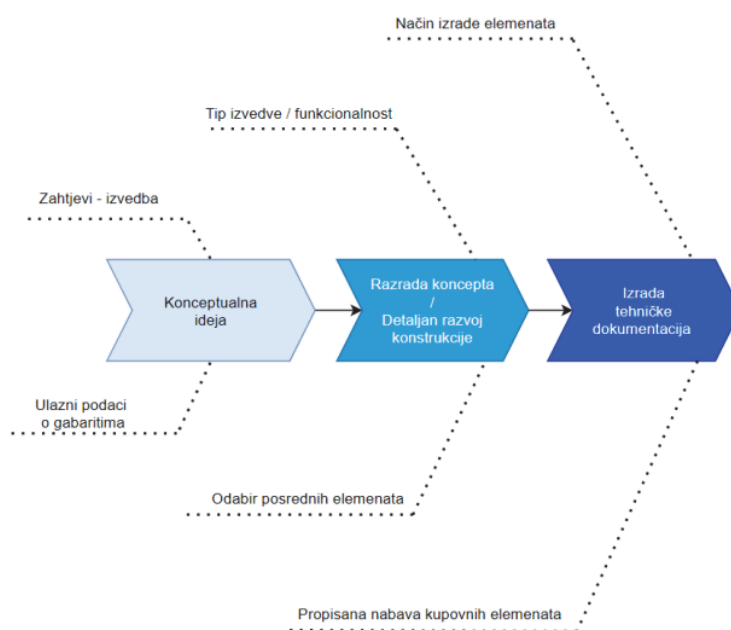
Manualno mijenjanje mlaznica se u pravilu ne smatra kao dugotrajan proces. Međutim u slučaju učestale potrebe zamjene mlaznica, javlja se problem snižene produktivnosti pri obradi više serija procesa na različitim materijalima, debljinama obradaka i potrebnim postavkama rezanja pri manualnom klasičnom mijenjanju mlaznica za koje bi bio potreban zaposlenik. Kako bi se maksimizirala produktivnost i povećala točnost pri zamjeni mlaznica, proces koji je u pravilu konzistentan u svom izvođenju – može se automatizirati. Također, industrijski trendovi ukazuju na veliku potrebu za automatiziranim sustavima pri procesima koji su učestali po svom načinu izvođenja. Upravo iz navedenih razloga, konstrukcija sustava za automatsku izmjenu mlaznica na laserskom stroju je jedan od prioriteta razvoja sustava. Također, jedna od bitnih karakteristika određenih sustava u današnjici je mogućnost izmjene mlaznica adekvatno prema debljini i vrsti materijala koja se unosi u radno područje stroja. Glavna obilježja koji se ostvareni sa implementacijom sustava za automatsku izmjenu laserskih mlaznica u odnosu na sustav bez automatske izmjene su: [15]

- povećana produktivnost stroja,
- efikasnost i točnost montiranja mlaznice na obradnu glavu,
- povećana autonomija sustava,
- minimizirano opterećenje na radnu snagu pri izvedbi operacija na stroju,
- minimizirana mogućnost ne-adekvatne montaže koja utječe na kvalitetu obrade.



Slika 5. Primjer automatske izmjene mlaznica na laserskom stroju – TRUMPF

4.1 Tok razvojne faze



Slika 6. Tok razvojne faze

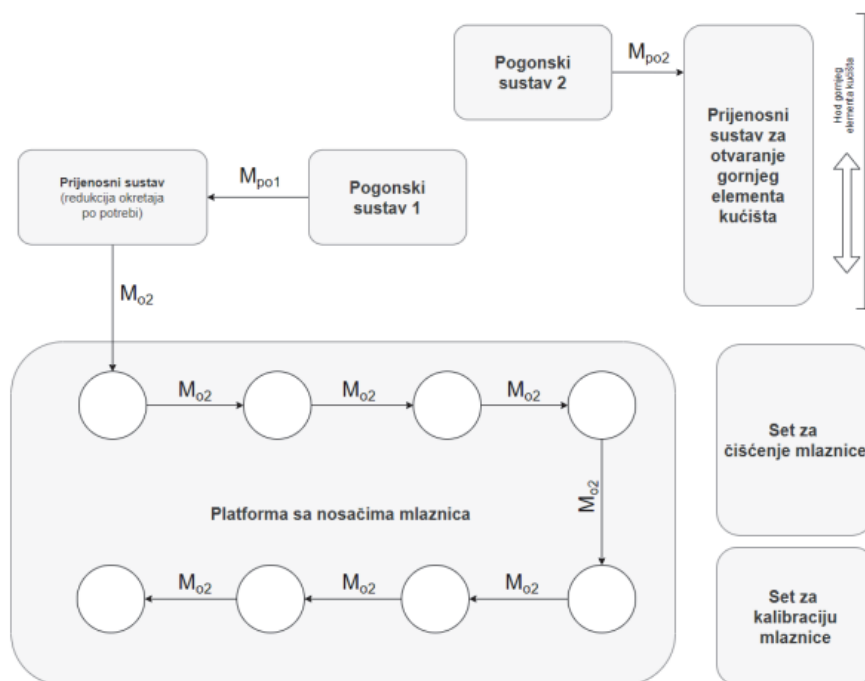
Razvoj sustava za automatsko izmjenjivanje mlaznica na laserskom stroju bio je podijeljen u 3 globalne faze:

- Konceptualna faza – razrada ideje i stvaranje ulaznih zahtjeva za konstrukciju.

- Detaljni razvoj konstrukcije-detaljna konstrukcija, razrađeni spojevi elemenata sa tokom i prijenosom energije u sustavu.
- Izrada tehničke dokumentacije-izrada nacрта, popisivanje konačnih karakteristika (masa, aproksimirani troškovi prema trenutnim tečajevima), egzaktno propisivanje načina izrade elemenata.

4.2 Obilježja i funkcionalnost sklopa

Konstruirani sklop je inicijalno isplaniran za 10 slobodnih prihvata za različite mlaznice. Time bi se osigurao dovoljan broj mlaznica za širok spektar zahtijevanih parametara pri obradi različitih materijala, odnosno debljina obradaka.



Slika 7. Vizualni prikaz smještaja elemenata sklopa [16]

Kako bi se shema prikaza elemenata sklopa detaljnije objasnila, bitno je detaljno razraditi funkciju i ideju koncepta. Prilikom potrebe mijenjanja mlaznice, ladica za automatsku izmjenu se otvara. Navedeni se pokret ostvaruje preko linearnog pomaka na vodilici instaliranoj uz bok (prijenosni sustav za otvaranje gornjeg elementa kućišta). Pogonski sustav 2, odnosno elektromotor kreira okretni moment (M_{po2}) koji preko prijenosnog sustava rezultira otvaranjem gornjeg elementa kućišta ladice. Na vodilici je sadržan element koji je direktno vezan na gornji poklopac ladice i time se ostvaruje pomak poklopca ladice u željenom smjeru. Nadalje, pogonski sustav 1 predstavlja elektromotor koji proizvodi okretni moment (M_{po1}) koji se dostavlja na prijenosni sustav. U prijenosnom se sustavu reduciraju brojevi okretaja u odnosu na inicijalno kreirani moment budući da rotacija nosača mlaznica ne zahtijeva velike brojeve okretaja. Navedeno se može opravdati budući da je duljina navoja na mlaznici relativno mala. Nakon izmjene mlaznice, glava alata sa novo-instaliranom mlaznicom prolazi prvo višestruko-translatornim gibanjima preko seta za čišćenje mlaznica kako bi se eventualna onečišćenja na vrhu mlaznice otklonila (detaljnije razloge čišćenja pogledati u 1. cjelini).



Slika 8. Interijer konstruirane geometrije sustava

Zatim se glava sa mlaznicom postavlja u položaj netom iznad seta za kalibraciju mlaznice na kojem se vrši ispitivanje točnosti visine mlaznice prema postavkama na upravljačkoj jedinici. Preko sile privlačenja (set za kalibraciju je čvrsto uzemljen, mlaznica glave sadržava elektrone) i primijenjenog napona, može se očitati udaljenost na senzoru budući da protok elektrona na mlaznici se može mjeriti povećanjem sile privlačenja; koja se povećava smanjivanjem udaljenosti između glave mlaznice i seta za kalibraciju. Najčešće udaljenosti između navedenih elemenata variraju 0,5 mm do 1,5 mm i time također simuliraju i realan scenariji pri rezu budući da su navedeni iznosi prisutni i prilikom rezanja. U konačnici, ukoliko su svi stupnjevi pri zamjeni mlaznice prošli adekvatno, glava alata sa mlaznicom se može početi koristiti u obradi. Sve navedene radnje u pravilu traju kratko (nekoliko sekundi) i time se dokazuje ranije navedena prednost povećanja produktivnosti i automatiziranosti procesa izmjene mlaznica.



Slika 9. Prikaz konstruiranog sustava-fokus na raspored kućišta mlaznica

5 ZAKLJUČAK

Konstrukcija i pružanje mogućeg rješenja oko ideje automatske izmjene mlaznica lasera pri obradi laserskog rezanja -bila je glavna poanta ovog rada. U današnjici, obrada laserskim rezanjem pruža jedinstvenu vrstu obrade metala i ostalih materijala različitih dimenzija. Preciznost obrade, visoka fleksibilnost i brzina obrade kao jedne od glavne prednosti korištenja laserskog rezanja; u kombinaciji sa visokim stupnjem automatizacije postrojenja – mogu rezultirati kao platforma sa visokim stupnjem proizvodljivosti. Okruženje u kojem se primjenjuje masovna proizvodnja određenih proizvoda je vrlo kompatibilno u slučaju gdje bi se primjenjivao visok stupanj automatizacije procesa; čime bi sustav za automatsku izmjenu mlaznica imao veliku ulogu. Sustav je vrlo fleksibilan u smislu izvedbe budući da se uz vrlo malo razvojnog opterećenja može prilagoditi izvedba drugačijem okruženju i raspoloživim dimenzijama. Time se uočava veliki potencijal za postrojenja laserskih rezača u rasponu od pojedinačne proizvodnje do masovne. Točnije, usprkos tome što je za sustav koji je konstruiran u sklopu ovog završnog rada prema ulaznim podacima u sklopu kojih je odabrana raspoloživost od 8 mlaznica, mogućnost smanjivanja ili povećavanja broja raspoloživih kućišta mlaznica je apsolutno prihvatljiva i jednostavna u slučaju potrebe. Prema tome, ideja razvoja sustava za automatsku izmjenu mlaznica je od početka bila sa naglaskom na agilnost i prilagodljivost različitim obradnim sustavima prema potrebi ili želji pojedinaca. Prema Mazak Optonics Corp. [18], u top 5 trendova vezanih na obradu laserskim rezanjem; smjestila se i automatizacija sustava sa povećanom fleksibilnošću i kapacitetom mogućnosti. Sukladno tome, projektiranje sklopova kao što je sustav za automatsku izmjenu laserskih mlaznica definitivno se može smatrati kao korak u pravom smjeru prema budućnosti u navedenoj obradnoj skupini.

6 LITERATURA

- [1] „Laser Cutting“, <https://www.iqsdirectory.com/articles/laser-cutting-service/lasercutting.html>, (2021-02-05)
- [2] „Laser metal cutting – Key advantages and characteristics“, <https://www.lasering.com/blog/laser-metal-cutting-key-advantages>, (2021-02-05)
- [3] „Laser cutting“, https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cutting, (2021-02-06)
- [4] SSC Laser, „What is Laser Cutting?“, <https://www.ssclaser.co.uk/quick-guide-to-lasercutting/>, (2021-02-10)
- [5] „Laser Cutter Air Assist for Beginners“, <https://makerfreedom.com/air-assist-forbeginners-laser-cutting/>, (2021-03-15)
- [6] MachineMFG, „13 Components of the Laser Cutter“, <https://www.machinemfg.com/laser-cutter-components/>, (2021-03-10)
- [7] „Three key factors for good quality laser cutting“, <https://www.laser-ing.com/blog/threekey-factors-for-good-quality-laser-cutting>, (2021-03-09)
- [8] „Što znače parametri lasera?“, <https://www.troteclaser.com/hr/baza-znanja/savjeti-zakorisnike-lasera/definicija-laserskih-parametara/>, (2021-03-13)

- [9] Ahmadi B, Torkamany MJ, Jaleh B, Sabaghzadeh J. „Theoretical comparison of oxygen assisted cutting by CO₂ and Yb: YAG fiber lasers.“ Chinese journal of physics. 2009 Aug 1;47(4):465-75, (2021-03-15)
- [10] Hitoshi Ozaki, Yosuke Koike, Hiroshi Kawakami, Jippe Suzuki, „Cutting Properties of Austenitic Stainless Steel by Using Laser Cutting Process without Assist Gas“, <https://www.hindawi.com/journals/aot/2012/234321/>, (2012-10-02)
- [11] Mahrle A, Beyer E. “Theoretical estimation of achievable travel rates in inert-gas fusion cutting with fibre and CO₂ lasers.” In Proc. Of the Fifth Int. WLT-Conf. on Lasers in Manufacturing, LIM 2009 Jun (Vol. 215, p. 220), (2021-03-15)
- [12] MachineMFG, „Laser Cutting Thickness & Speed Chart“, <https://www.machinemfg.com/laser-cutting-thickness-speed-chart/>, (2021-04-23)
- [13] G.E. Mathis Company, „Laser Types & Configurations for Cutting Sheet and Plate Metal“, <https://www.gemathis.com/laser-types-configurations/>, (2021-04-12)
- [14] Linde-gas, „Laser cutting.“, https://www.lindegas.com/en/images/Laser%20cutting%20advice_tcm17-5323.pdf, (2021-04-13)
- [15] XT Laser, „How to choose the nozzle of fiber laser cutting machine?“, <https://www.xtlaser.com/25250-2/>, (2019-12-04) 31
- [16] 3Dmaker engineering, „3D Printer Nozzle Guide“, <https://www.3dmakerengineering.com/blogs/3d-printing/3d-printer-nozzle-guide>, (2021-04-15)