

Podvodno rezanje laserom

Milenković, Neven

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:411377>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-08**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

NEVEN MILENKOVIĆ

PODVODNO REZANJE LASEROM

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

PODVODNO REZANJE LASEROM
UNDERWATER LASER CUTTING

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Robotika

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Jasmin Čelić

Student: Neven Milenković

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065432

Rijeka, rujan 2022.

Student: Neven Milenković

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065432

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom: Podvodno rezanje laserima izradio samostalno pod mentorstvom: Izv. prof. dr. sc. Jasmina Čelića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Neven Milenković

Student: Neven Milenković

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112065432

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor



SAŽETAK

Podizanjem standarda kvalitete infrastrukture zahvaćene su mnogobrojne industrije. Pomorska, naftna te industrija koja se bavi nuklearnom energijom jedne su od mnogih. Stanje i održavanje pomorskih objekata i prijevoznih sredstava ključno je za daljnji razvoj industrije. U svrhu ispunjenja industrijskih, ekoloških i ekonomskih zahtjeva, brojne tehnike su razvijene kako bi se postigao najučinkovitiji oblik održavanja. U ovome radu cilj je analizirati tehnike podvodnog laserskog rezanja kao jedne od tehnika koja je posljednjih godina doživjela veliki razvoj. U radu se prikazuju dijelovi lasera, procesi rezanja te rezultati koji prikazuju potencijalnu učinkovitost i primjenu u održavanju.

Ključne riječi: infrastruktura, održavanje, podvodno lasersko rezanje, procesi rezanja, učinkovitost

SUMMARY

Many industries have been affected with the rising standards of the infrastructure quality. Maritime, oil and nuclear industries being one of many. Maintenance as well as the state of maritime objects and vehicles are key for further development of the industries. Numerous techniques are being developed for the purpose of maximizing the efficiency of maintenance. The goal in this paper is to analyze techniques of underwater laser cutting as a technique that has experienced great development. Parts of the laser, cutting processes and results that show potential efficiency and implementation in maintenance, are presented in this paper.

Keywords: infrastructure, maintenance, underwater laser cutting, cutting processes, efficiency

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	II
SUMMARY.....	II
SADRŽAJ.....	III
1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	1
1.4. ZNANSTVENE METODE	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	2
2. LASERI	3
2.1. PRINCIP RADA LASERA	3
2.2. DIJELOVI LASERA.....	5
2.2.1. Laserska pumpa	5
2.2.2. Laserski medij.....	6
2.2.3. Rezonator	7
2.3. VRSTE LASERA	8
2.3.1. Laseri krutog stanja	8
2.3.2. Plinski laseri	10
2.3.3. Tekući laseri.....	12
2.2.4. Poluvodički laseri	12
2.2.5. Pulsni laseri	13
2.2.6. Kontinuirani laseri.....	14
2.4. NAČIN POBUDE LASERA	14
2.4.1. Kemijska reakcija.....	14
2.4.2. Optičko sredstvo.....	14
2.4.3. Sudari elektrona i atoma u plinskom izboju	15
2.5. PRIMJENA LASERA	15
2.5.1. Medicina	15
2.5.2. Holografija.....	16
2.5.3. Mjerenje i modeliranje.....	16

2.5.4. Vojna industrija	17
2.5.5. Ostale primjene	18
3. ANALIZA TEHNIKA PODVODNOG REZANJA LASERIMA	20
3.1. PROCESI REZANJA	21
3.2.1. Rezanje procesom isparavanja	21
3.2.2. Rezanje procesom topljenja i ispuhivanja	21
3.2.3. Rezanje procesom toplinskog pucanja	21
3.2.4. Rezanje putem odvajanja tankih pločica	21
3.2.5. Reaktivno rezanje	22
3.2. PODVODNO LASERSKO REZANJE ČELIKA DEBLJINE DO 100 mm ZA DEKOMISIJU NUKLEARNIH POSTROJENJA	22
3.2.1. Prednosti i nedostaci podvodnog laserskog rezanja	23
3.2.2. Vrste lasera za podvodno lasersko rezanje	23
3.2.3. Mehanizam rezanja	25
3.2.5. Rezanje jednom mlaznicom	28
3.2.6. Rezanje dvostrukom mlaznicom	31
3.3. INICIJALNO KUTNO PODVODNO LASERSKO REZANJE	35
3.3.1. Dizajn i procedura rezanja	36
3.3.2. Rezanje pod kutem od 5°	38
3.3.3. Rezanje pod kutem od 15°	39
3.3.4. Rezanje uzoraka ugljičnog čelika	42
4. PROCES PODVODNOG LASERSKOG REZANJA POTPOMOGNUTOG VODENIM MLAZOM	44
4.1. PRINCIP RADA	44
4.2. PROCEDURA TESTIRANJA	46
4.3. REZULTATI TESTIRANJA	47
4.3.1. Brzine rezanja	48
4.3.2. Širina reza	50
4.3.3. Nedostaci primjene vodenog mlaza	52
5. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA	56
KAZALO KRATICA	58
POPIS TABLICA	59

POPIS SLIKA.....	60
-------------------------	-----------

1. UVOD

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Kvaliteta i stanje pomorskih objekata i vozila bitan je faktor u održavanju visokih standarda u pomorskoj industriji. Smanjenje troškova održavanja i kontrole kvalitete pri istovremenom zadržavanju tehničkih, ekonomskih i ekoloških uvjeta pomorskih objekata postavljenih od strane nadležnih tijela glavno je pitanje brodovlasnika. Tehnike poput podvodnog laserskog rezanja i podvodnog zavarivanja, inovacijama postigle su određenu razinu razvoja te je stoga omogućena njihova upotreba pri kontroli, sanacijama plovila i objekata.

Sam naslov rada pod nazivom Podvodno rezanje laserom očituje problem istraživanja rada. Zahtjevnost, tehnike rada, problematika rezanja laserima i zavarivanja pod vodom te materijal koji se zavaruje sa pripadajućim svojstvima predstavljaju problematiku istraživanja rada. Iz prethodno navedenog proizlazi predmet istraživanja rada odnosno prikupljanje i analiziranje te zatim spajanje kvantitativnih i kvalitativnih podataka vezanih za navedeni problem u svrhu dolaženja do zaključka o učinkovitosti podvodnog zavarivanja i podvodnog rezanja laserima. Stoga objekt istraživanja predstavlja implementacija tehnika podvodnog zavarivanja i rezanja laserima u pomorskoj industriji.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Sustavnim proučavanjem tehnika rada te inovacija u granama vezanim za podvodne aktivnosti koje se bave sanacijama i održavanjem plovila i objekata moguće je predložiti radnu hipotezu: Može li podvodno zavarivanje i lasersko rezanje pod vodom imati značajan utjecaj u pomorskoj industriji i šire.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha rada je istražiti razinu učinkovitosti podvodnog zavarivanja i rezanja laserima u svrhu sanacija i održavanja. Cilj rada je pružanje uvida u principe i tehnike rada te prikaz mogućnosti za daljnju implementaciju tehnika u široj industriji. Ovim radom pružiti će se odgovor na pitanja: što je podvodno zavarivanje i lasersko rezanje pod vodom, koje su pogodnosti korištenja tih tehnika održavanja, u čemu se očituju problemi pri samom

izvođenju radova, uvjeti koji se moraju zadovoljiti kako bi se uspješno izvršilo zavarivanje i rezanje te u kojem smjeru se grana može dalje razvijati.

1.4. ZNANSTVENE METODE

U svrhu istraživanja, oblikovanja i predstavljanja rezultata istraživanja korištene su naredne znanstvene metode: metode analize i sinteze, metode dedukcije i indukcije, povijesne metode, statističke metode, komparativne metode i metode deskripcije.

1.5. STRUKTURA RADA

Diplomski rad sadržajno se sastoji od 5 dijelova odnosno poglavlja sa pripadajućim potpoglavljima.

Prvi dio rada, Uvod, navodi problem, predmet i objekt istraživanja, radnu hipotezu, svrhu i ciljeve istraživanja, znanstvene metode i strukturu rada.

Drugi dio rada, Laseri, opisuje karakteristike i dijelove lasera te se vrši podjela lasera na način rada, vrste lasera, način pobude i primjenu lasera.

Treći dio odnosno poglavlje, Analiza tehnika podvodnog rezanja laserima, predstavlja tehnike koje se koriste pri eksperimentalnom podvodnom rezanju, dijelove podvodnog lasera te princip rada sa jednom mlaznicom, dvostrukom mlaznicom i rezultate.

Četvrti dio, Proces podvodnog laserskog rezanja potpomognutog vodenim mlazom, analizira prethodno navedeni uređaj i njegove rezultate rezanja obavljene na uzorcima.

Posljednji dio, Zaključak, nudi sintezu rada kao rezultat istraživanja.

2. LASERI

Uređaj koji pojačava svjetlost putem stimulirane emisije zračenja naziva se laser (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) [1]. Svjetlost koju daje laser ima samo jednu boju tj. jednu valnu duljinu te je stoga nazivamo monokromatskom. Nikola Tesla 1893. godine sastavio je uređaj koji je sadržavao rubin prema kojemu je bila usmjerena električna energija te se ona reflektirala od električne plohe natrag u rubin. Takvim postupkom dobivena je tanka svjetlosna zraka te se smatra da je time dobiven laserski snop svjetlosti.

Albert Einstein induciranu stimuliranu emisiju predviđa 1917. godine u svojem radu pod nazivom „O kvantnoj mehanici zračenja“ gdje iznosi teoriju o potencijalu induciranog zračenja te samim time predviđa izum lasera, a Theodore Harold Maiman 1960-te godine je konstruirao prvi laser čija je aktivna tvar bio kristal rubina stimuliran bijelom svjetlošću [2].

2.1. PRINCIP RADA LASERA

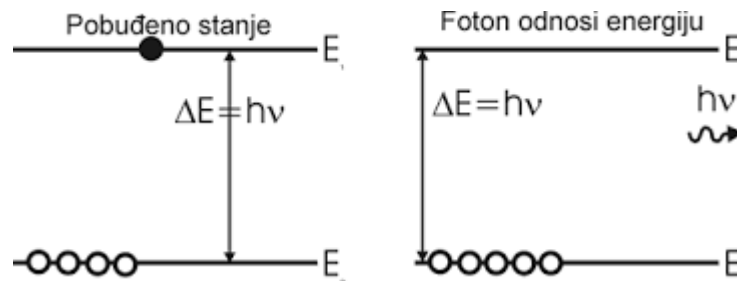
Za vrijeme svog rada laser emitira posebnu svjetlost koja je određene snage i valne duljine. Ovisno o potrebama razlikuju se dvije emisije laserske svjetlosti:

- Spontana emisija
- Stimulirana emisija

U laserskom mediju postoji mogućnost izvođenja različitih procesa između materije i elektromagnetskog zračenja poput apsorpcija i spontanih emisija zračenja. U slučaju ako se dio atoma laserskog medija dovede u pobuđeno stanje velika je vjerojatnost da će ti atomi emitirati fotone putem spontane emisije [3].

Proces pri kojem atomi nasumično prelaze iz područja višeg u područje nižeg energetskog stanja naziva se spontana emisija [1]. Iz razloga što se proces događa bez utjecaja okoline pojava se naziva spontana emisija. Za vrijeme spontanog prijelaza atoma otpuštaju se fotoni što rezultira pojavi energije koja je jednaka energetskoj razlici stanja energije. Atom nakon što prijeđe iz određenog višeg u određeno niže energetsko stanje, zadržava u pobuđenom stanju te se srednje vrijeme koje atom provede u tom stanju

naziva vrijeme života atoma. To stanje bitno je za rad lasera te se naziva također i metastabilno stanje [1].



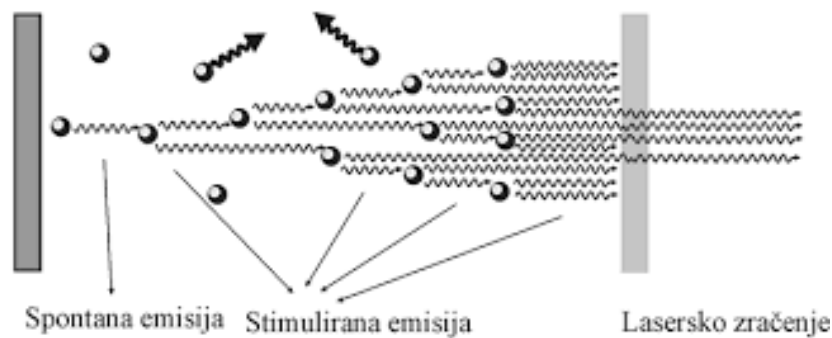
Slika 1. Spontana emisija

Izvor: [4]

Emisija laserske svjetlosti često se pronalazi i pod nazivom inducirana odnosno stimulirana emisija. Proces stimulirane emisije zračenja vrlo je važan zbog nastanka laserske zrake. Dva su uvjeta emisije fotona koja se moraju ispuniti kako bi došlo do pojave laserske zrake [2]:

- Bohrov uvjet – laserski medij treba obuhvaćati energijske razine čija razlika energija odgovara energiji prenošenih fotona
- Većina atoma mora biti u pobuđenom stanju

Jedan od razloga zbog čega se navedeni proces naziva stimulirana emisija je taj što se pobuđuje od strane vanjskog fotona tj. iz okoline. Oba fotona (emitirani i vanjski) posjeduju isti smjer kretanja, fazu i polarizaciju. Laserska zraka može se stvoriti jedino u slučaju u kojem stimulirana emisija je jača od apsorpcije i spontane emisije zračenja. Ta pojava se ostvaruje inverzijom naseljenosti atoma u laserskom kanalu tj. količina atoma u pobuđenom stanju mora biti brojnija od atoma u osnovnom stanju. Kako bi se postigla inverzija naseljenosti potrebno je izvršiti pobuđivanje atoma od strane vanjskog izvora energije te se takav postupak može izvoditi samo u posebnim slučajevima i uz prisutnost rijetkih tvari kao laserskih medija.



Slika 2. Prikaz spontane i stimulirane emisije fotona

Izvor: [4]

Inverzija naseljenosti je važan faktor za rad lasera. Narušavanje inverzije naseljenosti može se dogoditi povišenjem temperature čime dolazi do populiranja pobuđenih stanja te se stoga laseri često moraju hladiti.

2.2. DIJELOVI LASERA

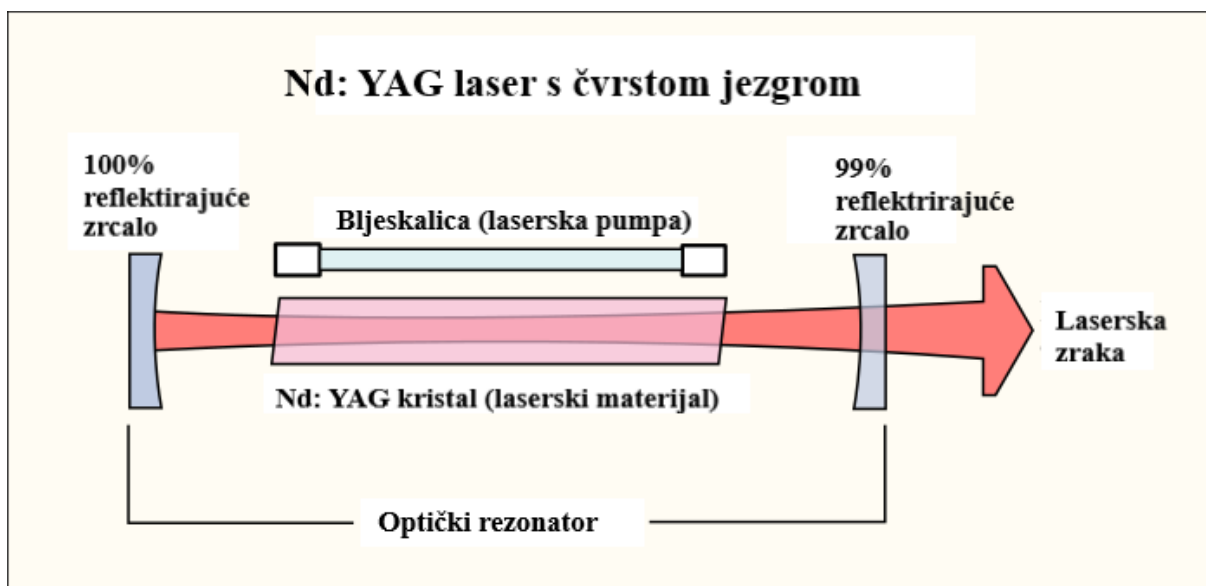
Građa lasera može se podijeliti na tri osnovna dijela [5]:

1. Laserska pumpa tj. energija za pobuđivanje medija
2. Laserski medij odnosno laserski materijal
3. Optički rezonator tj. dva ili više ogledala koji zajedno sačinjavaju rezonantnu šupljinu

2.2.1. Laserska pumpa

Laserska pumpa tj. laserski medij je dio koji je odgovoran za osiguravanje energije potrebne za rad lasera [6]. U vrste laserskih pumpa ubrajaju se električno pražnjenje naboja, kemijska reakcija, svjetlo koje dolazi sa drugog lasera itd. Upotreba određene vrste laserske pumpe zavisi od laserskom materijalu koji se koristi. Neke od vrsta laserskih pumpa su:

- *Helij – Neon laser (He – Ne)* – radi na principu električnog pražnjenja naboja u plinskoj kombinaciji helija i neona
- *Nd:YAG laser* – za rad je potrebna ili laserska dioda ili fokusirano svjetlo sa ksenon bljeskalice
- *Ekscimer laser* - koristi kemijsku reakciju



Slika 3. Prikaz Nd:YAG lasera

Izvor: [5]

2.2.2. Laserski medij

Na kojoj valnoj duljini će raditi laser, određuje laserski medij. Široko područje spektra u laserskom mediju pruža mogućnost podešavanja frekvencije spektra te posljedično tome i valne duljine. Veliki je broj različitih laserskih medija.

Laserska pumpa pobuđuje medij kako bi se stvorila inverzija naseljenosti te sukladno s time započelo sa spontanom i stimuliranom emisijom fotona što vodi do optičkog pojačanja [7].

Neke od vrsta laserskih medija u kojima laser može funkcionirati:

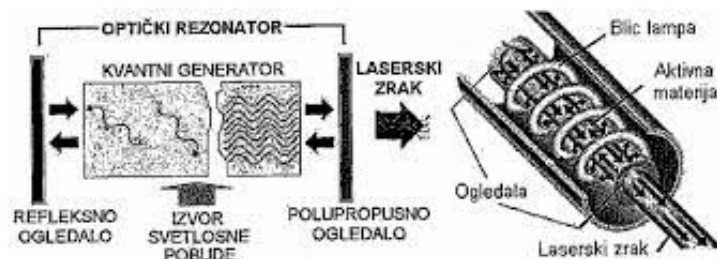
- *Tekućine* – organska kemijska otapala npr. etanol, etilen glikol, metanol. Valna duljina te samim time i frekvencija može se odrediti točnim kemijskim udjelom molekula bojila
- *Plinovi* – argon, kripton, CO₂ (ugljični dioksid), helij – neon. Električno pražnjenje naboja koristi se kao laserska pumpa
- *Čvrste tvari* – stakla, kristali. Kod lasera sa čvrstom jezgrom često je prisutan nekakav aspekt nečistoće u obliku titanija, kroma ili neodimija. Ovakav tip lasera koristi lasersku pumpu sa svjetlom drugih lasera ili sa bljeskalicama.

2.2.3. Rezonator

Optički rezonator je sačinjen od dva paralelna zrcala, laserski medij koji je smješten između zrcala omogućuje povratnu vezu svjetla. Optički premazi koji se stavljaju na zrcala određuju stupanj refleksije. Jedno zrcalo je sa visokim stupnjem refleksije (100%) a drugo zrcalo je sa parcijalnim stupnjem refleksije (99%) [8]. Visokoreflektivno zrcalo vraća emitirane fotone u aktivnu sredinu dok zrcalo sa parcijalnim stupnjem refleksije propušta fotone kroz optički rezonator te na taj način stvara lasersku zraku.

Svjetlo koje proizlazi iz laserskog medija te je nastalo spontanom emisijom, reflektira se na zrcalu i vraća u laserski medij gdje stimuliranom emisijom može biti pojačan. Ovakav proces može se ponoviti mnogo puta prije napuštanja svjetlosti kroz optički rezonator. Poravnanje ogledala i konstrukcija usporedno sa laserskim medijem važni su faktori za utvrđivanje valne duljine te ostalih svojstava lasera.

Unutar optičkog rezonatora mogu se postaviti dodatni optički uređaji poput modulatora, apsorbera, filtra itd. te pomoću tih pomagala stvoriti različite željene učinke na lasersku zraku.



Slika 4. Prikaz dijelova lasera

Izvor: [2]

2.3. VRSTE LASERA

U vrijeme pisanja rada poznato je više od tisuću vrsta lasera iako se većina koristi u istraživačke i znanstvene svrhe. Nekoliko je podjela lasera koje ovise o njihovim svojstvima i primjeni:

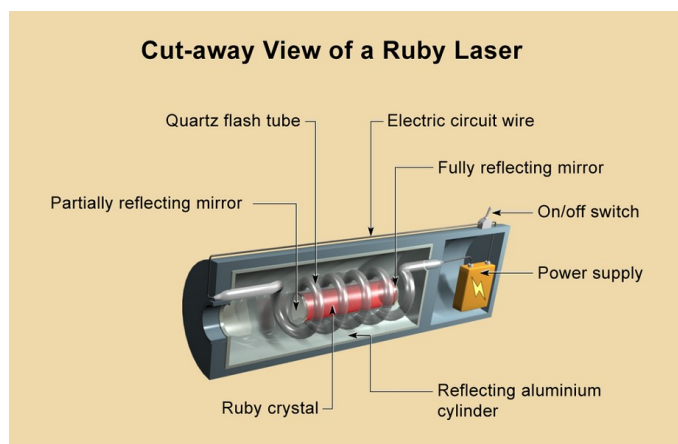
1. *Agregatno stanje tvari* – kruti, plinski, tekući laseri
2. *Princip rada* – pulsni i kontinuirani
3. *Način pobude* – pobuda lasera ostvaruje se ozračivanjem snopova pomoću čestica visoke energije, optički, pobudama putem kemijskih reakcija i sudarima elektrona i atoma

2.3.1. Laseri krutog stanja

Brojnost atoma, iona ili molekula karakterizira čvrsto tijelo. Ukoliko su oni raspoređeni ravnomjerno na način da tvore kristalnu rešetku, radi se o kristalnom tijelu. Ako se prostor ispunjava nepravilno, radi se o amorfnom tijelu.

Stakla i kristali se kod lasera koriste kao aktivan medij. Njihova karakteristika je da apsorbiraju svjetlost međutim ne svjetlucaju odnosno emitiraju već predaju energiju rešetci. Dodavanjem primjesa iona plemenitih ili prijelaznih metala postiže se učinak luminiscencije odnosno svjetlucanja.

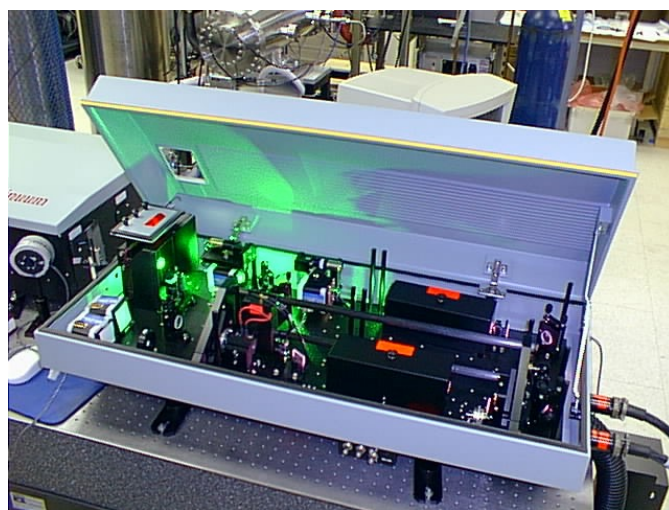
Prvi dizajnirani laser sa vidljivom svjetlošću bio je rubinski laser koji za jezgru koristi štapić sintetiziranog rubina odnosno aluminijevog oksida. Prvi rubinski laser sadržavao je spiralnu ksenonsku bljeskalicu koja je bila omotana oko štapića rubina.



Slika 5. Prikaz rubinskog lasera

Izvor: [9]

Pod najpoznatije lasere krutog stanja i pravilne strukture spadaju Nd:YAG odnosno laseri od itrij-aluminijevog granata ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) koji su dopirani atomima neodija (Nd: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Laser karakteriziraju 4 stupnja te mogućnost emitiranja infracrvenog zračenja valne dužine 1064 nm. Za pobudu lasera upotrebljava se kriptonska bljeskalica. Tipična karakteristika Nd:YAG lasera je oštrina spektralnih linija te se zbog toga primjenjuju za bušenje, rezanje, graviranje, različite obrade metala te također u medicinske svrhe.



Slika 6. Prikaz Nd:YAG lasera

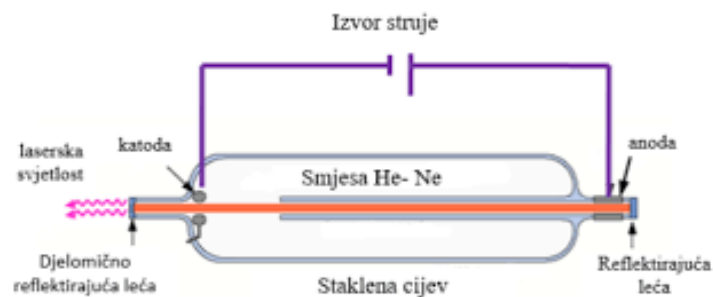
Izvor: [10]

2.3.2. Plinski laseri

Podjela plinskih lasera izvodi se na [11]:

- Atomske (He-Ne, Cs)
- Ionske (Ar, Kr)
- Molekulske (CO₂, N₂)
- Kemijske

Aktivni medij plinskih lasera nalazi se u plinovitom stanju. Atomski laser na primjer sastoji se od cijevi ispunjenje plinom atoma u slobodnom stanju koji se električnim izbojem pobuđuju. Dva su čimbenika koji imaju utjecaj na razinu atoma u različitim energetske stanjima: energetska promjena pobuđenih atoma zbog spontane emisije i učestalost sudara elektrona i atoma. Učestalost sudara elektrona i atoma ovisi o koncentraciji elektrona koji su prisutni tj. struji koja prolazi kroz cijev. Energetska promjena pobuđenih atoma zavisi o značajkama atoma i uvjetima u kojima se izvodi proces. Da bi laser uspješno djelovao neophodno je kreirati veliki broj pobuđenih atoma. Prolazom struje određene jakosti kroz plin inicira se sudar elektrona s atomima.



Slika 7. Prikaz sheme helij-neonskog lasera

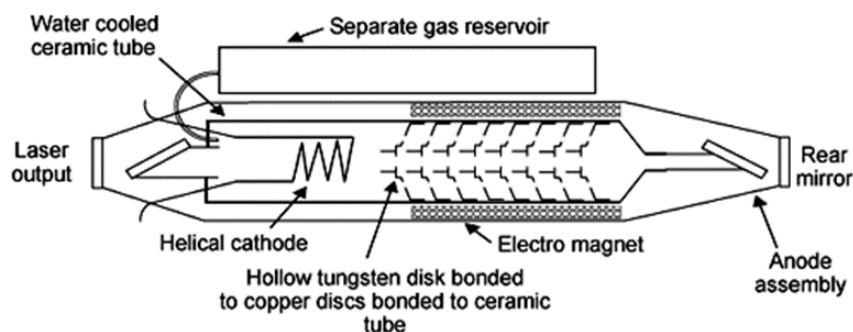
Izvor: [12]

Na slici 7. prikazana je shema helij-neonskog lasera. Sastoji se od mješavine 85% helija i 15% neona u okviru staklene cijevi u kojoj se pomoću izmjenične struje dolazi do pobude atoma.

Plinski laseri koji se najčešće koriste su He-Ne i argonski laseri, manje korišteni su kemijski i molekularni laseri.

Argonski laser koristi jednostruko nabijene katione argona kao aktivni laserski medij. Oni se stvaraju u plinu argonu putem električnog izboja. Poput ostalih plinskih lasera argonski laseri se također sastoje od plinske cijevi pod niskim tlakom sa paralelnim zrcalima na oba kraja cijevi. Karakteristike argonskih lasera omogućavaju stvaranje snažnih lasera u vidljivom i ultraljubičastom spektru sa kontinuiranim režimom rada. Način rada temelji se na ionizaciji neutralnog atoma izravnim sudarom sa elektronom, na taj način se određenim sudarima sa elektronom pobudi pozitivni ion na različite energetske razine. Područje djelovanja argonskih lasera je na 8 valnih duljina, najčešće korištena je valna duljina 514,5 nm što je zelena svjetlost [2].

Budući da je za rad argonskih lasera neophodno ionizirati atome, proces zahtijeva velike količine energije. Također argonski laseri zahtijevaju posebni sistem hlađenja stoga takvi laseri iziskuju čitavi niz dodatne opreme te su samim time vrlo skupi.



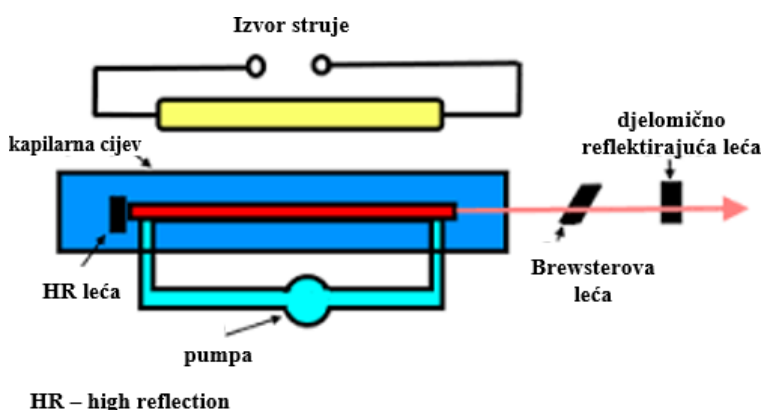
Slika 8. Prikaz sheme argonskog lasera

Izvor: [13]

2.3.3. Tekući laseri

Tekućine sadrže obilježja koja ih čine vrlo pogodnim laserskim materijalima. Jedna od velikih prednosti ovakvih lasera je jednostavnost hlađenja putem cirkulacije aktivnog medija. Nedostatak takvog medija je veliki omjer termičke ekspanzije koje izazivaju nehomogenosti indeksa loma te posljedično uvelike smanjuje kvalitetu lasera. Materijal koji ostvaruje luminiscenciju u tekućem stanju je važan faktor pri konstrukciji lasera.

Organske tekućine za razliku od anorganskih tekućina imaju jaču luminiscenciju. 1963. godine ostvaren je laserski učinak na tekućini korištenjem aktivnog medija otopljenog u organskom otapalu u obliku kelatnog spoja trovalentnog europija od strane Lempicki-a i Samelson-a.



Slika 9. Shema tekućeg lasera

Izvor: [14]

2.2.4. Poluvodički laseri

Poluvodički laseri posjeduju pojačalo na temelju poluvodiča. Ovakav tip lasera može spadati u lasere krutog stanja međutim različita načela rada svrstavaju ih u posebnu skupinu.

Poluvodički laser dijeli se na dva temeljna područja sa različitim električnim svojstvima. Sa n-strane poluvodiča prisutan je višak elektrona te oni predstavljaju nosioce struje, na p-strani poluvodiča su pozitivne šupljine koje označavaju manjak elektrona [15]. Dovođenjem negativnog napona na n-stranu i pozitivnog napona na p-stranu dolazi do

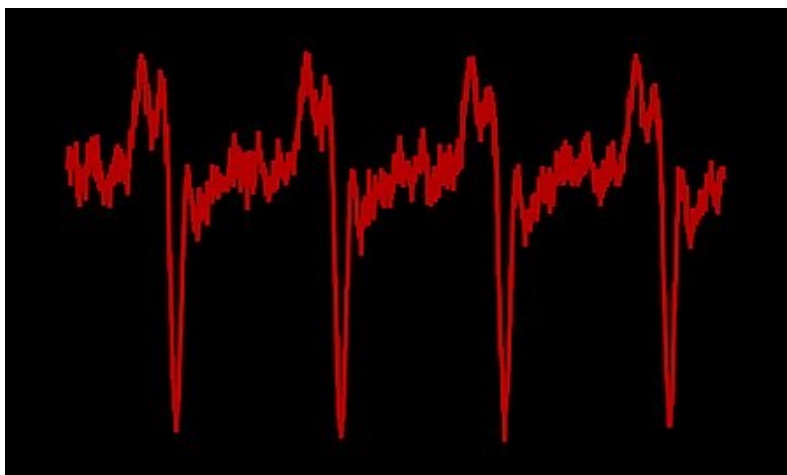
sudaranja elektrona te samim time i emisije fotona. Ukoliko su na krajevima dioda prisutna zrcala, stvara se laserski učinak.

Povećana optička snaga te odlična funkcionalna svojstva poluvodiča čine ovakav tip lasera savršene za upotrebu u mjernim uređajima i medicini. Poluvodički laser temeljna je komponenta za čitanje i pisanje računalnih diskova.

2.2.5. Pulsni laseri

Kod pulsnih lasera optička snaga pojavljuje se u impulsima koji su određenog trajanja te sa određenim periodima. Pulsni laseri najčešće su sastavljeni od neprozirnih zrcala, naime samo se jedno zrcalo pomiče periodički izvan putanje lasera, u trenutku kada se zrcalo postavi na mjesto, zaustavlja zraku u rezonatoru čime se laserska zraka pojačava. U trenutku kada se zrcalo pomakne izvan putanje, laser proizvodi kratki puls zračenja [15]. Pulsevi se također mogu proizvesti implementacijom određenih bojila u optički rezonator.

Razvojem tehnologije moguće je proizvesti lasere sa mogućnostima odašiljanja do 50 pulseva po sekundi.



Slika 10. Primjer impulsa kod pulsnog lasera

Izvor: [16]

2.2.6. Kontinuirani laseri

Prema načinu rada stalan intenzitet emitiranog vala u jedinici vremena karakterizira kontinuirane lasere. Optičko pojačalo je postavljeno između reflektirajućih zrcala. Jedno od zrcala je potpuno reflektirajuće dok je drugo djelomično reflektirajuće [1].

Unutar rezonatora se reflektira snop, time raste gustoća zračenja energije. Nakon što se uvjeti potrebni za lasersku akciju ispune, snop prodire kroz djelomično propusno zrcalo te se time stvara laserska zraka.

2.4. NAČIN POBUDE LASERA

2.4.1. Kemijska reakcija

Kemijski laseri posjeduju kemijske reakcije koje su u stanju proizvoditi molekule u stanju pobude. Navedenim procesom plinoviti laserski medij koji se sastoji od više kemijski aktivnih komponenti dovodi se u stanje pobude [17].

Primjer lasera sa kemijskom reakcijom je fluorovodični laser koji radi na principu reakcije vodika i fluora radi dobivanja fluorovodika u stanju pobude.

Kemijski laseri su po mnogim stvarima slični plinskim laserima iz razloga što su sastavljeni od pretežno istih smjesa plinova. Prednost kemijskih lasera očituje se u tome što se pobuda stječe kemijskom reakcijom bez potrebe vanjskog djelovanja.

2.4.2. Optičko sredstvo

Prozirna tvar odnosno vakuum putem kojeg se može propagirati vidljiva svjetlost definira se kao optičko sredstvo. Propust elektromagnetskih valova među glavnim je svojstvima optičkog sredstva. Međudjelovanje fotona i molekula u sredstvu ključan je faktor o kojem u znatnoj mjeri ovisi propusnost.

2.4.3. Sudari elektrona i atoma u plinskom izboju

Dovoljno intenzivna emisija fotona može se ostvariti prolazom struje kroz plin, međusobni sudari elektrona sa atomima odnosno molekulama postupak je na kojem se temelji proces emisije fotona u plinskom izboju. Navedeni način pobude najučinkovitiji je za bilo koji plinski medij nevažno radi li se o ionskom, molekularnom ili atomskom laseru .

Maxwellowa raspodjela prikazana u nastavku definira brzine atoma ili molekula plina koji se nalazi u termičkoj ravnoteži [15].

$$\frac{dN}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 e^{-\left(\frac{v}{v_0} \right)^2} d \left(\frac{v}{v_0} \right)$$

Rezultat ovakvog tipa pobude moguće je vidjeti u UV području stoga se i emisija događa upravo u području u kojem je vidljiva energija titranja [1].

2.5. PRIMJENA LASERA

Razvojem mnogobrojnih vrsta lasera otvorio se široki spektar primjena lasera u brojnim granama industrija. Prisutnost lasera očituje se u svakidašnjici primjerice u medicini, poslovanju karticama, računalima, laserskim printerima koji rade na principu ispisivanja teksta putem laserske zrake koja preuzima ulogu statičkog elektriciteta koji se koristi kao tzv. ljepilo na koje se tinta uhvati.

2.5.1. Medicina

Laser u medicini služi pretežito kao korisni kirurški alat. Zbog svojih karakteristika koristi se u operacijama koje zahtijevaju precizne manevre kao npr. operacije oka, lasersko uklanjanje tetovaža, odstranjivanje površinskih tumora, dermatološke zahvate itd. Laserski snop može se okarakterizirati kao vrlo precizan kirurški skalpel što opravdava sve češću uporabu kod operacija pacijenata sa sindromom zgrušavanja krvi. U stomatologiji laseri dolaze do izražaja prilikom popravaka zubiju.



Slika 11. Prikaz upotrebe lasera u kirurgiji

Izvor: [18]

2.5.2. Holografija

Holografija obuhvaća proces snimanja i reproduciranja 3D (trodimenzionalne) slike određenog objekta pomoću koherentne svjetlosti. Za razliku od 2D (dvodimenzionalne) slike koja bilježi jakost i redoslijed svjetlosnih valova, 3D slika prikazuje također fazu i smjer, memorirajući time karakteristike valne fronte svjetlosti zajedno sa prostornim podacima objekta.

Laser je savršeni alat koji se koristi za proces prikazivanja holograma jer ispunjuje uvjete jednobojnosti i snažne usmjerenosti potrebne za prikaz cijelog objekta. Laserski snop dijeli se na dva dijela, prvi dio se odbija od objekta koji se snima te se križa sa drugim dijelom zrake koja se odbija od zrcala. Na taj način stvara se interferencijski otisak koji se emitira na film, tek nakon tog procesa je moguće izvesti projekciju. Informacije koje su memorirane u obliku isprepletenog uzorka prikazuju se kao objekt koji je sniman [19]. Time se stvara dojam realnog objekta.

Završni prikaz odnosno hologram prikazuje različite prizore predmeta te se može sagledati iz svih kuteva.

2.5.3. Mjerenje i modeliranje

Laserski uređaji priličnu važnost dobili su u raznim granama industrije koje uključuju mjerenje kao ključan faktor za izvođenje daljnjih djelatnosti. Industrije i znanstvene

djelatnosti poput astronomije, građevinarstva i geodezije jedne su od mnogih koje su potpuno integrirale uporabu lasera za razne namjene. Kao primjer mogu se navesti laseri koji se koriste u svrhu poravnanja terena za vrijeme izgradnje cesta, laserski mjerači koji se koriste za mjerenje udaljenosti zidova itd.

2.5.4. Vojna industrija

Lasери imaju vrlo veliko značenje u vojnoj industriji. Laseri se koriste u raznim granama koje vojna industrija obuhvaća. Svrhu pronalaze kao označivači cilja kod oružja ili vojnih zrakoplova, daljinomjera, u telekomunikacijama itd.

Primjer mogućeg inovativnog korištenja lasera je projekt izrade zaštite od balističkih raketa, štit bi bio sačinjen od niza satelita na određenim pozicijama koji bi bili opremljeni sa laserima vrlo jakog intenziteta te bi bili u mogućnosti ukloniti potencijalno prijetuće rakete sa velikih udaljenosti te na taj način osigurati sigurnost ugroženog područja.

FASOR (eng. Frequency Addition Source of Optical Radiation) je optički mjerni radar čije je svrha pronalaženje natrija u gornjoj Zemljinoj atmosferi putem laserskih zraka koje se isijavaju u atmosferu, odbijaju od malenih čestica te zatim registriraju u teleskopu (optičkom prijemniku) [20]. Drugi naziv za optički mjerni radar je lidar (eng. Light Detection and Ranging) ili laserski radar.



Slika 12. Prikaz FASOR-a

Izvor: [20]

2.5.5. Ostale primjene

Laseri osim navedenih primjena imaju široki raspon primjena u ostalim granama. Primjerice putem moduliranog laserskog zračenja u telekomunikacijama laseri se koriste za prijenos podataka. U meteorologiji laseri se koriste za brzine kretanja oblaka i mjerenje udaljenosti. Arheologija primjerice veliku korist pronalazi u primjeni lidara kao alat za skeniranje tla, dio Amazone zbog svoje neprohodnosti nemoguće je istražiti stoga se pomoću helikoptera na koje se pričvrsti laserski sustav, može preletiti područje, skenirati putem laserskih zraka koje prodiru kroz prašumu te na taj način dobiti model odnosno dojam što se nalazi na neistraženim područjima. Primjenom lidara u zadnjih nekoliko godina otkrile su se arheološke ostavštine za koje se prije nije znalo. Dodatno upotreba lidara predstavlja ekološki prihvatljivu soluciju za izvođenje takvih pronalazaka bez potrebe za siječom šuma i destrukcijom. Također laseri se mogu koristiti u restauracijske svrhe poput čišćenja kamenja, stupova, fasada ili skulptura.



Slika 13. Primjer čišćenja kamena pomoću lasera

Izvor: [21]

3. ANALIZA TEHNIKA PODVODNOG REZANJA LASERIMA

Zahvaljujući svojim karakteristikama laseri se koriste za obradu raznih metalnih površina, zavarivanje i rezanje. Kolimiranost odnosno svojstvo fotona laserske zrake da se kreću paralelno odnosno imaju istu putanju kretanja omogućuje stvaranje uskog snopa što rezultira velikom preciznošću pri obradi materijala.

Rezanje laserima je tehnologija koja koristi lasersku zraku u svrhu isparavanja materijala kako bi se stvorio precizan rez. Tipično se koristi u industrijskim aplikacijama međutim zbog svoje praktičnosti, ovakav tip rezanja počeo se koristiti u arhitekturi, školama i u svrhe hobija. Rezanje laserima radi na principu usmjeravanja vrlo snažne izlazne laserske zrake. Komercijalni laseri za rezanje materijala koriste sustav za kontrolu pokreta upravljan najčešće od strane CNC (eng. Computer numerical control) programa u svrhu rezanja uzoraka na materijalu koji se obrađuje [22]. Laserska zraka upućuje se na materijal koji se može otopiti, zapaliti, ispariti ili otpuhati od strane zračnog mlaza, ostavljajući time rez završne obrade vrlo visoke kvalitete.

Podvodno rezanje laserima ima mnogo primjena u pomorskoj industriji i u nuklearnim postrojenjima. Obećavajuća je tehnika za operacije poput održavanja, rastavljanja i prikupljanja uzoraka u svrhu ispitivanja postotka zračenja. Kontinuirano održavanje i pravovremeno otkrivanje potencijalnih nedostataka ključno je kako bi se proizvodnja energenata i pomorski transport mogli odvijati bez potencijalnih ekoloških katastrofa. Podvodni radovi koji se izvode od strane ronioaca u svrhu održavanja pomorskih objekata, cjevovoda itd. kompleksni su i skupi zahvati, također predstavljaju opasnosti za ronioce zbog radnih uvjeta i fizičkih ograničenja ljudskoga tijela. Organizacija ovakvog tipa posla iziskuje poveći broj visokostručnog kvalificiranog kadra uz odličnu logistiku i prijenos opreme.

3.1. PROCESI REZANJA

3.2.1. Rezanje procesom isparavanja

Kod postupka rezanja putem isparavanja, usmjerena laserska zraka zagrijava površinu materijala do točke paljenja pri čemu se stvara rupica malog promjera. Navedena rupica vodi do naglog povećanja u apsorpciji topline koju laserska zraka isijava te se na taj način povećava promjer rupe. Materijal koji isparava se uklanja pomoću ispuhivanja te se posljedično tome povećava promjer reza. Ovakav proces izvrstan je za rezanje materijala koji se ne tope poput drva, karbona i duroplasta.

3.2.2. Rezanje procesom topljenja i ispuhivanja

Proces topljenja i ispuhivanja odnosno rezanje fuzijom upotrebljava plin pod visokim pritiskom kako bi se rastopio materijal u području nastajanja reza. Na taj način smanjuje se potreba za snagom. Obrađivani materijal prvo se zagrijava do točke taljenja zatim se pomoću plinskog mlaza ispuhuje rastopljeni materijal iz putanje kako bi se izbjeglo daljnje podizanje temperature materijala. Navedeni tip procesa koristi se pretežito za metale.

3.2.3. Rezanje procesom toplinskog pucanja

Lomljivi materijali posebice su osjetljivi na toplinsko pucanje odnosno lom, zato se laserska zraka usmjerava na površinu materijala koji se obrađuje izazivajući time toplinu na površini manjeg promjera do pojave loma. Lom se dalje navodi pomoću laserske zrake. Lom se može navoditi do m/s. Proces se najčešće koristi u obradi stakla.

3.2.4. Rezanje putem odvajanja tankih pločica

U konstruiranju poluvodičkih uređaja jedan od ključnih faktora je razdvajanje mikroelektroničkih čipova od silikonskih pločica. Razdvajanje se može izvoditi

procesom odvajanja pomoću pulsnog Nd:YAG lasera čija radna valna duljina od 1064 nm je adaptirana tj. prilagođena spektralnoj liniji silicija.

3.2.5. Reaktivno rezanje

Reaktivno rezanje ili rezanje plamenom radi na sličnom principu kao i klasično plinsko rezanje međutim sa korištenjem laserske zrake kao izvor paljenja. Koristi se pretežito za rezanje čeličnih limova debljine veće od 1 mm. Ovaj proces može se koristiti za rezanje vrlo debelih slojeva lima sa malom snagom lasera.

3.2. PODVODNO LASERSKO REZANJE ČELIKA DEBLJINE DO 100 mm ZA DEKOMISIJU NUKLEARNIH POSTROJENJA

Veći broj nuklearnih postrojenja diljem svijeta ugasio se zbog starenja te su na redu za demontažu. Primjerice većina nuklearnih postrojenja upogonjenih u Južnoj Koreji su reaktori sa vodom pod tlakom. Primarni sustavi takvih postrojenja sastoje se od [23]:

- *reaktorske posude* (RPV - eng. reactor pressure vessel)
- *komponenata koje se nalaze unutar reaktora* (RVI - eng. reactor vessel internals)
- *reaktorske pumpe za hlađenje* (RCP - eng. reactor coolant pump)
- *generatora pare* (SG - eng. steam generators)

Najzahtjevniji zadatak u demontaži primarnog sustava nuklearnog reaktora je rastavljanje reaktorske posude i komponenata unutar reaktora zbog toga što su sastavljene od kompleksnih, debelih struktura čelika te uz to vrlo radioaktivne. Stoga tehnologije koje se koriste za demontažu takvih struktura moraju zadovoljavati određene uvjete [23]:

1. Tehnologija mora biti u mogućnosti rezati čelik debljine minimalno 100 mm
2. Primjenom rezanja putem daljinskog upravljanja ključno je kako bi se izbjeglo izlaganje radnika radijaciji
3. Mora se primjeniti podvodno rezanje kako bi se smanjilo izlaganje radijaciji putem vodenog štita
4. Primjenjena tehnologija trebala bi minimizirati generirani sekundarni otpad kako bi se smanjili troškovi zbrinjavanja otpada

Rezanje laserima jedno je od najboljih alata koje zadovoljava navedene uvjete. Intenzivan razvoj tehnologija lasera rezultirao je u povećanom broju komercijalno dostupnih lasera dovoljnih snaga koje omogućuju rezanje čelika debljine i nekoliko stotina milimetara. Rezanje laserima također omogućuje daljinsko upravljanje.

3.2.1. Prednosti i nedostaci podvodnog laserskog rezanja

Laserska zraka isporučena vlaknima omogućuje operatoru upravljanje na daljinama do nekoliko stotina metara od laserskog generatora. Također kako je u pitanju beskontaktno lasersko rezanje uporabom toplinskog procesa, sila reakcije je vrlo malena stoga je kontrola glave za lasersko rezanje, koja je postavljena na manipulator, olakšana primjerice robotskom rukom. Nadalje ovakav proces ima manju širinu reza, promjera od 1-2 mm što rezultira smanjenoj količini sekundarnog otpada [23].

Unatoč mnogim prednostima rezanja laserima, vrlo visoka cijena samih lasera čini ih kompleksnijima za upotrebu sa ekonomske strane. Također već navedena potreba za visokostručnim kadrom i kvalitetnom logistikom su jedni od dodatnih nedostataka upotrebe lasera. Međutim potrebno je spomenuti da pojavom sve veće upotrebe u industrijskim aplikacijama, cijene lasera su počele opadati stoga rezanje laserima postaje poželjniji proces za dekomisiju nuklearnih postrojenja.

3.2.2. Vrste lasera za podvodno lasersko rezanje

Za upotrebu laserskog rezanja u svrhu demontiranja, provele su se razne studije na temu rezanja gustog čelika korištenjem lasera velikih snaga. Tehnike rezanja korištenjem lasera na temelju ugljikovog monoksida, ugljikovog dioksida (plinski laseri) i YAG lasera pokazale su se zahtjevnima za uporabu na terenu zbog poteškoća u postizanju isporuke vlakna.

Odnedavna razvile su se tehnike rezanja koristeći izvore lasera, isporučene vlaknima, valne duljine 1 mikrometra od strane lasera sa neprekidnim valnim diskovima ili lasera sa vlaknima. Navedene tehnike pokazale su se vrlo uspješnim.

Gore navedene tehnike također su se podvrgnule testiranjima u podvodnim aplikacijama. Upotrebom lasera sa vlaknima, snage 5 kW uspješno je izvršeno rezanje manganskog čelika debljine 37 mm. Nadalje upotrebom Yb:YAG laser snage 4 kW uspješno je izvršeno rezanje S355j2+N čelika debljine 50 mm. Primjenom lasera sa vlaknima snage 6 kW obavljeno je rezanje nehrđajućeg čelika debljine 60 mm [23].



Slika 14. Prikaz stroja za rezanje pomoću laserskih vlakana

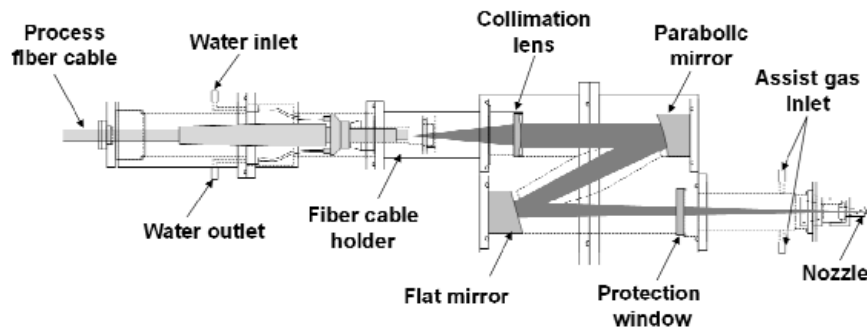
Izvor: [22]

Međutim praktična aplikacija laserskog rezanja u svrhu demontaže nuklearnih postrojenja zahtjeva mogućnost rezanja metala većih gustoća. Posebice u primjeni pri podvodnom rezanju gdje performanse rezanja su lošije u usporedbi sa suhim rezanjem. Razlog je taj što kada je objekt rezanja velike gustoće odnosno debljine, uzgon otežava stvaranje suhog lokalnog područja u kojem laser može putovati da ga pritom voda ne upije. Prema tome potrebne su naprednije tehnike rezanja kako bi se uspješno rezali objekti debljine veće od 60 mm.

Kako bi se zadovoljili postavljeni uvjeti, izvedeni su testovi pri kojima se rezao čelik debljine do 100 mm [23]. U svrhu prevladavanja uzgona u vodi, razvijene su visokotlačne nadzvučne mlaznice. Štoviše dvostruka mlaznica je korištena za rezanje čelika debljine 80 mm i više. Izvedenim testovima uspješno je izvršeno rezanje čelika do 100 mm debljine.

3.2.3. Mehanizam rezanja

Za svrhu rezanja, kao izvor upotrebljava se optički laserski sustav (YLS-10000) snage 10 kW. Zraka se emitira kroz hranidbeno vlakno promjera 100 mikrometra koje prolazi kroz spojnicu u procesno vlakno promjera 150 mikrometra. Proces se izvršava na daljini 20 m od laserskog generatora.



Slika 15. Shema korištenog lasera za rezanje

Izvor: [23]

Slika 14. prikazuje shemu glave korištenog lasera za podvodno rezanje. Na slici su prikazani dijelovi od kojih se sastoji glava:

- *Process fiber cable* – procesni vlaknasti kabel
- *Water inlet* – ulaz vode
- *Water outlet* – izlaz vode
- *Fiber cable holder* – držač vlaknastog kabela
- *Collimation lens* – kolimacijska leća
- *Flat mirror* – ravno zrcalo
- *Parabolic mirror* – parabolično zrcalo
- *Protection window* – zaštitno zrcalo
- *Assist gas inlet* – pomoćni ulaz plina
- *Nozzle* – mlaznica



Slika 16. Prikaz laserske glave

Izvor: [23]

Na slici 15. prikazani su eksterni dijelovi laserske glave:

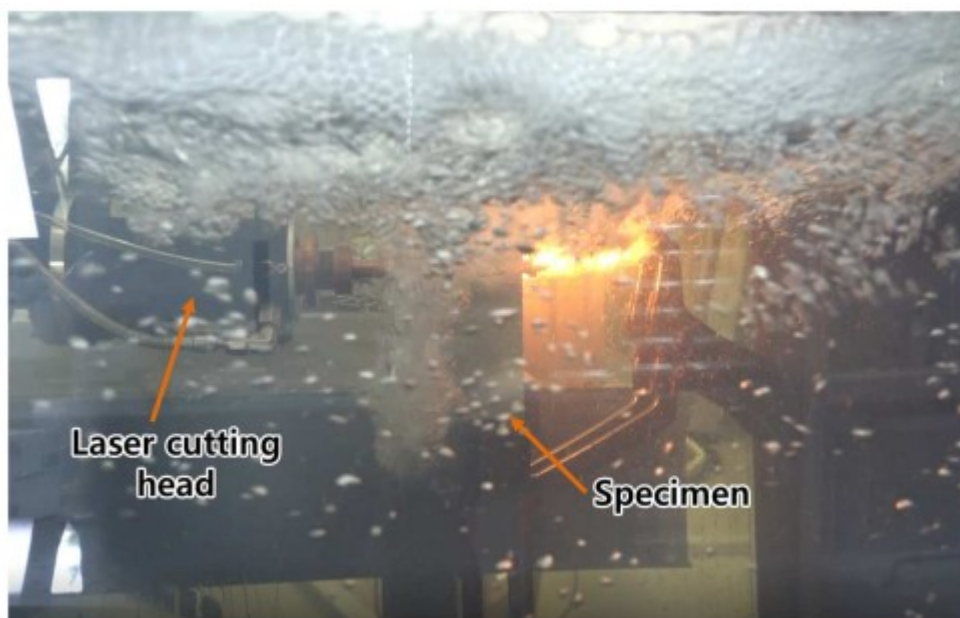
- *Process fiber cable* – procesni vlaknasti kabel
- *Fiber cable shield* – štit vlaknastog kabla
- *Head body* – struktura glave
- *Nozzle assembly* – sklop mlaznice

Kao što je prikazano na slici 14. glava za rezanje sastoji se od kolimacijske leće te vodeno hlađenih paraboličnih i ravnih zrcala. Žarišna duljina kolimacijske leće je 160 mm dok je od parabolične, 600 mm. Paraboličko zrcalo odbija lasersku zraku pod kutem od 30 stupnjeva zatim ravno zrcalo nanovo odbija lasersku zraku na taj način stvarajući optičku putanju oblika Z. Stvorena putanja omogućava laserskoj glavi da ostane robustna uzimajući u obzir da je žarišna duljina paraboličnog zrcala 600 mm. Glava lasera je vodonepropusna što omogućuje potpuno uranjanje u vodu.

Svojstva usmjerene laserske zrake zajedno sa karakteristikama pomoćnog plina dva su faktora koja mogu utjecati na učinkovitost laserskog rezanja. Dizajn strukture mlaznice je stoga ključan kako bi se stvorio učinkoviti proces izbacivanja putem pomoćnog plina. Posebice u procesu podvodnog rezanja, mlaznica sposobna za formiranje suhe lokalne zone, nužna je prijenos snage laserske zrake na predmet koji se reže bez apsorpcije vode. Mlaznica također mora imati otpornost na vodu te mogućnost kvalitetnog otpuhivanja taljenog materijala. U svrhu ispunjavanja navedenih uvjeta, razvijene su nadzvučne mlaznice sa minimalnim duljinama primjenjene na lasersku glavu. Nadzvučne mlaznice posjeduju geometriju koja omogućuje plinski mlaz bez udarnog vala.

U svrhu testiranja razvijene su dvije vrste mlaznica za primjenu pri manometarskom tlaku od 1.5 Mpa i 2.0 Mpa (Megapaskala) kako bi se izbjegli udarni valovi. Obje mlaznice posjeduju promjer grla 3 mm, izlazni promjeri od 1.5 Mpa i 2.0 Mpa su 4.78 mm i 5.19 mm. Brzina protoka mlaznice od 1.5 Mpa je 1310 L/min dok je brzina protoka za mlaznicu od 2.0 Mpa, 1750 L/min [23].

Za objekte testiranja korištene su pločice od nehrđajućeg čelika sa različitim debljinama. Dimenzije oba primjerka iznosile su 120 mm u visini i širini. Korištena je laserska snaga od 9 kW. Kao pomoćni plin korišten je potisnuti zrak. Lasersko rezanje izvodilo se na dubini 70 – 150 mm od površine vode. Udaljenost odstupanja odnosno udaljenost od kraja mlaznice do prednje površine objekta postavljena je na 10 mm.



Slika 17. Prikaz procesa podvodnog rezanja laserom

Izvor: [23]

Na gornjoj slici 16. prikazan je proces podvodnog rezanja laserom. Uzorak rezanja se postavlja u vodeni tank, u to vrijeme glava lasera nalazi se iznad površine vode. U trenutku započinjanja procesa rezanja, primjenjuje se pomoćni plin te izbacuje kroz mlaznicu kako bi se spriječio ulazak vode, zatim se glava spušta u vodu te smješta na početnu poziciju rezanja. Pozicioniranjem glave, laser se uključuje te se glava lasera

pomiče od bočne strane uzorka do unutrašnje strane uzorka. Nakon što je laserska glava prošla unaprijed određenu putanju te je proces rezanja završio, laser se isključuje te se glava lasera miče izvan vode.

Duljina reza za svaki uzorak je 40 mm. Početna sekcija od 10 mm rezana je pri nižoj brzini dok se ostatak uzorka rezao pri povišenoj brzini. Performanse rezanja procijenjene su mijenjanjem brzine rezanja liniju po liniju za svaki uzorak.

3.2.5. Rezanje jednom mlaznicom

Test podvodnog rezanja laserom prvo se izveo sa jednom mlaznicom. Primjena pomoćnog plina sa manometarskim tlakom od 1.5 Mpa, rezultirala je dobrim izvođenjem rezanja na debljini 70 mm. Maksimalne brzine pri debljinama od 50, 60 i 70 mm bile su 180, 110 i 80 mm/min. Snaga lasera od 9 kW rezultirala je vrlo dobrim brzinama rezanja koje u usporedbi sa brzinama rezanja pri snazi od 6 kW (prijašnji testovi provedeni od strane Shin et al., 2019) su se udvostručile [24]. Poboljšanje u performansama pri većim debljinama raste simultano povećanju snage.

U trenutku povećanja debljine iznad 70 mm, uzorci se nisu dobro izrezali posebice u području početnih 10 mm. Početni rezovi pri debljini 80 mm uz pomoćni plin pri manometarskom tlaku 1.5 Mpa su također podbacili, niti povećanje manometarskog tlaka na 2.0 Mpa nije rezultiralo uspješno provedenom početnom rezu. Početni rezovi također su podbacili u rezanju pri debljini od 90 mm premda nakon početnog reza ostalo rezanje se uspješno izvelo. U ovome slučaju maksimalna brzina rezanja postavljena je na 20 mm/min sa manometarskim tlakom 2.0 Mpa.

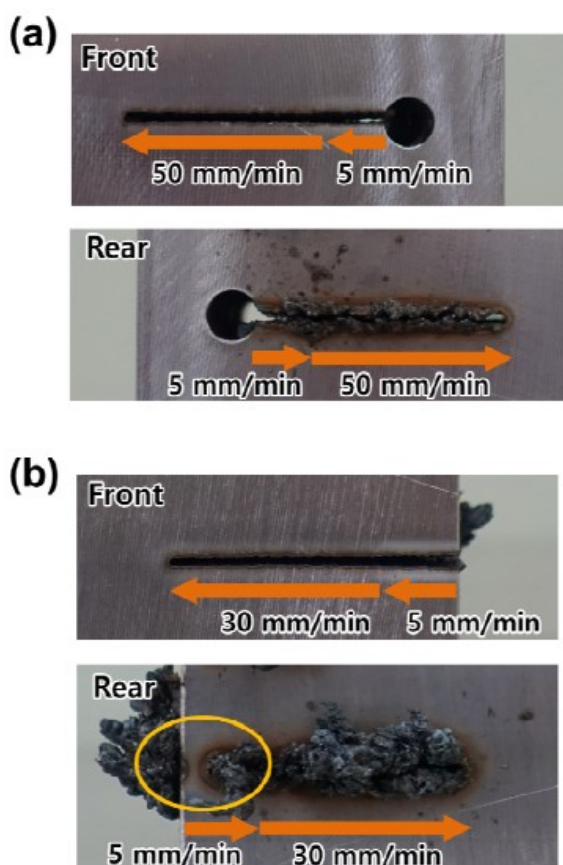
Nekoliko je razloga koji opravdavaju neuspješno izvođenje početnih rezova.

1. Proces rezanja započet je sa bočne strane uzorka te pomoćni plin nije uspješno ispuhao istopljeni materijal. Ovakva pojava česta je u procesu rezanja u zraku te se takva problematika rješava smanjenjem početne brzine rezanja. No pri podvodnom rezanju, smanjenje početne brzine rezanja nema isti učinak zbog visoke otpornosti vode.

2. Uzgone vode uzrokovao je pomicanje pomoćnog plina prema površini, pri tome sprečavajući lasersku zraku da dosegne stražnju stranu uzorka. U tom slučaju stražnja strana uzorka u nemogućnosti je primiti potpunu snagu laserske zrake.

U slučaju da se objekt rezanja izbuši pomoću mehaničke bušilice, riješio bi se problem izvođenja početnog rezanja. Ovakav postupak bušenja rupe u skladu sa linijom reza stvara protok zraka time omogućavajući olakšano ispuhivanje rastopljenog materijala. Dodatno, bušenjem rupe stvara se suha lokalna zona te se time rješava problem degradacije performansi izazvanih uzgonom. U provedenim testovima uzeti su prethodno probušeni uzorci kako bi se uklonila loša izvedba izazvana neuspješnim izvođenjem početnih rezova.

Na slici 17. prikazane su prednja i stražnja strana uzorka koji je rezan pomoću početnog bušenja i uzorka bez uporabe početnog bušenja.

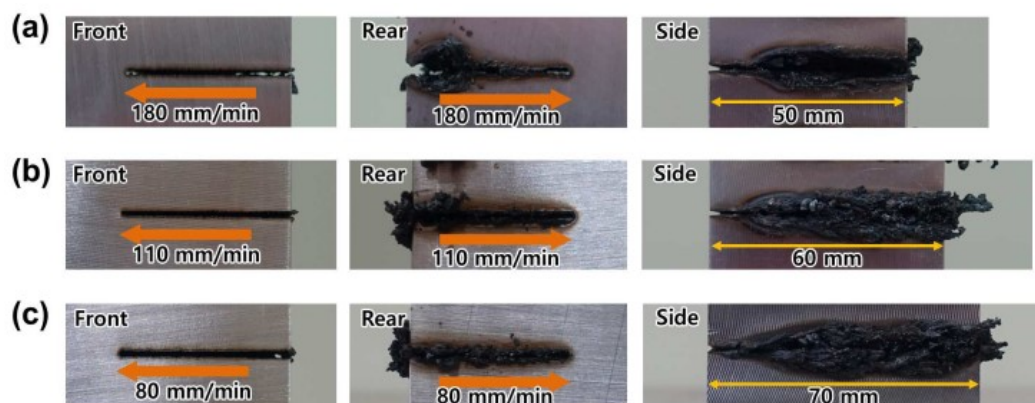


Slika 18. Prikaz usporedbe uzoraka

Izvor: [23]

Pri rezanju pomoću početnog bušenja koristio se pomoćni plin sa manometarskim tlakom od 1.5 Mpa, rupa se bušila na promjeru 8 mm. Postupak inicijalnog bušenja omogućio je rezanje nehrđajućeg čelika debljine 100 mm upotrebom laserske snage 9 kW. Za uzorke debljina 80, 90 i 100 mm koristile su se maksimalne brzine rezanja od 50, 30 i 7 mm/min [23].

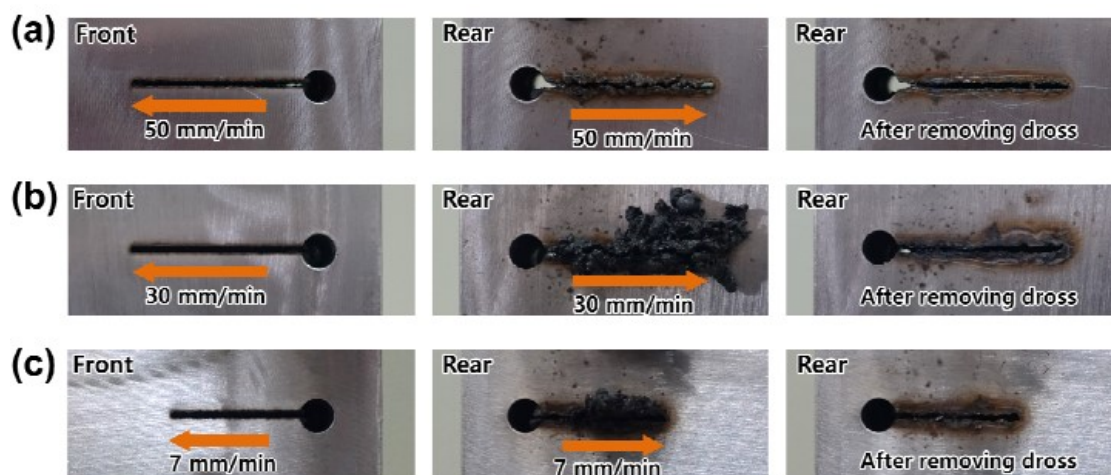
Dva su ključna faktora koja određuju performanse rezanja: maksimalna brzina rezanja i širina proreza. Pomoću širine proreza može se odrediti količina stvaranja sekundarnog otpada. Uska širina proreza nužna je za minimizaciju sekundarnog otpada, štoviše jer minimizacijom sekundarnog otpada, smanjuju se troškovi zbrinjavanja otpada u proces demontaže nuklearnih postrojenja.



Slika 19. Prikaz rezova bez pomoćnog bušenja rupe

Izvor: [23]

Na gore prikazanoj slici može se vidjeti usporedba rezova bez početnog bušenja rupe na uzorcima nehrđajućeg čelika debljina 50, 60 i 70 mm. Slijedeća slika prikazuje uzorke debljina 80, 90 i 100 mm na kojima se primijenilo početno bušenje rupe, te krajnji rezultat nakon uklanjanja nečistoća. Kako je nečistoća na stražnjoj strani uzorka u obliku oksida, vrlo se lako uklanja bez upotrebe pretežite sile.

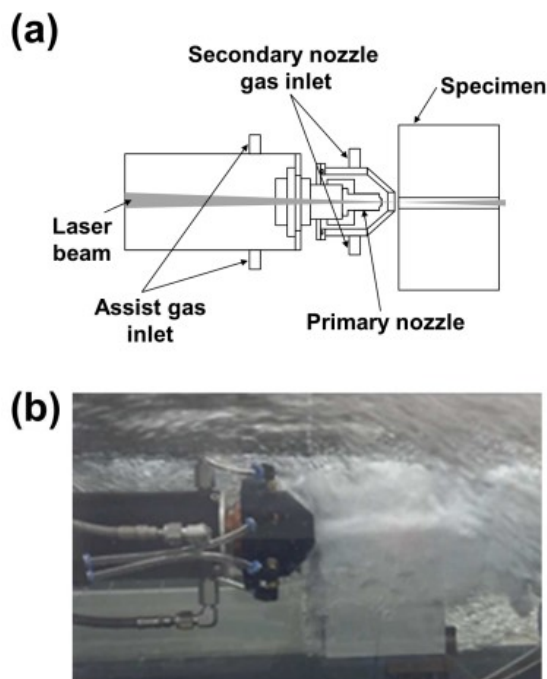


Slika 20. Prikaz uzoraka na kojima se primijenilo početno bušenje

Izvor: [23]

3.2.6. Rezanje dvostrukom mlaznicom

Prethodno navedeni eksperimenti pokazali su da laseri sa jednom mlaznicom uz postupak pomoćnog inicijalnog bušenja, mogu rezati uzorke debljine do 100 mm pri 9 kW laserske snage. Stoga upotreba dvostruke mlaznice u stanju je udvostručiti učinak početnog rezanja. Plin koji se izbacuje kroz sekundarnu mlaznicu djeluje kao zaštitna barijera kako bi se omogućilo prodiranje primarnog plina bez utjecaja uzgona. Na taj način formira se na površini uzorka lokalna suha zona koja omogućuje pružanje laserske zrake na stražnju stranu uzorka bez apsorpcije vode. Ovakav proces pruža učinak boljeg početnog rezanja usporedno sa jednostrukom mlaznicom.



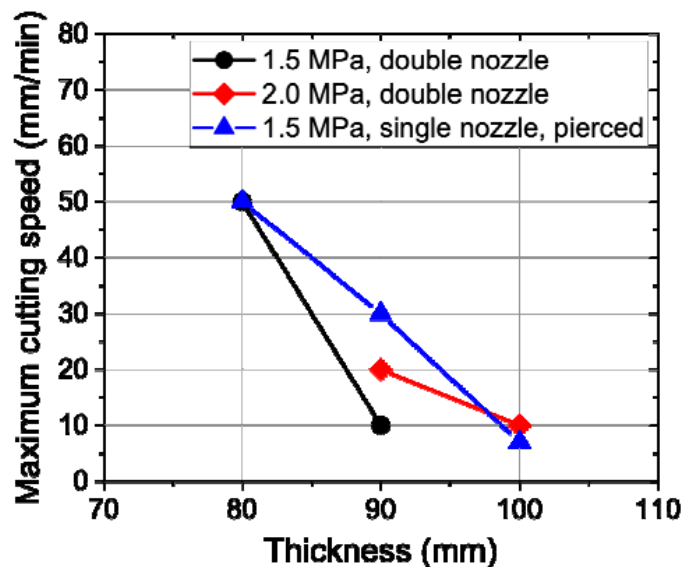
Slika 21. Prikaz lasera sa dvostrukom mlaznicom

Izvor: [23]

Gore navedene slike prikazuju konceptualnu shemu lasera koji upotrebljava dvostruku mlaznicu za rezanje te laser uronjen u vodi koji koristi dvije mlaznice za izbacivanje plina. Izlazni promjer sekundarne mlaznice je 12 mm. Udaljenost odstupanja primarne mlaznice je 4 mm dok od sekundarne 10 mm. Sekundarna mlaznica podešena je na način da koristi plin neovisno o primarnoj mlaznici. Za vrijeme izvršavanja testova ulaz plina na sekundarnoj mlaznici opskrbljivao se putem kompresiranog zraka sa manometarskim tlakom 1.0 Mpa, protok zraka kontroliran je putem ventila te maksimalni protok zraka koji se mogao primjeniti je 1000 L/min [23].

Pri debljini 80 mm korištena je brzina rezanja 50 mm/min uz pomoćni plin pri 1.5 Mpa manometarskog tlaka. Navedeni postupak pružio je iste rezultate kao i uzorak koji se rezao pomoću postupka početnog bušenja. Brzina protoka sekundarne mlaznice namještena je na 650 L/min. Pri debljini 90 mm, manometarski tlak od 1.5 Mpa nije bio dovoljan za početno rezanje te se posljedično tome podigla razina tlaka na 2.0 Mpa. Međutim čak i podignuta razina tlaka nije dovoljna za uspješan rez te se stoga brzina protoka plina sekundarne mlaznice podigla na 830 L/min kako bi se postigao uspješan početni rez. Pri debljini od 100 mm, brzina protoka plina sekundarne mlaznice podignuta

je na 1000 L/min. Kod rezanja pri navedenoj debljini prisutna je velika potrošnja pomoćnog plina. Maksimalna brzina rezanja postavljena je na 10 mm/min.

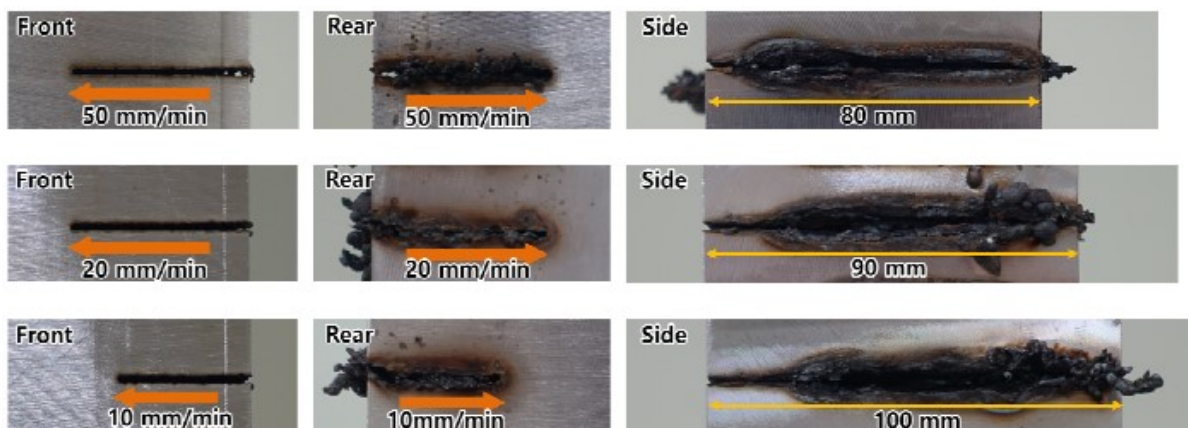


Slika 22. Prikaz rezultata rezanja oba lasera

Izvor: [23]

Na slici 21. prikazani su rezultati na svim debljinama pri različitim brzinama rezanja. Graf prikazuje slične rezultate pri korištenju lasera sa jednom mlaznicom i početnim bušenjem te lasera sa dvije mlaznice bez početnog bušenja, sukladno tome može se zaključiti da uporaba lasera sa dvije mlaznice je nadogradnja u usporedbi sa jednom mlaznicom.

Debljine proreza na prednjoj strani bile su 1.5 – 1.7 mm dok su na stražnjoj strani bile 1.8 – 1.9 mm. Naredna slika prikazuje izreze na uzorcima debljina 80, 90 i 100 mm pri istim brzinama rezanja.



Slika 23. Prikaz uzoraka rezanih sa dvostrukom mlaznicom

Izvor: [23]

Lasersko rezanje ima mogućnost rezanja 10 mm čelika po kW u suhim okolnostima odnosno u zraku. Međutim u podvodnom okruženju, učinkovitost rezanja neizbježno se smanjuje zbog raznih prethodno navedenih razloga. Štoviše putem eksperimentalnih testova dokazala se uspješnost podvodnog rezanja laserima pri snazi 9 kW. Rezanje se vršilo u omjeru 11.1 mm čelika po kW, dakle prilično uspješno. Ukoliko se primjene snage 20 – 30 kW, za očekivati je da bi se debljine 100 mm čelika mogle rezati podvodno pri većim brzinama. Također primjenom takve snage omogućilo bi se podvodno rezanje debljina čak 200 – 300 mm. Takav način rezanja zajamčio bi rezanje svih struktura koje čine nuklearno postrojenje.

Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih testova preporuča se učinkovita metoda za primjenu podvodnog rezanja laserima pri demontaži nuklearnih postrojenja. Inicijalno bušenje debelih objekata sa mehaničkom bušilicom uvelike povećava kvalitetu daljnjeg laserskog rezanja. Ukoliko su rupe već prisutne u objektu, preporuča se rezanje od tih područja. Međutim, ako inicijalno bušenje nije moguće, laser sa dvostrukom ili trostrukom mlaznicom se treba koristiti kako bi se uspješno izveo proces podvodnog rezanja pri većim debljinama. Optimizacija sekundarne mlaznice također je bitna kako bi se smanjila velika potrošnja pomoćnog plina.

3.3. INICIJALNO KUTNO PODVODNO LASERSKO REZANJE

Lasersko rezanje ima raznomjernu primjenu u različitim granama industrije zbog učinkovitog rezanja materijala velikih debljina pri velikim brzinama. Kao što je u prethodnom poglavlju navedeno, tehnologija rezanja laserima ima sve veći utjecaj u grani nuklearne energije kao sadašnji i budući alat za rastavljanje nuklearnih postrojenja. Podvodno lasersko rezanje u principu je teže nego lasersko rezanje u zraku. Za vrijeme trajanja procesa rezanja, potrebno je stvoriti lokalnu suhu zonu kroz koju laserska zraka može proći bez gubljenja snage zbog apsorpcije vode. Štoviše, pomoćni plin mora biti u stanju učinkovito ispuhati rastaljeni materijal koji nastaje pri rezanju, međutim, podizanje zraka zbog uzgona vode otežava prethodno naveden uvjete potrebne za rezanje. U prethodno navedenom poglavlju predstavljena je tehnika podvodnog laserskog rezanja uzoraka čelika debljine do 100 mm, uporabom jednostruke i dvostruke mlaznice lasera snage 9 kW. Međutim, čak i sa primjenom nadzvučne mlaznice, par milimetara od početne točke nisu ostvarene velike brzine rezanja. Ova pojava se također analizirala pri laserskom rezanju u zraku no u podvodnom rezanju je pogoršanje veće.

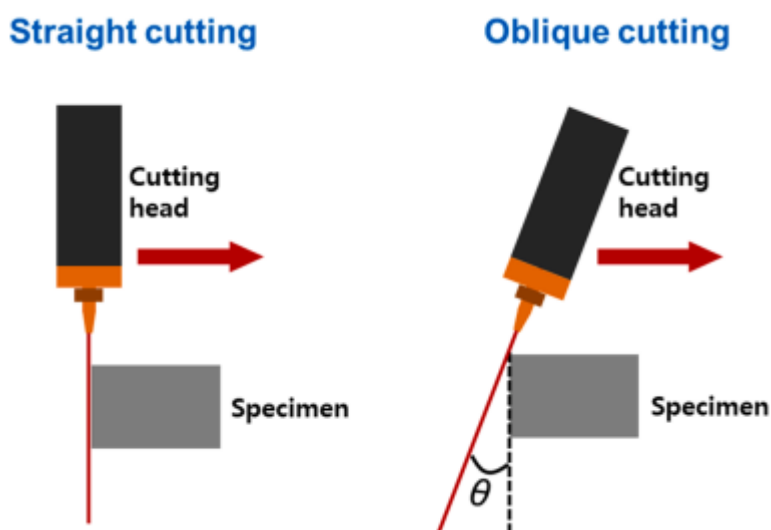
Razloge za lošije inicijalno rezanje može se predstaviti kao slijedeće: pri početku rezanja, trenutnim stupanjem u kontakt sa debelom površinom, laser nije u mogućnosti dovoljno brzo zagrijati hladnu površinu objekta do točke taljenja. Stoga kada je brzina rezanja velika, materijal objekta ne može se brzo taliti. To sprječava tok pomoćnog plina te posljedično rastaljeni materijal nije u stanju ukloniti sa površine objekta. Rezultat ovakve pojave je smanjenje početne izvedbe rezanja. U slučaju podvodnog rezanja navedena pojava dodatno smanjuje početnu izvedbu rezanja zbog prisutnosti visoke otpornosti i hlađenja vode. Kako bi se poboljšala kvaliteta rezanja razvijena je metoda rezanja u 2 koraka, pri kojoj se za početne rezove koristi manja brzina te se naknadno brzina pojačava sa udaljavanjem. Međutim navedena metoda je dugotrajna te zahtijeva velike količine pomoćnog plina zbog korištenja manjih brzina. Pri nekim testovima određeni uzorci nisu uspješno penetrirani čak niti pri malim brzinama stoga se razvila potreba za novom metodom stabilnijeg rezanja.

Kao što je prethodno navedeno, razlog poteškoćama početnog rezanja leži u debljini uzorka s kojom se laser trenutno suočava u početku rezanja. U slučaju postepenog podebljanja uzorka, ne bi postojala potreba za manjim početnim brzinama rezanja. Lasersko zračenje u tom slučaju bi rastopilo tanji dio uzorka brzo te bi pomoćni plin bio

u mogućnosti ukloniti rastaljeni materijal. Rezanje pod kutem nudi isti učinak kao i postupno povećavanje debljine koja se reže, čak i kada je uzorak fiksiran te se debljina ne može mijenjati.

3.3.1. Dizajn i procedura rezanja

Za svrhe rezanja primjenjen je vlaknasti laser dopiran iterbijem, snage 6 kW. Laserska zraka dostavljena je na površinu uzorka kroz procesno vlakno na udaljenosti 20 m. Glava rezanja je vodootporna kako bi se mogla potpuno uroniti u vodu. Sastoji se od kolimacijske leće sa žarišnom duljinom 160 mm i paraboličkim zrcalom sa žarišnom duljinom 600 mm. Promjer laserske zrake je 372 μm [25].

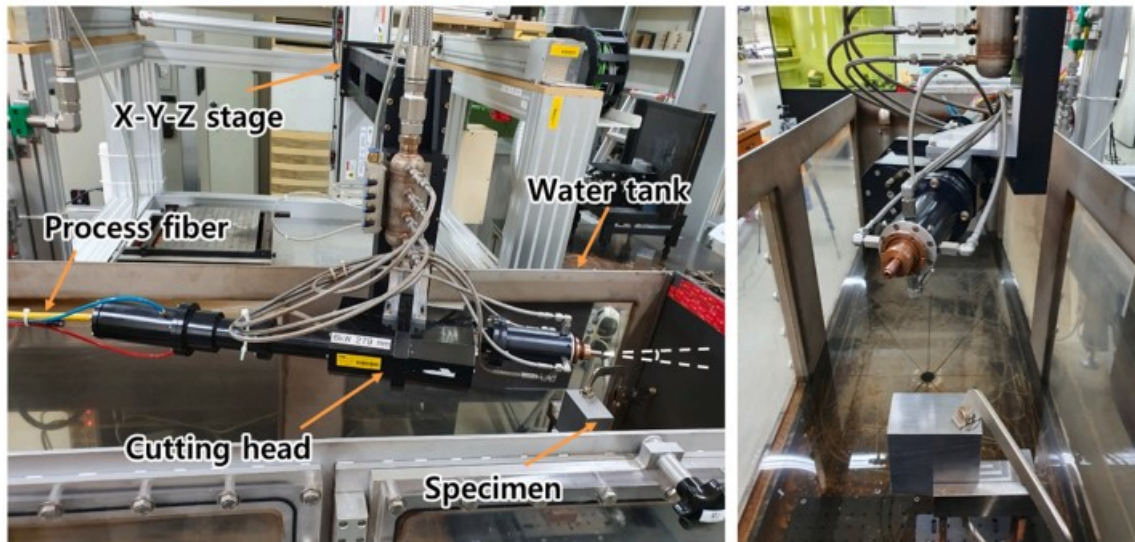


Slika 24. Prikaz dvije različite metode rezanja

Izvor: [25]

Slika 24. prikazuje konceptualni dijagram ravne metode rezanja i pod kutem. Metoda rezanja pod kutem odnosi se na slučaj kada je os laserskog zračenja postavljena na određeni kut. Pri ravnom rezanju, odmah se naiđe na debelu sekciju uzorka, dok kod rezanja pod kutem, debljina uzorka se postepeno povećava. Na sljedećoj slici prikazati će se postava podvodnog lasera. Laserska glava montirana je na X-Y-Z pod određenim kutem, upravljana putem CNC-a (eng. computerized numerical control). Svi procesi

rezanja, uključujući paljenje stroja, kretanje glave za rezanje i uključivanje pomoćnog plina izvršeni su daljinskim upravljanjem.



Slika 25. Prikaz podvodnog lasera za kutno rezanje

Izvor: [25]

Na slici 25. prikazan je laser za kutno rezanje pod vodom sa odgovarajućim dijelovima:

- X-Y-Z stage – struktura
- Water tank – tank za vodu
- Process fiber – procesna vlakna
- Cutting head – glava za rezanje
- Specimen – uzorak koji se reže

Procedura podvodnih testova rezanja je slijedeća: nakon što se uzorak smjesti u tank, navedeni tank se zatim puni sa vodom, u međuvremenu glava za rezanje locirana je izvan vode. U trenutku pokretanja procesa rezanja, pomoćni plin se izbacuje iz mlaznice te se glava za rezanje polako spušta u vodu kako bi dosegla točku rezišta. Nakon dosezanja točke, laser se ozračuje te se kretanjem glave prema bočnom rubu uzorka započinje sa procesom rezanja. Snaga lasera postavljena je na 6 kW. Udaljenost odstupanja odnosno udaljenost od izlaza mlaznice do prednje površine uzorka je 10 mm. Žarišni položaj je udaljenost 16 mm od unutrašnjosti prednje površine uzorka [25]. Suhi komprimirani zrak

korišten je kao pomoćni plin tlaka 1.5 Mpa. Brzina protoka postavljena je na 1310 L/min. Proces rezanja izvodio se na dubini 70-150 mm od površine vode.

Uzorci nehrđajućeg čelika pripremljeni su u obliku pločica dimenzija 120x120 mm, debljine 40-70 mm. Također pripremljeni su uzorci ugljičnog čelika što je najčešći materijal korišten u nuklearnim postrojenjima. Dimenzije navedenih uzoraka su 100x100 mm, debljine 40-70 mm.

3.3.2. Rezanje pod kutem od 5°

Kako bi se ustanovilo poboljšanje izvedbe početnog rezanja pod kutem, testovi su napravljeni na pločicama nehrđajućeg čelika debljina 48, 57 i 67 mm pod kutem od 5°. Pri svakom testu uzorci su rezani na duljini 40 mm pri konstantnoj brzini rezanja kako bi se pronašla maksimalna početna brzina rezanja za svaki uzorak. Maksimalne brzine rezanja su 50, 25 i 15 mm/min za debljine 48, 57 i 67 mm. Dobiveni rezultati maksimalnih brzina prikazuju povećanu brzinu početnog rezanja pri kutnom rezanju od 5° [25].



Slika 26. Prikaz uzoraka izrezanih pod kutem od 5°

Izvor: [25]

Na slici 26. prikazane su prednja, stražnja i bočna strana uzoraka rezanih konstantnom maksimalnom brzinom pod kutem od 5°. Zbog nagiba od 5°, duljina reza stražnje površine je kraća od one na prednjoj površini. Razlika u duljinama odgovara umnošku:

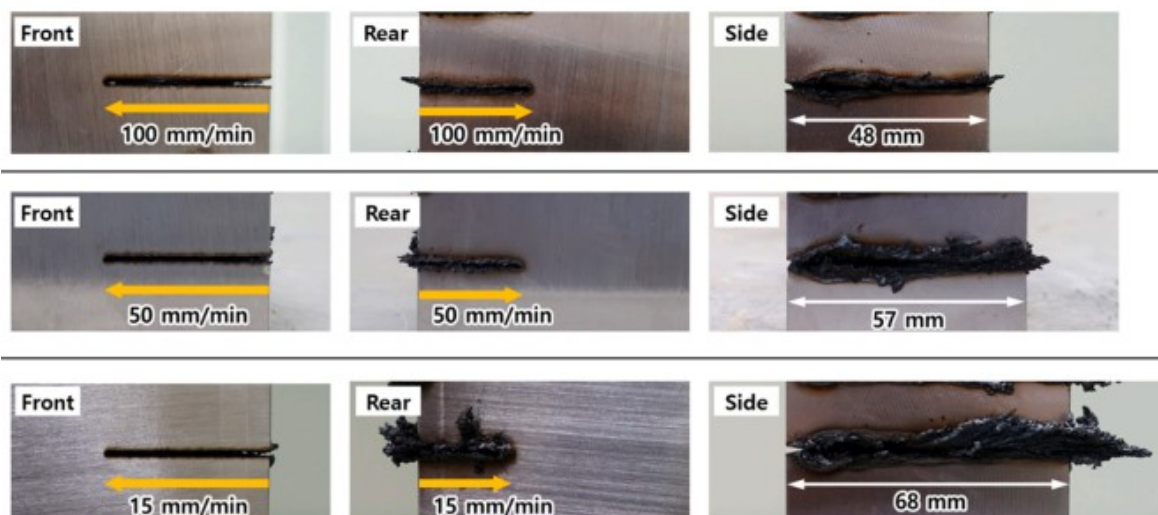
$$t \times \tan\theta$$

Pri čemu je „t“ – debljina uzorka a „θ“ – kut nagiba. Provođenjem testova pri konstantnim brzinama rezanja, uspješno su određene potrebne početne brzine rezanja za uzorke svih triju debljina.

3.3.3. Rezanje pod kutem od 15°

Pri nagibu od 5° prikazano je poboljšanje početne izvedbe rezanja, međutim početna brzina rezanja i dalje je sačinjavala pola od maksimalne brzine rezanja. Povećanjem kuta nagiba, smanjuje se brzina mijenjanja debljine no posljedično se poboljšava početna izvedba rezanja. Pri laserskom rezanju pod kutem od 15° primjenila se konstantna brzina rezanja na pločicama nehrđajućeg čelika debljina 48, 57 i 68 mm. Za svaki uzorak izmjerena je maksimalna brzina rezanja u svrhu procjene početne izvedbe rezanja. Za svaki uzorak postavljena je duljina rezanja 40 mm.

Na uzorcima prethodno navedenih debljina postignute su maksimalne brzine rezanja 100, 50 i 15 mm/min. Na sljedećoj slici prikazane su prednja, stražnja i bočna strana pločica koje su rezane pod kutem od 15°.



Slika 27. Prikaz uzoraka rezanih pod kutem od 15°

Izvor: [25]

Za razliku od rezanja pod kutem od 5°, duljina reza stražnje površine je značajno kraća od duljine na prednjoj površini. Unutarnja širina reza duž debljine gotovo je konstanta te iznosi nešto manje od 2 mm. Iako je rezanje pod kutem od 15° prikazalo dobru izvedbu za početno rezanje, maksimalna brzina rezanja manja je usporedno sa rezanje pod manjim kutem. Razlog tome je razlikovanje efektivne debljine. Navedeni pojam definira se kao percipiranja debljina koja se povećava u usporedbi sa stvarnom debljinom zbog kuta nagiba. Efektivna debljina može se izračunati putem formule:

$$t' = t / \cos\theta$$

Pri čemu „t“ predstavlja efektivnu debljinu, „t“ – debljinu uzorka a „θ“ – kut nagiba. U slijedećoj tablici prikazane su efektivne debljine i maksimalne brzine rezanja za testirane uzorke.

Kut nagiba	Debljina (mm)	Efektivna debljina (mm)	Maksimalna brzina rezanja (mm/min)
5°	48	48.2	120
5°	57	57.2	60
5°	67	67.3	30
15°	48	49.7	100
15°	57	59	50
15°	68	70.4	15

Tablica 1. Prikaz efektivnih debljina i maksimalnih brzina rezanja testiranih uzoraka

Izvor: [25]

3.3.4. Rezanje uzoraka ugljičnog čelika

Testovi podvodnog rezanja također su izvedeni na uzorcima ugljičnog čelika koji je ujedno i najčešći materijal u nuklearnim postrojenjima. Korišteni su uzorci debljina 48, 59 i 69 mm. Primjenjena je konstantna brzina rezanja. Maksimalne dobivene brzine rezanja pri prethodno navedenim debljinama su 40, 15 i 7 mm/min. Dakle poznavajući rezultate dobivene rezanjem uzoraka nehrđajućeg čelika može se zaključiti da je maksimalna brzina rezanja ugljičnog čelika znatno manja od maksimalne brzine rezanja nehrđajućeg čelika. Razlika u maksimalnim brzinama rezanja dvaju materijala također je vidljiva pri laserskom rezanju u zraku, pri snazi lasera 6 kW maksimalna brzina rezanja nehrđajućeg čelika debljine 60 mm je 72 mm/min dok je maksimalna brzina rezanja ugljičnog čelika iste debljine te pri istoj laserskoj snazi, 30 mm/min [25]. Kako bi se otkrio razlog stvaranju razlike u brzinama potrebno je napraviti razne analize poput prijenosa topline, dinamike fluida te topline kemijske oksidacije. Također ugljični čelik ima veću temperaturu taljenja što zahtijeva više energije kako bi ga se rastalilo, štoviše ugljični čelik ima veću toplinsku vodljivost stoga, apsorbirana toplina se vrlo brzo raspršuje u okolinu. Pri podvodnom laserskom rezanju, rasipanje topline i hlađenje od strane okolne vode događa se rapidno što znači da visoka toplinska vodljivost smanjuje izvedbu rezanja usporedno sa laserskim rezanjem u zraku.

Na sljedećoj slici prikazane su prednja, stražnja i bočna strana uzoraka ugljičnog čelika nakon procesa rezanja pod kutem od 15°, pri konstantnoj brzini rezanja. Za svaki uzorak primjenjena je maksimalna brzina rezanja.



Slika 28. Prikaz uzoraka ugljičnog čelika rezanog pod kutem 15°

Izvor: [25]

Unatoč znatnom poboljšanju u izvedbi početnog rezanja, veliki nagib kuta umanjuje krajnju maksimalnu brzinu zbog povećanja efektivne debljine. Međutim implementacijom ovakve metode u praksi, za razliku od X-Y-Z strukture koja nije u stanju mijenjati nagib kuta tijekom procesa rezanja, koristiti će se manipulator poput robotske ruke čije je svojstvo fleksibilno kretanje. U takvom slučaju veliki nagib kuta može se primjeniti za početnu izvedbu rezanja te postepeno smanjivati do 0° . Završni rez tada bi bio ravan. Ovakva metoda omogućila bi postizanje velike brzine početnog i završnog rezanja za čelike velikih debljina.

4. PROCES PODVODNOG LASERSKOG REZANJA POTPOMOGNUTOG VODENIM MLAZOM

Istraživači na svjetskoj akademiji znanosti, inženjerstva i tehnologije, Suhradip Mullick, Yuvraj K. Madhukar, Subhranshu Roy i Ashish K. Nath razvili su proces laserskog rezanja potpomognutog vodenim mlazom u svrhu uklanjanja rastopljenog materijala kroz prerez. U klasičnom podvodnom laserskom rezanju najčešće se koristi plin pod visokim tlakom u kombinaciji sa laserskom zrakom kako bi se stvorila suha zona na površini uzorka koji se reže i uz to izbacio rastopljeni materijal koji nastaje u međuvremenu. Ovakav tip rezanja prouzrokuje mnogo plinskih mjehurića, turbulencija u vodi, aerosola i općenitog zagađenja vode [26]. Navedene posljedice mogu nastati i usput dodatno zagaditi okolnu atmosferu prilikom rezanja radioaktivnih komponenti poput zagorenog nuklearnog goriva.

Proces laserskog rezanja potpomognutog vodenim mlazom stvara znatno manju količinu turbulencije i aerosola u atmosferi. Određena količina mjehurića vodene pare nastaje na sučelju laserske zrake, vode i metala međutim imaju tendenciju kondenziranja prilikom uzdizanja kroz okolnu vodu. Performanse rezanja lasera potpomognutog sa vodenim mlazom slične su onima koje se postižu laserom sa plinskim mlazom, međutim učinkovitost procesa je smanjena zbog toplinske konvekcije koja nastaje vodenim mlazom i raspršenja laserske zrake zbog pare. Ovakav proces potencijalno bi se mogao koristiti u podvodnom rezanju komponenti nuklearnih reaktora.

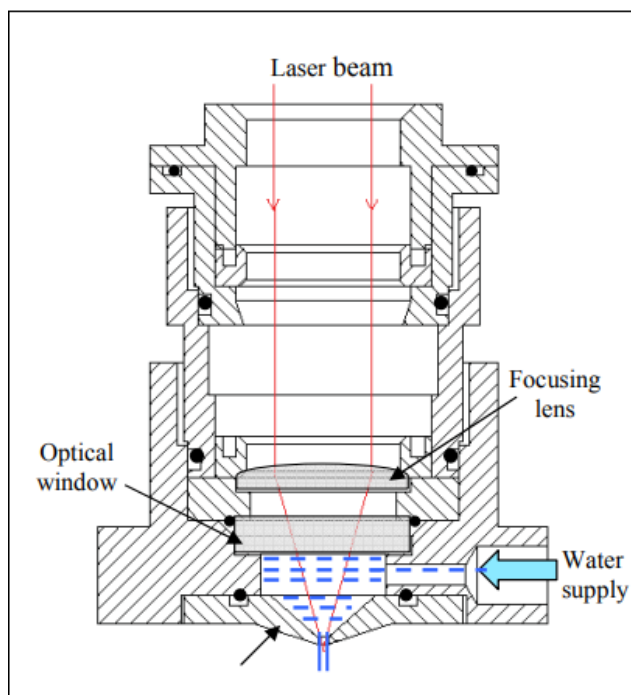
4.1. PRINCIP RADA

Proteklih godina podvodno rezanje laserima privuklo je poveću pozornost zahvaljujući svojstvenim osobinama. Podvodno rezanje laserima pruža veću udarnu silu, snažniji udarni val zbog vodene ograničenosti laserski proizvedene plazme, intenzivne impulse inducirane tekućim mlazom zbog kolapsa mjehurića te kvalitetnije hlađenje.

Lasersko bušenje, rezanje i mikrostrojna obrada krutog materijala poput stakla, aluminija, čelika, silikonskih pločica u vodenom okruženju ima veću brzinu obrade, učinkovitije uklanjanje krhotina, bolju morfologiju površine te manja toplinska zagađenja u usporebi sa navedenim procesima u zraku.

Pri podvodnom rezanju laserima potpomognutim plinom, visokotlačni plin proizvodi visoku turbulenciju i aerosole u vodi. U slučaju rezanja radioaktivnih materijala, navedeni plin može prenositi određenu količinu radioaktivnih čestica izazivajući time kontaminaciju okolne atmosfere. Kako bi se reducirala turbulencija u vodi, izlazak aerosola i plina iz vode, razvijena je tehnika laserskog rezanja potpomognutog vodenim mlazom. Tehnika koristi vodenim mlaz pri velikim brzinama koaksijalno sa laserskom zrakom u svrhu uklanjanja rastopljenog materijala s prednje strane rezanja.

AISI 304 čelične pločice debljine 1.5 mm rezane su pri laserskoj snazi 1800 W, brzina rezanja postavljena je na 1.4 m/min sa brzinom vodenog mlaza 18 m/s [26]. Vodeni mlaz znatno je smanjio turbulenciju u vodi međutim u procesu rezanja povećao se konvektivni gubitak topline odnosno prijenos topline u okolini.



Slika 29. Prikaz sheme lasera sa vodenim mlazom

Izvor: [26]

Na prikazanoj slici navedena je shema mlaznice za rezanje te transmisija laserske zrake kroz vodu. Dijelovi koji sačinjavaju shemu odnosno mlaznicu za rezanje su:

- *Laser beam* – laserska zraka
- *Focusing lens* – objektiv za fokusiranje
- *Optical window* – optički prozor
- *Water supply* – opskrba vodom

Mlaznica obuhvaća ravnokonveksnu leću promjera 25 mm sa 25.4 mm učinkovite žarišne duljine, optički prozor te mlaznicu otvora promjera 1.5 mm. Laserska zraka putuje udaljenost 13.7 mm kroz vodu unutar mlaznice kako bi došla do žarišne točke. Žarišna točka lasera nalazi se 0.5 mm ispod vrška mlaznice. Promjer laserske točke na žarišnoj ravnini izmjeren je da bude oko 600 μm [26]. Veliki promjer žarišne točke je uglavnom zbog sferne aberacije odnosno nejasne slike predmeta koju stvaraju zakrivljena zrcala i velike divergencije laserske zrake koja ima neravnomjernu raspodjelu intenziteta.

4.2. PROCEDURA TESTIRANJA

Dijelovi koji su potrebni za provedbu testiranja su:

- centrifugalna pumpa za vodu maksimalne visine pritiska 3 bara
- tank vode
- komora za obradu

Tank vode koristi se za punjenje pumpe na početku testiranja, nakon toga voda cirkulira kroz mlaznicu za rezanje u zatvorenoj petlji. Maksimalna brzina koaksijalnog vodenog mlaza koja se može dobiti je 19 m/s, ograničena kapacitetom pumpe. Uzorci nehrđajućeg čelika dimenzija 160 mm x 100 mm uzeti su te napravljeni laserski rezovi duljine 80 mm kako bi se napravili različiti skupovi procesnih parametara u svrhu određivanja širine reza i konusa [26]. Proces rezanja započet je nakon prodiranja lasera kroz uzorak. Izmjerene su širine reza donje i gornje površine sa optičkim mikroskopom koji ima mjerač okulara od najmanje 10 μm . Također, napravljeno je lasersko rezanje na potpunoj

udaljenosti povećavajući brzinu rezanja kako bi se ustanovila maksimalna vrijednost na kojoj se uzorak odvaja te kako bi se analizirala njegova parametarska ovisnost.

4.3. REZULTATI TESTIRANJA

Proces podvodnog rezanja potpomognut vodenim mlazim pokazao se blag na površini uzorka te je proizveo znatno manju količinu turbulencije u vodi usporedno sa procesom podvodnog rezanja potpomognutog plinom. Osnovni mehanizmi uključeni u proces su taljenje materijala laserskom zrakom i izbacivanje rastaljenog materijala putem koaksijalnog vodenog mlaza.



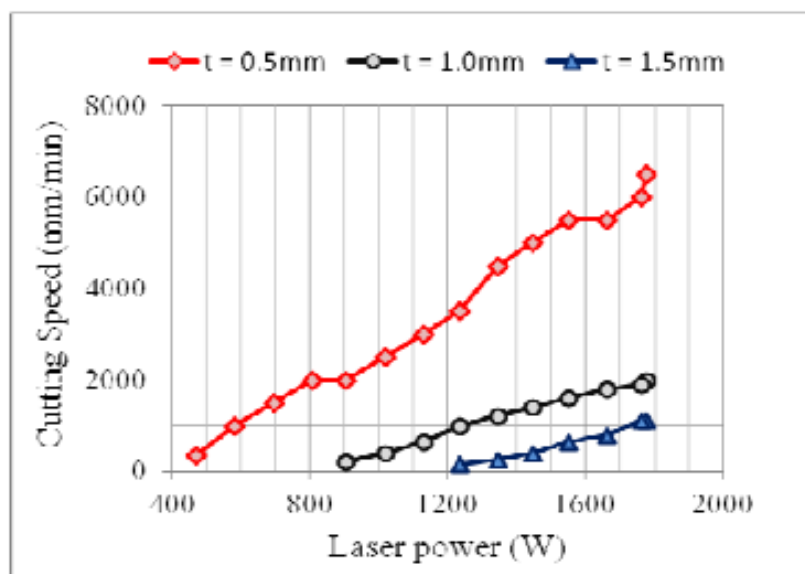
Slika 30. Prikaz usporedbe podvodnog rezanja nehrđajućeg čelika debljine 1 mm

Izvor: [26]

Na gornjoj slici prikazan je proces rezanja nehrđajućeg čelika debljine 1 mm pomoću vodenog mlaza pri laserskoj snazi 1800 W. Na donjoj slici prikazan je proces podvodnog rezanja potpomognut plinom. Očito je kako plinski proces stvara veliku turbulenciju i plinske mjehuriće u vodi usporedno sa vodenim mlazom. U procesu rezanja potpomognutom vodenim mlazom određena količina vode je isparila na sučelju laser – materijal – voda, međutim mjehurići koji su formirani, spremno su uklonjeni sa vodenim mlazom. Određena količina mjehurića kondenzirala se u vodi dok je neznatna količina izašla iz vode.

4.3.1. Brzine rezanja

Prvi skup testiranja izveo se kako bi se utvrdile maksimalne brzine pri rezanju čeličnih uzoraka debljina 0.5, 1.0 i 1.5 mm primjenjujući različite laserske snage na konstantnoj udaljenosti odstupanja 1.0 mm i brzini vodenog mlaza od 18 m/s [26].

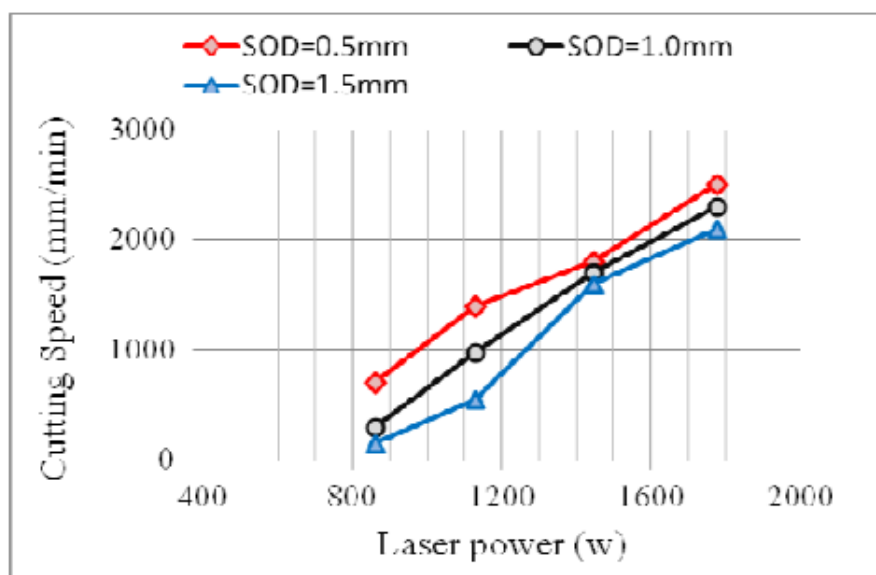


Slika 31. Dijagram varijacija brzine rezanja

Izvor: [26]

Slika 25. prikazuje varijacije maksimalne brzine rezanja usporedno snazi lasera. Proporcionalno povećavanju snage lasera povećava se brzina rezanja pri konstantnoj brzini vodenog mlaza i udaljenosti odstupanja. Za tanji uzorak stopa rasta je najveća.

Variranjem udaljenosti odstupanja i brzina vodenog mlaza proveo se drugi skup testiranja kako bi se utvrdili učinci navedenih variranja na maksimalnu brzinu rezanja. Varijacije su se primjenile u rangu 0.5 – 1.5 mm udaljenosti odstupanja i 15 – 19 m/s brzine vodenog mlaza. Učinak udaljenosti odstupanja na brzinu rezanja prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 32. Dijagram udaljenosti odstupanja

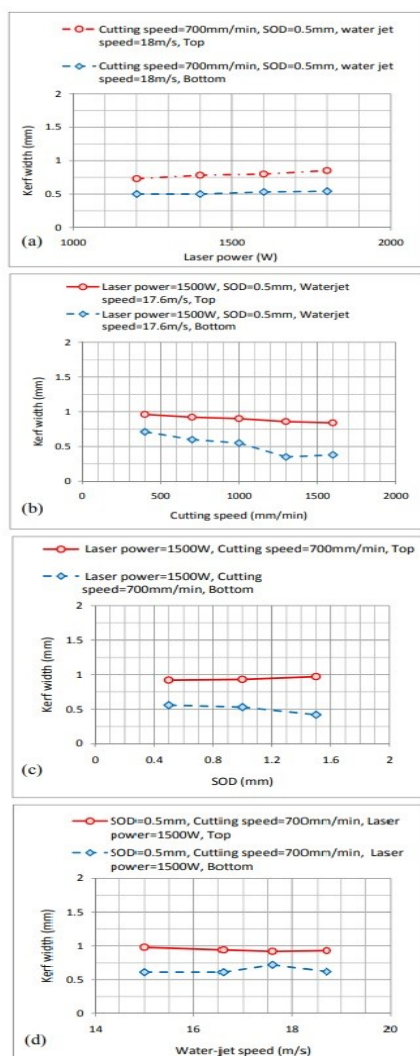
Izvor: [26]

Maksimalna brzina rezanja smanjuje se povećanjem udaljenosti odstupanja. Međutim ovaj učinak istaknutiji je pri manjim laserskim snagama. Povećanjem udaljenosti odstupanja posljedično se povećava promjer laserske točke, samim time smanjuje se gubitak topline pri velikim brzinama rezanja što odgovara laserima velikih snaga. Pri većim laserskim snagama, maksimalna brzina rezanja se povećava što rezultira smanjenju gubitaka topline. Procjena energije razdvajanja u podvodnom rezanju potpomognutom vodenim mlazom pri različitim laserskim snagama ukazuje na smanjenje vrijednosti proporcionalno povećanju snage lasera i brzine rezanja. Uklanjanje konveksnog gubitka topline primjenom vodenog mlaza ima veliki potencijalni učinak što posljedično može smanjiti energiju razdvajanja pri većim brzinama rezanja.

4.3.2. Širina reza

Treći skup testiranja obuhvaća učinke laserske snage, brzine rezanja, udaljenosti odstupanja i brzine vodenog mlaza na širinu reza i uzorke pruga. Provedbom testova vidljive su varijacije na gornjoj i donjoj površinskoj širini zareza. Obje površinske širine povećale su se povećanjem laserske snage gotovo istom brzinom.

Povećanjem brzine rezanja, obje površinske širine su se smanjile, međutim donja širina smanjila se većom brzinom u usporedbi sa gornjom. Povećanjem udaljenosti odstupanja, gornja površinska širina se povećala dok se donja smanjila. Povećanjem brzine vodenog mlaza obrnuli su se rezultati, gornja širina se smanjila dok se donja povećala.



Slika 33. Prikaz dijagrama provedenih testiranja učinaka na širinu reza

Izvor: [26]

Širina reza na obje strane površinskih širina ovisi o:

- promjeru laserske zrake
- laserskoj snazi
- vremenu zadržavanja lasera
- brzini vodenog mlaza
- divergenciji vodenog mlaza

Vrijeme zadržavanja lasera može se protumačiti formulom [26].

$$t_d = d_b/v$$

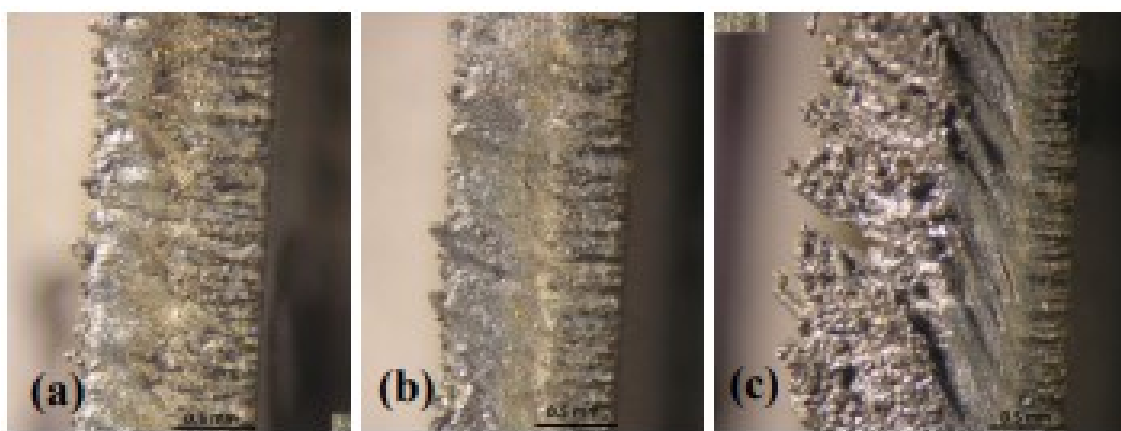
Gdje „ t_d “ označava vrijeme zadržavanja, „ d_b “ – promjer laserske točke, a „ v “ – brzinu laserskog rezanja. Gustoća snage lasera u žarištu usmjerene zrake je maksimalna te se postupno smanjuje duž radijalnog smjera.

Porast temperature površine proporcionalan je umnošku $H_L \times \sqrt{t_d}$ pri kojemu „ H_L “ predstavlja gustoću apsorbirane laserske snage a „ t_d “ je već prethodno navedeno vrijeme zadržavanja lasera. Radijalna udaljenost „ r_m “ predstavlja udaljenost do koje se rastopljeni materijal izbacuje pod pritiskom vodenog mlaza. Taj proces određuje širinu reza. Uvećanje obiju površinskih širina uslijed povećanja laserske snage događa se kao produkt umnoška $H_L \times \sqrt{t_d}$ koji odgovara uvećanju radijalne udaljenosti. Povećanje brzine rezanja „ v “ smanjuje produkt prethodno navedenog umnoška što rezultira u smanjenju radijalne udaljenosti koja se reflektira na širinu reza. Štoviše, povećanjem brzine rezanja, prednja strana ima tendenciju da se nagnje što prouzrokuje smanjenje laserske snage koja prodire do stražnjeg dijela objekta koji se reže. Ovaj proces mogao bi biti razlog u povećanoj smanjenosti širine reza donje površine usporedno sa gornjom pri povećanju brzine rezanja.

Povećanje širine reza na gornjoj površini koje se događa pri povećanju odstupanja udaljenosti povezuje se povećanje promjera laserske točke. Dok smanjenje širine reza donje površine se povezuje sa povećanom smanjenošću pritiska vodenog mlaza na donjoj površini koje se događa zbog povećanog odstupanja udaljenosti. Na slici 27, dijagram „d“ prikazuje da razlike širina reza, povećanjem brzine vodenog mlaza, između dvije površine su suprotne.

4.3.3. Nedostatci primjene vodenog mlaza

Povećanje brzine vodenog mlaza može prouzročiti pojačano hlađenje i veći pritisak vodenim mlazom. Pojačano hlađenje može uzrokovati smanjenje širine reza međutim veći pritisak vodenog mlaza može uzrokovati povećanje širine reza. Prethodno navedene razlike u širini reza mogu se pojasniti dominacijom pojačanog hlađenja nad pritiskom vodenog mlaza pri povećanju brzine vodenog mlaza na gornjoj površini i obrnuto na donjoj površini.



Slika 34. Makrografi porezanih površina sa snagom lasera 1500 W

Izvor: [26]

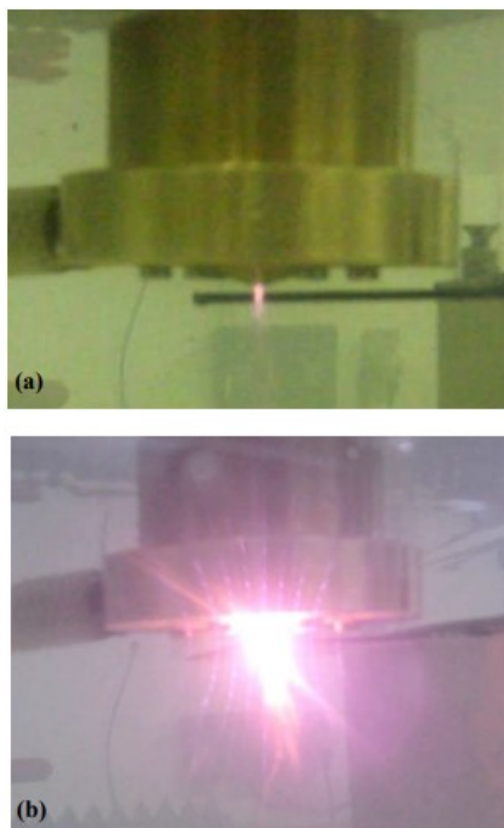
Makrografi izreznanih površina debljina 1 mm, na slici 29. prikazuju uzorke pruga nastale pri različitim brzinama rezanja. Makrografi „a“, „b“ i „c“ predstavljaju površine uzoraka koji su rezani laserskom snagom 1500 W, udaljenošću odstupanja 0.5 mm, potpomognuto vodeni mlazom brzine 18 m/s sa jedinom razlikom u brzinama rezanja odnosno za „a“ – 400 mm/min, „b“ – 700 mm/min i „c“ – 1600 mm/min [26]. Pri manjim brzinama rezanja, uklanjanje materijala je umalo cjelokupno sa malo nečistoća koje se nalaze na donjem rubu. Međutim pri velikim brzinama rezanja, rastopljeni materijal nije u potpunosti uklonjen te se velika količina otpada nalazi na donjem rubu kao što je prikazano na makrografu „c“ slike 29.

Površina koja je laserski rezana ima barem tri posljedična uzorka pruga. Slični uzorci prijavljeni su pri laserskim rezanjima čelika i ostalih legiranih limova upotrebom CO₂, disk i vlaknastih lasera potpomognutih plinom.

Na makrografu „a“, površina uzorka sadrži gotovo vertikalne pruge i rastopljeni materijal se učinkovito uklanja isparavanjem te izbacivanjem pomoću vodenog mlaza. Vrlo malo naknadno stvrdnog materijala se može primjetiti. Izravna apsorpcija laserske zrake i toplinska difuzija određuju debljinu sloja rastopljenog materijala. Okomite pruge ukazuju na neznatnost učinka koji tok rastopljenog materijala ima nad kretanjem fronte topljenja tijekom prodiranja laserske zrake. U uvjetima laserske obrade, temperatura površine može doseći temperaturu vrenja za 80 μ s, zatim slijedi proces isparavanja.

Pruge prikazane na makrografu „b“ su nagnute te kut nagiba laserske zrake raste proporcionalno rastu brzine rezanja. Slična zapažanja prijavljena su pri rezanju legura magnezija vlaknastim laserom. Pored navedene izravne apsorpcije laserske zrake i toplinske difuzije, toplinska konvekcija je važan faktor koji također doprinosi debljini sloja rastopljenog materijala. Rastaljeni i polukruti materijal uklanja se pomoću vodenog mlaza što uzrokuje dublje pruge u usporedbi sa površinom na makrografu „a“. Sežući prema donjem rubu, laserska snaga se smanjuje povećanjem brzina rezanja. Kako se rastopljeni materijal kreće duž površine uzorka tako postaje hladniji i viskozniji te je samim time moguće da se na donjem rubu i ponovno učvrsti. Površina uzorka na makrografu „c“ odnosno treća zona pruga može se okarakterizirati dominacijom naknadno učvršćenog rastaljenog materijala.

Raspršenje laserske zrake jedna je od pojava u procesu podvodnog laserskog rezanja potpomognutog vodenim mlazom. Na sljedećoj slici prikazana su raspršenja laserske zrake prije nego laserska zraka stupa u kontakt sa uzorkom i nakon stupanja u kontakt sa uzorkom. Usporedbom dvaju trenutka može se uočiti da je raspršenje zrake manje u trenutku prije stupanja u kontakt sa uzorkom. U trenutku stupanja u kontakt dolazi do pojave raspršenja i refleksije laserske zrake, zagrijavanja, taljenja i isparavanja na površini uzorka koji se reže. Mjehurići vodene pare raspršuju nadolazeću lasersku zraku te uzrokuju smanjenje laserske snage koja prodire kroz uzorak.



Slika 35. Prikaz raspršenja laserske zrake

Izvor: [26]

Učinak različitih procesnih parametara na performanse rezanja podvodnog lasera potpomognutog vodenim mlazom slične su performansama podvodnog lasera potpomognutog plinom, osim što sa vodenim mlazom postoji dodatni gubitak energije u obliku toplinske konvekcije i raspršenja laserske zrake zbog mjehurića vodene pare. Za daljnji razvoj neophodno je analizirati učinak veće gustoće snage lasera i veće brzine vodenog mlaza na performanse rezanja. Uz navedeno potrebno je istražiti pojave nastajanja i kondenzacije mjehurića vodene pare zajedno sa raspršenjem laserske zrake odnosno zračenja. Kao što je prethodno navedeno, konvektivni gubitak topline izazvan vodenim mlazom i raspršivanje laserske zrake djeluju na smanjenje učinkovitosti procesa rezanja. Međutim učinkovitost se povećava proporcionalno povećanju brzine rezanja pri većim laserskim snagama. Ovakav proces u daljnjem razvoju može imati potencijalnu primjenu u demontaži nuklearnih postrojenja zbog karakteristika proizvodnje značajno manje turbulencije u zraku i aerosola što rezultira ekološki prihvatljivijem rješenju.

5. ZAKLJUČAK

Kao posljedica konstantnog razvoja i velikih ulaganja, pomorska industrija ima vrlo visoke standarde vezane uz stanje i kvalitetu pomorskih objekata. Ispunjenje tehničkih, ekonomskih i ekoloških uvjeta koje industrija postavlja te istovremena težnja smanjenju izdataka kontrole i održavanja ključna je problematika današnjih brodovlasnika i vlasnika pomorskih objekata. Pomorska industrija i sve veća uporaba podmorja zahtijeva uporabu, postrojenja, objekata i plovila čiji se dio infrastrukture nalazi pod vodom. Održavanje navedene infrastrukture iziskuje implementaciju posebnih tehnika, koje su učinkovite te ekonomski i ekološki prihvatljive. Velike količine sredstava investiraju se u energente, mnogobrojna nalazišta tih energenata situirana su ispod vode te se shodno tome tehnike istraživanja i eksploatacije mora razvijaju srazmjerno. Znatan razvoj u održavanju podmorskih konstrukcija primjetan je u posljednjih desetak i više godina. Učinkovito održavanje i prevencija potencijalnih nedostataka ključni su kako bi se izbjeglo ekološka zagađivanja. Strožim ekološkim zakonodavstvom i uvjetima koji se postavljaju vezanima uz globalno zatopljenje i iscrpljivanje naftnih rezervi zbog sve veće potražnje, smatra se da će dekomisija postati jedan od prioriteta mnogih kompanija koje se bave fosilnim gorivima i nuklearnim postrojenjima. Upravo proces dekomisije zahtijeva uporabu razvijenih podvodnih tehnika demontaže.

Za vrijeme pisanja ovog rada postoji nekoliko vrsta podvodnog rezanja koje se učinkovito upotrebljavaju za dekomisiju podvodnih infrastrukture. Tehnika abrazivnog vodenog mlaza, rezanje dijamantnom žicom, rezanje plazma lukom i lasersko rezanje. Međutim u prisutnosti varirajućih geometrijskih oblika i debljina, potreban je jedinstven alat sa fleksibilnom funkcionalnošću koji bi nudio mogućnost daljinskog upravljanja i održavanja. Podvodno lasersko rezanje ima potencijal ispunjavanja navedenih zahtjeva. Nudi mogućnost sigurnijeg rezanja odnosno bez ugrožavanja ronioca, vremenski brže, ekonomičnije i ekološki isplativije. Također ima potencijal razvijanja sustava koji bi nudio mogućnost rezanja pri velikim dubinama što bi uvelike olakšalo proces dekomisije ili održavanja infrastrukture nuklearnih postrojenja i raznih pomorskih objekata.

LITERATURA

- [1] K. Pavić, (2018). Lasersko zavarivanje (završni rad). Preuzeto s <https://repozitorij.vuka.hr/en/islandora/object/vuka%3A1125/datastream/PDF/view>
- [2] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, (2016), „Hrvatska enciklopedija“.
- [3] M. Stipančić, (1977), Laser, fizikalne osnove, konstrukcija i primjena
- [4] Zavod za fiziku i biofiziku, Spontana emisija. Preuzeto s: <http://physics.mef.hr/Predavanja/Laser/main2.html>
- [5] W. Koechner, (1992), Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag.
- [6] S. Skender (2019), Lasersko Rezanje metala (završni rad). Preuzeto s <https://zir.nsk.hr/islandora/object/politehnikapu:158/datastream/PDF>
- [7] Silfast, W, (2004), Laser fundamentals, Cambridge University Press, Cambridge.
- [8] Breck Hitz, C., (2012), Introduction to laser technology, John Wiley & Sons, New Jersey
- [9] McGill, (2006), Ruby laser
- [10] K. Murray, (1997), Nd:YAG laser, Louisiana
- [11] Willet, Colin S., (2014), Introduction to Gas Lasers, Elsevier Science.
- [12] Physics and Radio Electronics. <http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/heliumneonlaser.html>
- [13] A. Patel, (2016), Engineering Science and Futuristic Technology, University of Baroda. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-Argo-Ion-Laser-11-33-Argon-Ion-Laser_fig3_325102420
- [14] Types of Lasers: Definition, Working, Diagram, Applications. <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSjglLrlkAkIBY6oAM0Etjb1O5hjuqzrmzJlY8dDREi8beYUqQ>
- [15] M. J. Weber, (2000), Handbook od Lasers, CRC Press.
- [16] National Institute of Standards and Technology, (2010), Pulse laser.
- [17] Laser Ing, Lasersko rezanje – ključne prednosti i karakteristike. <https://www.laser-ing.hr/blog/lasersko-rezanje-prednosti-i-karakteristike/>
- [18] MediConnect, Use of Laser Technology in Medical Treatments. <https://www.medicalindiatourism.com/blog/cosmetic-treatments/laser-technology-medical-treatments.html>
- [19] Holofiction, Hologram – tehnologija i primjena. <https://www.holofiction.hr/hr/tvrtka/vijesti/sto-je-hologram.html>
- [20] A. Heller, (2005), Orchestrating the world's most powerful laser, Science and Technology review, Lawrence Livermore National Laboratory.

- [21] Diocesi di Prato, (2008), Italy.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/Pulpito_di_prato%2C_restauro.jpg
- [22] Machitech Automation, Introduction to CNC fiber laser cutting.
<https://machitech.com/introduction-cnc-fiber-laser-cutting/>
- [23] J. S. Shin, S. Y. Oh, S. Park, (2020), Underwater laser cutting of stainless steel up to 100 mm thick, vol. 147, Annals of Nuclear Energy, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea.
- [24] Shin, J.S., Oh, S.Y., Park, H., Kim, T.-S., Lee, L., Lee, Chung, C.-M., Lee, J., (2019).
Underwater cutting of 50 and 60 mm thick stainless steel plates using a 6-kW fiber laser for dismantling nuclear facilities. Opt. Laser Technol. 115, 1-8.
- [25] J. S. Shin, S. Y. Oh, S. Park, (2022), Improved underwater laser cutting of thick steel plates through initial oblique cutting, Optics & Laser Technology, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea.
- [26] S. Mullick, Y. K. Madhukar, S. Roy, A. K. Nath, (2013), Development of a water-jet assisted underwater laser cutting process, International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering, vol 7, no 4, World Academy of Science, Engineering and Technology.

KAZALO KRATICA

LASER (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - Uređaj laser

Nd:YAG (eng. Neodymium-doped yttrium aluminum garnet) – Kristal korišten kao medij za krute lasere

UV (eng. Ultraviolet) – Ultraljubičasto zračenje odnosno svjetlost

3D (eng. 3 dimensional) – 3 dimenzionalno

2D (eng. 2 dimensional) – 2 dimenzionalno

FASOR (eng. Frequency Addition Source of Optical Radiation) – Laser za pobudu i otkrivanje natrija u Zemljinoj atmosferi

LIDAR (eng. Light Detection and Ranging) – Instrument koji odašilje laserske zrake

CNC (eng. Computer Numerical Control) – Računalno numeričko upravljanje

RPV (eng. Reactor Pressure Vessel) – Reaktorske posude

RVI (eng. Reactor Vessel Internals) – Komponente koje se nalaze unutar reaktora

RCP (eng. Reactor Coolant Pump) – Reaktorske pumpe za hlađenje

SG (eng. Steam Generators) – Generator pare

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz efektivnih debljina i maksimalnih brzina rezanja testiranih uzoraka.....	41
--	----

POPIS SLIKA

Slika 1. Spontana emisija	4
Slika 2. Prikaz spontane i stimulirane emisije fotona	5
Slika 3. Prikaz Nd:YAG lasera	6
Slika 4. Prikaz dijelova lasera	8
Slika 5. Prikaz rubinskog lasera	9
Slika 6. Prikaz Nd:YAG lasera	9
Slika 7. Prikaz sheme helij-neonskog lasera	10
Slika 8. Prikaz sheme argonskog lasera	11
Slika 9. Shema tekućeg lasera	12
Slika 10. Primjer impulsa kod pulsno lasera	13
Slika 11. Prikaz upotrebe lasera u kirurgiji	16
Slika 12. Prikaz FASOR-a	18
Slika 13. Primjer čišćenja kamena pomoću lasera	19
Slika 14. Prikaz stroja za rezanje pomoću laserskih vlakana	24
Slika 15. Shema korištenog lasera za rezanje	25
Slika 16. Prikaz laserske glave	26
Slika 17. Prikaz procesa podvodnog rezanja laserom	27
Slika 18. Prikaz usporedbe uzoraka	29
Slika 19. Prikaz rezova bez pomoćnog bušenja rupe	30
Slika 20. Prikaz uzoraka na kojima se primijenilo početno bušenje	31
Slika 21. Prikaz lasera sa dvostrukom mlaznicom	32
Slika 22. Prikaz rezultata rezanja oba lasera	33
Slika 23. Prikaz uzoraka rezanih sa dvostrukom mlaznicom	34
Slika 24. Prikaz dvije različite metode rezanja	36
Slika 25. Prikaz podvodnog lasera za kutno rezanje	37
Slika 26. Prikaz uzoraka izrezanih pod kutem od 5°	38
Slika 27. Prikaz uzoraka rezanih pod kutem od 15°	40
Slika 28. Prikaz uzoraka ugljičnog čelika rezanog pod kutem 15°	43
Slika 29. Prikaz sheme lasera sa vodenim mlazom	45
Slika 30. Prikaz usporedbe podvodnog rezanja nehrđajućeg čelika debljine 1 mm	47
Slika 31. Dijagram varijacija brzine rezanja	48
Slika 32. Dijagram udaljenosti odstupanja	49
Slika 33. Prikaz dijagrama provedenih testiranja učinaka na širinu reza	50
Slika 34. Makrografi porezanih površina sa snagom lasera 1500 W	52

Slika 35. Prikaz raspršenja laserske zrake.....	54
---	----