

Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Мерење и управљање

Број индекса: 124/2015

Невена М. Ракоњац

Мерење параметара код сечења материјала

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Фатима Живић

2.

3.

Датум одбране:

Оцена:

Дати преглед алата и уређаја за сечење и који се параметри мере при сечењу и којим методама. Затим приказати преглед параметара који се мере код исеченог материјала.

Препоручена литература:

Богдан Н., Миодраг Л., Обрада метала резањем, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2007.

Миодраг, Л, Неконвенционални поступци обраде, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 1990.

Ментор: Др Фатима Живић

Резиме

У оквиру овог завршног рада приказане су теоријске основе обраде метала сечењем воденим млазом и ласером. Приказан је принцип рада ласера. На практичном примеру параметара приказано је како ласер сече материјал.

Кључне речи: сечење, водени млаз, ласер

Summary

In the framework of this final paper, the theoretical oaths of metal processing by water jet cutting and laser are presented. The principle of laser operation is shown. A practical example of the parameters shows how a laser cuts material.

Key words: cutting, water jet, laser

Садржај

1.	Увод.....	1
2.	Сечење воденим млазом.....	2
2.1.	Обрада чистим воденим млазом	3
2.2.	Обрада Воденим Млазом Са Абразивом.....	4
3.	Сечење ласером	10
4.	Пример параметара сечења ласером.....	25
5.	Закључак	29
6.	Литература	30

1. Увод

Обрада нових материјала класичним поступцима обраде је веома отежана, често и немогућа. Због тога се, паралелно са развојем нових материјала, развијају, усавршавају и уводе нови прогресивни поступци обраде, веће продуктивности и економичности прераде метала. Нови, неконвенционални поступци обраде (НПО), су поступци код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне, нуклеарне и других видова енергије доведених непосредно у процес зону резања. Класификација неконвенционалних поступака обраде је могућа према: врсти енергије и радног (преносног медијума), основним механизмима уклањања вишка материјала, типу извора енергије и слично.

Најчешће се неконвенционални поступци разврставају према врсти енергије и типу уклањања вишка материјала и то на поступке:

- ЕЦМ електрохемијске обраде,
- ЕДМ електроерозионе обраде,
- ЕУС ултразвучне обраде,
- ЕБМ обраде електронским снопом,
- ЛБМ обраде ласером,
- ПЈМ обраде плазмом,
- ЦМ хемијске обраде,
- WJM обраде воденим млазом,
- АЈМ обраде абразивним млазом,
- анодномеханичке обраде,
- обраде у електромагнетном пољу,
- електрохидрауличне обраде,
- обраде експлозијом,
- електромеханичке обраде,
- комбиновани поступци обраде и сл.

У оквиру овог завршног рада приказано је сечење ласером и воденим млазом. У оквиру другог и трећег поглавља дате су теоријске основе сечења помоћу ове две методе. На крају рада у приказан је практичан пример сечења ласером из индустрије.

2. Сечење воденим млазом

Обрада воденим абразивним млазом идеална за резање различитих материјала, тако да све више замењује обраде плазмом и ласером, с тим да има ширу примену јер се воденим абразивним млазом могу обрађивати готово сви метални и неметални материјали, мале и велике тврдоће.

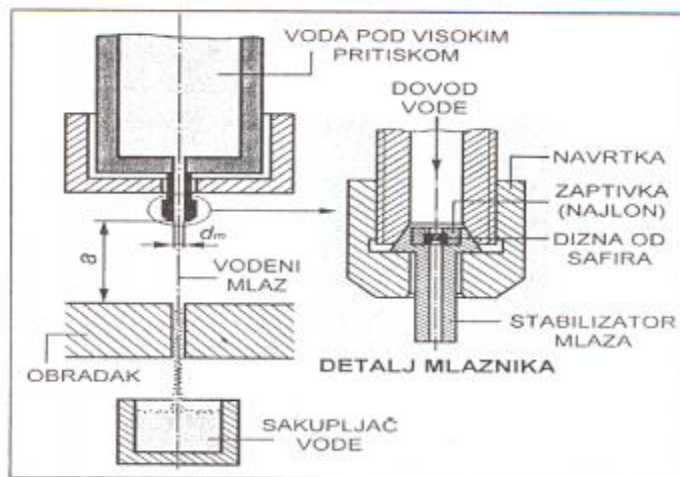
Обрада воденим млазом потиче од хидрауличног ископавања каменог угља у СССР-у и на Новом Зеланду. Вода је сакупљена из речица и усмеравана да испира разнете стене, односећи при том угаљ и комадиће стене. Метод ископавања воденим млазом је касније примењен у јужноафричким рудницима злата. У Русији су 1930. учињени први покушај сечења стена воденим млазом. Водени топ је обезбеђивао притисак од 7000 бара. У Америци је 1970. развијена технологија стварања притиска од 40000 бара. 1972. проф. Роберт Франз из Мичигена радио је са компанијом "MC Cartney Manufacturing Company" на инсталирању првог поступка индустријског сечења воденим млазом. Опрема је инсталирана у компанији "Алтон Бохбоард"-у. Компанија "Flow Industries" је додала песак у постојећу инсталацију за чишћење под притиском, ради добијања завршне беле боје метала. Касније се показало да се воденим млазом са додатком абразива могу сећи метали и керамика. Од тада поступак сечења воденим млазом доживљава процват. Обрада абразивним воденим млазом припада групи неконвенционалних поступака обраде, и већ дуже време се користи у индустрији. Најчешће операције које се овом врстом обраде могу изводити су: сечење, полирање површина, чишћење површина итд. У свим случајевима механизам обраде се заснива на ерозији. Велика предност овог поступка обраде је чињеница да у зони обраде не долази до значајног пораста температуре.

2.1. Обрада чистим воденим млазом

При сечењу чистим воденим млазом, користи се само енергија воденог млаза. Међутим код меких материјала, засек може да износи 0.1 mm. Да би се млаз објединио могу се додавати полимери. Вода пролази кроз отвор дизне брзином три пута већом од брзине звука, тако да и најмања нечистоћа општећује дизну. Из тог разлога улазна вода је посебно третирана са грубим предфилтрима, финим филтрима и са јоноизмењивачком колоном. Да би се, дакле, одржао оштар (јак, снажан) резни млаз у току дужег времена, од највеће важности је непромењена улазна геометрија дизне (млазнице). Радни век дизне при оптималним условима је око 100 сати рада.

Данас се у комерцијалној употреби користе притисци до 400 МПа. Вода под притиском се високопритисним цевима доводи до резне главе, у којој се налази млазница пречника отвора од 0,08 до 0,4 mm. При истицању из млазнице, вода формира танак млаз велике брзине, до 1000 m/s, троструко веће брзине од звука. Сечење чистим воденим млазом највише налази примену за сечење неметала и хране. Примењује се у процесима производње пелена, папира, у аутомобилској индустрији за сечења делова унутрашње декорације, делова од гуме и пластике итд.

Обрадом чистим воденим млазом перформансе сечења код чвршћих материјала знатно опадају. Сечење чистим воденим млазом, при притиску воде од 400 МПа, није погодно за обраду метала због недовољне енергије млаза. Најновије технологије код пумпи великих притиска омогућавају данас и сечење чвршћих материјала као што је алуминијум до дебљине од 4 mm без додавања абразива под притском од 6000 бара. Углавном сечење чистим воденом млазом у индустрији користи се за сечење материјала као што су: хартија, храна, гума, сунђер, фолије и сл.

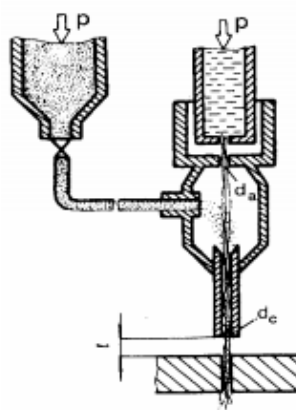


Слика 1. Делови резне главе за обраду чистим воденим млазом [3]

- Применом ове методе не долази до сакупљања топлоте, што је посебно корисно при сечењу челика и других материјала где повећање температуре могу довести до промена особина материјала
- За разлику од сечења на стругу, глодалици и др. Резање воденим млазом не ствара прашину и честице које могу бити веома штетне ако се удахну
- Друге предности јесу сличне предностима које има и резање абразивним воденим млазом
- Једно од главних ограничења јесте ограничен број материјала који могу бити економично сечени
- Дебели делови не могу бити сечени прецизно нити економично
- Тзв. зашиљеност је још један проблем у сечењу под другачијим углом од оног од којим је започео сечење, и тако изазива димензијалну непрецизност

2.2. Обрада Воденим Млазом Са Абразивом

Обрада абразивним воденим млазом је погодна за обраду кртих материјала (стакло, керамика, камен итд.) и композитних материјала. Резање абразивним воденим млазом (енг. АбрасивеЈетМацхининг – АЈМ), је проширена верзија сечења воденим млазом, јер вода у овом случају садржи абразивне честице као што су силицијум-карбид или алуминијум-оксид, у циљу повећања степена отклањања материјала у односу на сечење без абразивних честица. Уско подручје сечења (мала ширина оштрице), и компјутерски контролисани покрети омогућавају да се овом методом произведу делови веома прецизно и економично.



Слика 2. Принцип рада АЈМ методе [3]

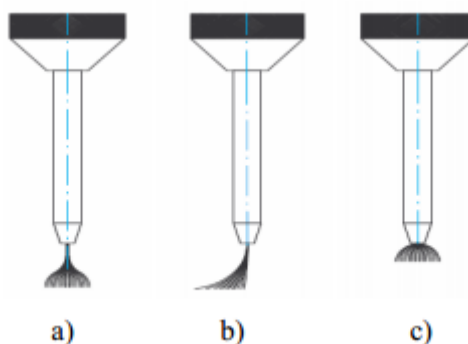
Ова метода обраде је посебно погодна за сечење материјала који не могу бити сечени ласерским или термалним методама. Такође, најпогоднија је за сечење металних, неметалних и напредних композитних материјал без осврта на њихову дебљину. Још једна примена ове методе јесте код материјала осетљивих на топлоту.

Ова метода ради тако што систем под веома великом брзином испушта воду кроз „грлић“ и тако се ствара вакуум који увлачи абразив са абразивне линије, они се мешају у цеви за мешање и формира се сноп абразива велике брзине.



Слика 3. Изглед АЈМ апарата и његови делови [3]

При обради абразивним воденим млазом се користи специјално конструисана радна глава. Вода под високим притиском пролази кроз пригушницу чији је отвор d_a , слика 2.а) и улази у комору за мешање. У комору за мешање се дозира и абразивни прах који се меша са водом. Овако добијена абразивна мешавина пролази кроз пригушницу (млазницу) чији је отвор d_u , и ствара абразивни водени млаз. У зависности од облика абразивног млаза он може бити добар слика 4.а), или лош слика 4.б) и 4.ц).



Слика 4. Облици абразивног млаза
добар, б) и ц) лош [3]

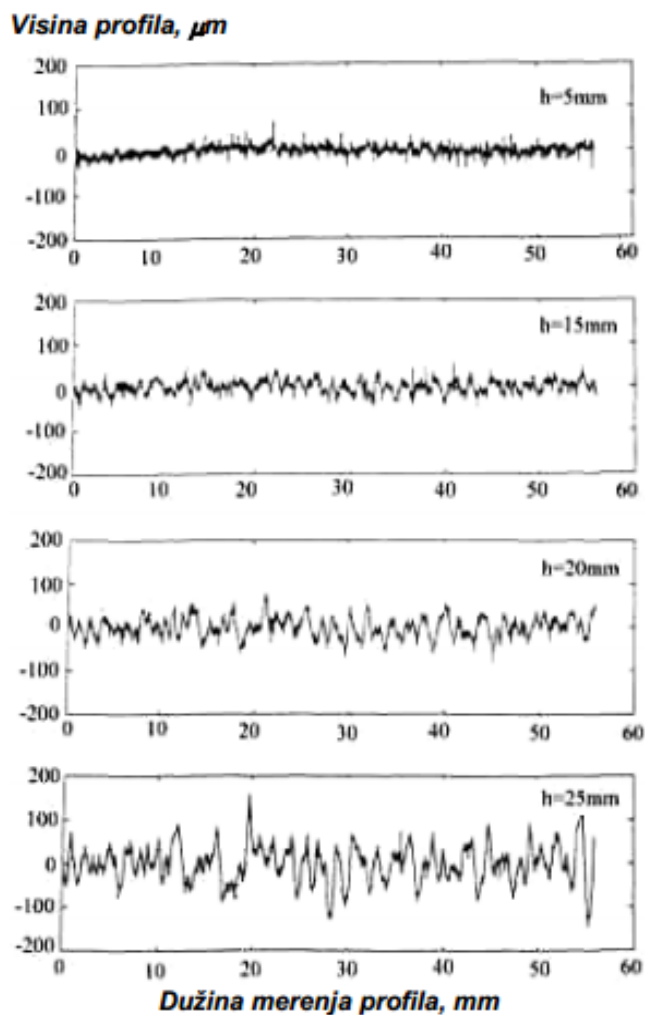
Примена АЈМ методе је веома популарна у аеро-космичкој, аутомобилској и електро индустрији. У аеро-космичкој индустрији делови као што су титанијумска тела војних авиона, делови мотора (алуминијум, титанијум, легуре отпорне на топлоту), алуминијумски делови и делови кабина, сви се праве помоћу ове методе обраде материјала. У аутомобилској индустрији, делови као што су гранири у ентеријеру и делови шасије од фибергласа, као и браници праве се такође овом методом. Слично и у електро индустрији, плоче струјних и неки каблови се праве такође употребом абразивног воденог млаза.

Основне карактеристике површине обрађене абразивним воденим млазом су :

- ширина реза
- коничност реза и
- храпавост обрађене површине.

Све ове карактеристике указују на квалитет обрађене површине. У овом раду, највећа пажња је посвећена квалитету обрађене површине. Као главни параметар за оцену квалитета обрађене површине одабрана је средња висина неравнина R_z , и праћена је промена вредности овог параметра у зависности од појединих параметара који дефинишу обраду абразивним воденим млазом.

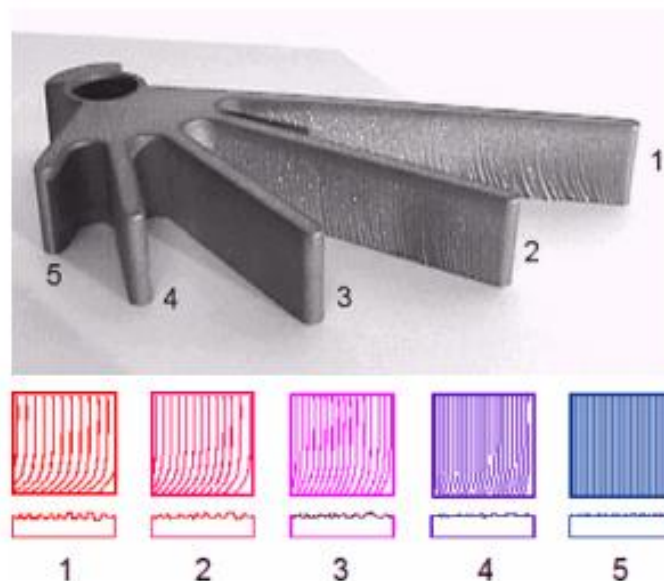
Са слици 5 се јасно види да се карактеристике обрађене површине мењају у зависности од брзине кретања предмета обраде, а са слике 6 се може закључити о постојању велике разлике у висини неравнина у зависности од удаљености од површине материјала који се обрађује, односно од дубине реза. Храпавости, односно висине неравнина профила су знатно мање на мањим дубинама реза, односно већи квалитет обраде је на уласку млаза у материјал него на већим дубинама реза, односно на изласку млаза из материјала.



Слика 5. Профил обрађене површине [3]

Међутим, брзина кретања предмета обраде у дубина реза нису једини параметри који утичу на карактеристике обрађене површине. Карактеристике обрађене површине зависе од низа параметара, као што је радни притисак воде, врста абразива која се користи, удаљеност млазнице од површине предмета обраде, проток абразива, материјал предмета обраде итд. На слици 7 приказан је различит квалитет обрађене површине. Површина 1 се добија када је потребна велика брзина сечења (велика продуктивност) из мали квалитет и тачност обраде. Такође, оваква површина се може добити са великим пречником млазнице, малим или недовољним притиском воде или старом (оштећеном) млазницом. Површина 2 се такође добија када захтеви за толеранцијом дела и квалитетом површине нису доминантни. У овом случају квалитет површине је одређен само брзином већом брзином кретања предмета обраде.

Квалитет површине 3 је најчешће захтеван. У овом случају постигнуто је усклађивање брзине предмета обраде, притиска млаза воде, протока и количине абразива. Квалитет површине 4 је бољи од квалитета површине 3 и добијен је смањењем брзине кретања предмета обраде. Квалитет површине 5 је веома висок и постиже се код високо прецизних делова, али са веома малим брзинама предмета обраде при чему време обраде није критеријум за избор режима обраде.

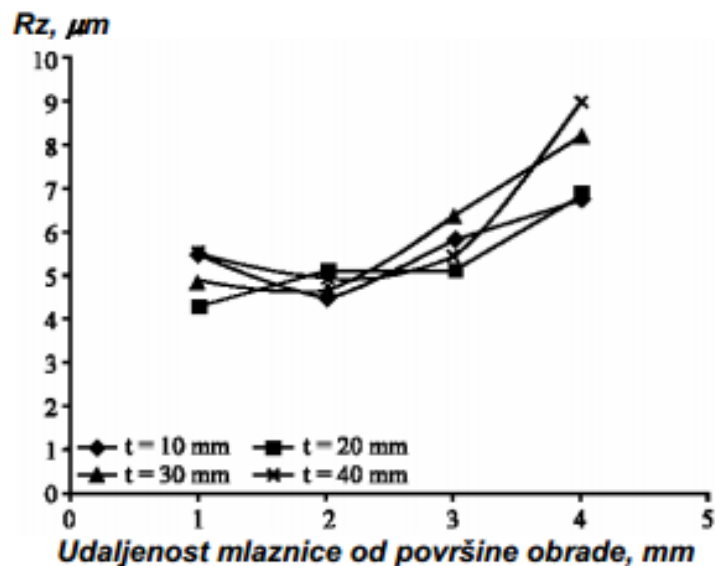


Слика 6. *Различити квалитети обраде [3]*

Утицај параметара обраде абразивним воденим млазом на квалитет обрађене површине је значајан и у оквиру овог рада разматран је кроз испитивања утицаја:

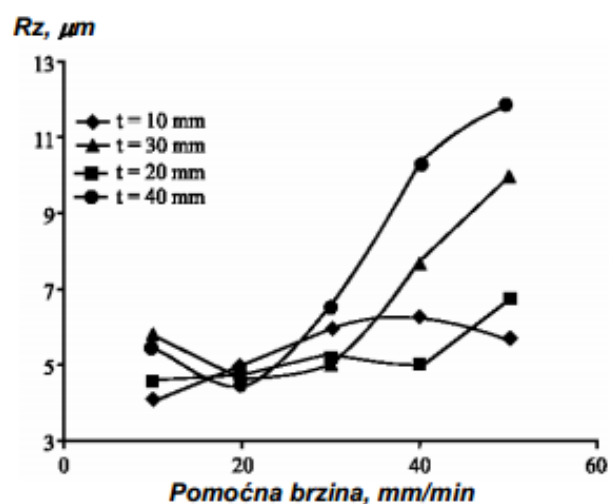
- удаљености млазнице од обрађиване површине,
- помоћне брзина (брзине кретања предмета обраде) и
- радног притиска воде на средњу висину неравнина R_z .

Материјал који је који је коришћен за испитивање је алуминијум са следећим карактеристикама: затезна чврстоћа 90 МПа; модул еластичности 69 GPa и густина 2.71 g/cm^3 . Као абразивно средство је коришћен алуминијум-силикат, финоће 80. На слици 7 је приказан утицај удаљености млазнице од површине обраде на храпавост обрађене површине, на различитим дубинама реза. Уочава се да са порастом удаљености млазнице од површине предмета обраде расте и параметар храпавост обрађене површине R_z . Такође уочава се да параметар R_z нагло расте када се млазница удаљи од обрађиване површине више од 3 mm, тако да храпавост постаје велика независно од дубине реза. Такође, може се закључити да смањивање растојања млазнице од површине предмета испод 2 mm не доводи до смањења храпавости. То значи да постоји оптимално растојање млазнице од предмета обраде, које је у овом случају око 2 mm.



Слика 7. Утицај удаљености млазнице од површине обраде на храпавост обрађене површине [2]

На слици 8 је приказан утицај помоћне брзине на параматар храпавости обрађене површине R_z , на различитим дубинама реза. Са дијаграма се види да се са повећањем помоћне брзине повећава и R_z . За вредности помоћне брзине од 10 mm/min, R_z је дупло мање него за вредности помоћне брзине од 50 mm/min, на истој дубини реза. Може се закључити да са повећањем помоћне брзине храпавост на већим дубинама реза значајно расте, а да у областима мањих брзина помоћног кретања квалитет по дубини реза је приближно константан. Такође, смањењем брзине помоћног кретања испод 20 mm/min, у овом случају не доводи до повећања квалитета обрађене површине.



Слика 8. Утицај помоћне брзине на храпавост површине [2]

3. Сечење ласером

Ласер представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. 1704. године Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Јангов експеримент обављен 1803. године и непосредно откриће поларизације светлости су убедили научнике у оно време да светлост има способност таласања. Максвелова електромагнетна теорија је објаснила појам светлости као брзину вибрација у електромагнетном пољу проузрокованих осциловањем честица. Први ласер је пронађен у Мајамију, маја 1960. године. То је био рубинов ласер изузетне чврстоће. Многе врсте ласера су пронађене ускоро после рубиновог ласера први уранијум ласер у IBM (новембар 1960. године), први хелијум-неонски ласер 1961. године, први Nd laser: YAG ласер и CO₂ ласер 1964. године, Ар ласер 1964. године, хемијски ласер 1965. године. Када познајемо принципе ласера, ово није исувише велико изненађење. Али широки и континуални развој и примена ласера су заиста изванредни и представљају преко чудо.

Ласерски сноп, који емитује ласерско тело разликује се од других познатих видова светлости:

- ласерски зраци су монохроматски, тј. имају само једну одређену таласну дужину;
- ласерски зрак је висококохерентан, са паралелним зрацима исте фазе;
- ласерски зрак може да се фокусира на веома малу површину и да обезбеди високу густину.

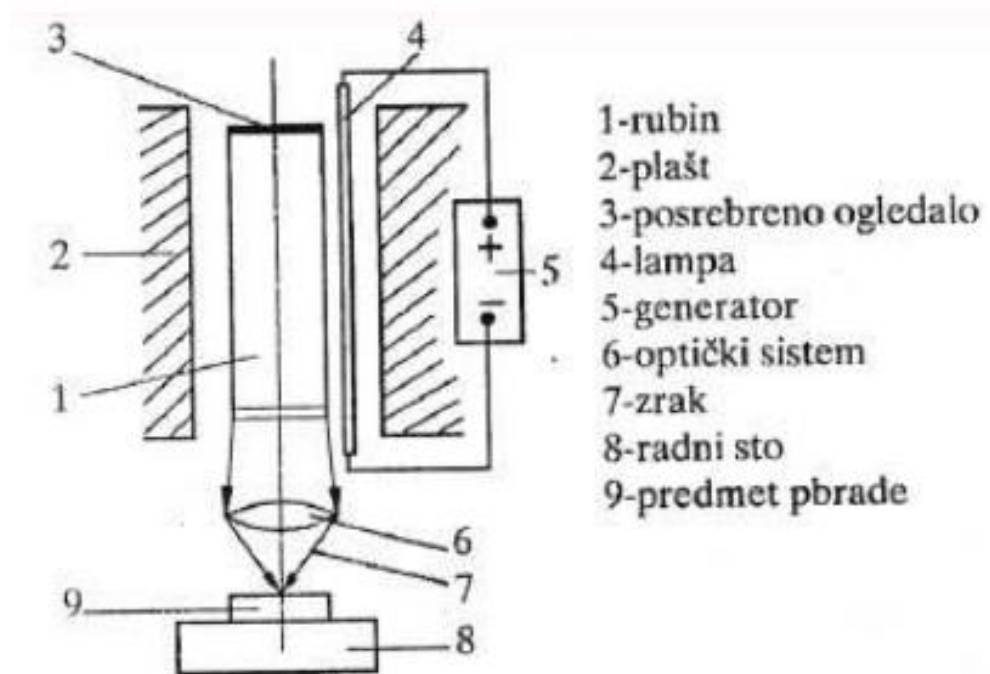
За последњих 16 до 18 година технолошки процеси који се базирају на локалном загревању обрађиване површине помоћу ласера, добијају значајан развој и примену. Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде.

Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине (чврсто тело, течност, гас) да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитује у облику светлосног зрачења део претходно уложене енергије. Код ласера са чврстим емитером, побуђивање зрачења обично се врши претходним обасјавањем активне средине светлошћу лампе блескавице. Код рубинског ласера, на пример, користи се импулсна ксенонова лампа, иако ова лампа емитује светлост у широком интервалу таласних дужина, блиску сунчевој, за постизање ласерског ефекта користи се само уска плавозелена област 560 nm. Због тога, као и због некорисног загревања средине, спонтаног зрачења, губитка у резонатору и активној средини, степен корисног дејства кристалног ласера је мали (1-4%).

Поларни вештачки кристал рубина величине оловке 7 mm и $l=125$ mm, ставља се унутар спиралне импулсне лампе или паралелно са правом лампом. Горње чело кристала је посребрено, а доње је полупосребрено, или се близу чела кристала ставе два квалитетна огледала, строго паралелна и нормална на осу кристала, која представљају оптички резонатор. Око рубинског штапа и лампе налази се плашт са рефлектујућом површином.

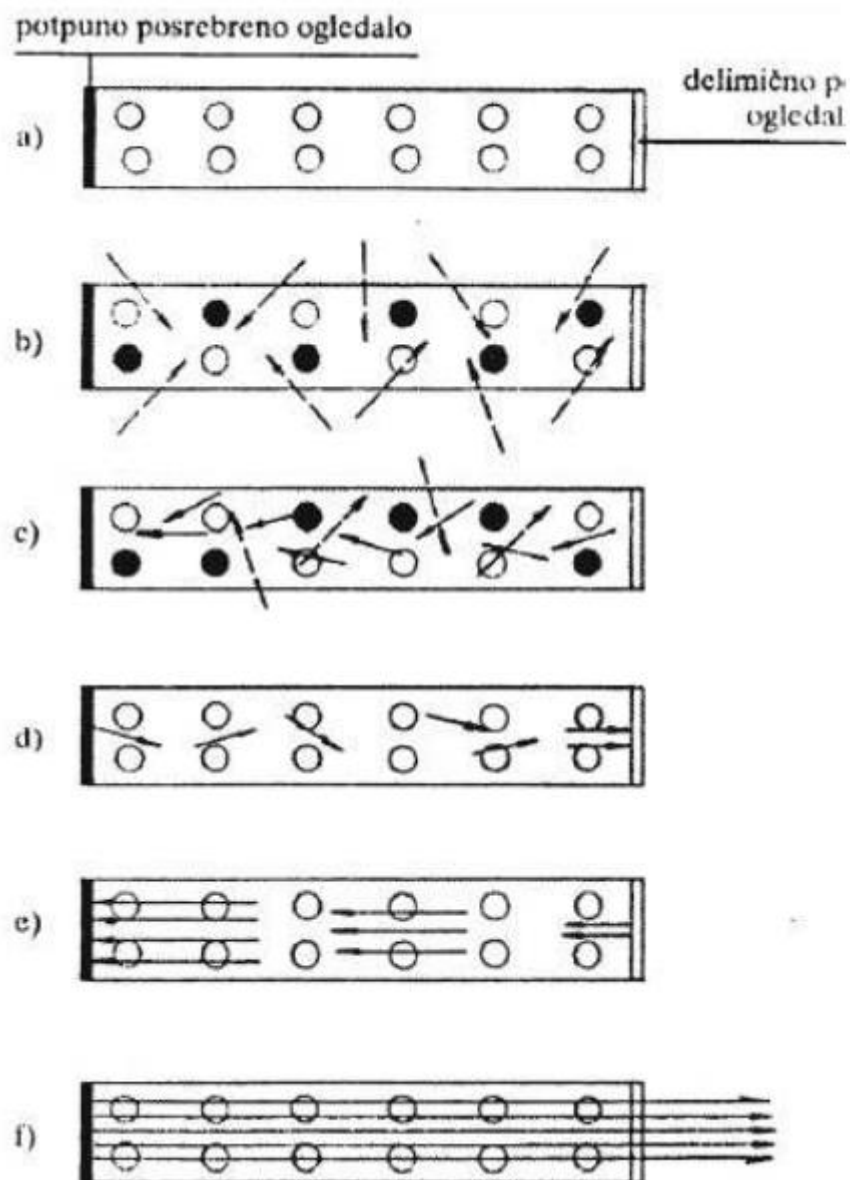
Код савремених ласера сви елементи ласера стављају се у омотач ласера који се хлади

посебним системом хлађења ваздушним или воденим. Импулсна лампа спојена је са импулсним генератором снаге 2-6 kW . Импулсни генератор састоји се од извора напајања високог напона, од 1000 V и више, који преко исправљача напаја батерије кондензатора.



Слика 9. Шема обраде рубинског ласера [2]

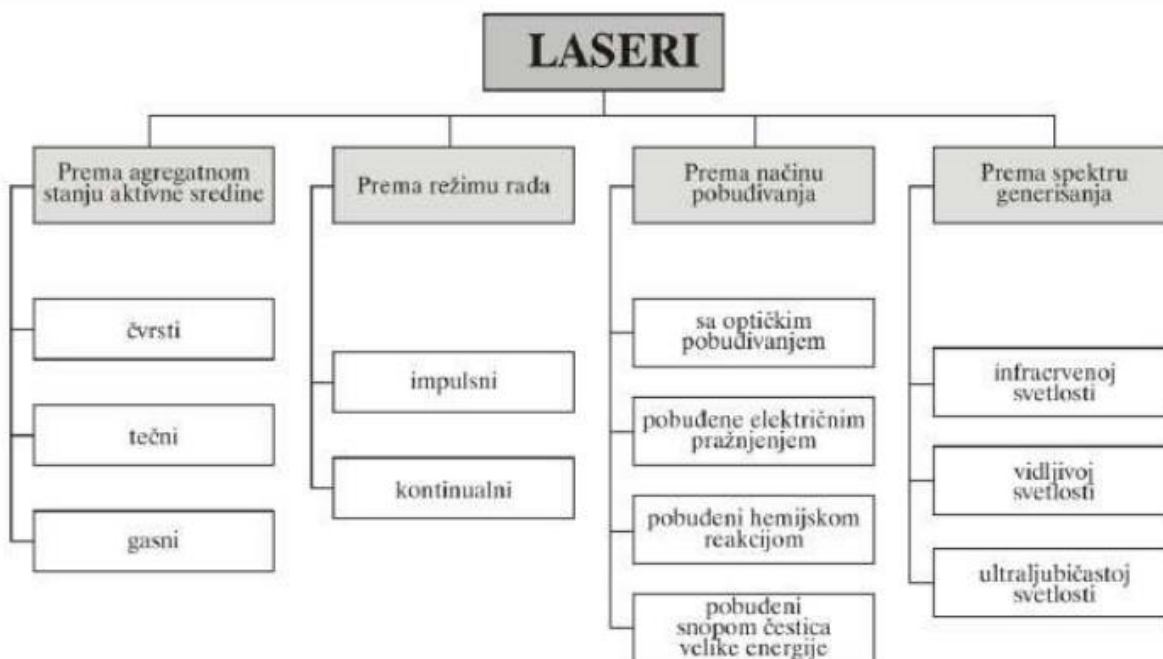
Помоћу оптичког система фокусира се ласерски сноп на предмет обраде постављен на радном столу. До укључења импулсне лампе, јони хрома се налазе у основном стању (бели кружићи). Када се кристал рубина осветли снажном лампом (испрекидане стрелице) јони хрома апсорпцијом упадних фотона бивају побуђени на један од виших енергетских нивоа (б, ц црни кружићи). Са виших енергетских нивоа јони хрома прелазе не зрачећи светлост (вишак енергије се предаје кристалној решетци) на метастабилни ниво. Са метастабилног нивоа врше индуковане прелазе у основно стање и емитују фотоне одређене енергије. Сваки емитовани фотон (црна стрелица) индукује прелаз следећег јона и број фотона се повећава. Ефекат појачања постоји за оне фотоне који се крећу паралелно оси цилиндричног кристала (д, е). Након неколико узастопних рефлексија на чеоним плочама снажни флуks фотона пролази кроз полупосребрено оледало (ф).



Слика 10. Појаве које се дешавају у рубинском ласеру [2]

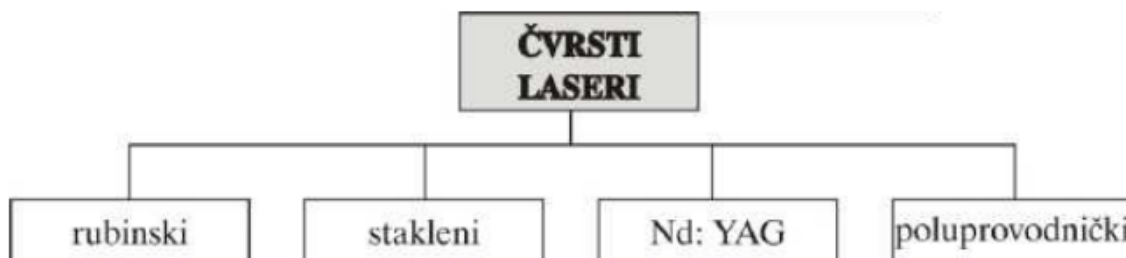
Постоји више критеријума за поделу ласера. На слици 11 приказана је најчешћа подела.

- ЧВРСТИ ЛАСЕРИ: Рубински ласер, Стаклени ласер, Полупроводнички ласери.
- ТЕЧНИ ЛАСЕРИ: Ласери на бази неорганске течности, Ласери на бази органских боја.
- ГАСНИ ЛАСЕРИ: CO₂ ласер.



Слика 11. Подела ласера [2]

Ласери са чврстим телом нашли су примену у обради метала и неметала. На слици 12 дата је подела чврстих ласера.



Слика 12. Подела чврстих ласера [2]

Као активна средина код ласера на бази чврстих тела користи се кристално или аморфно тело. Чврста тела имају знатно већу концентрацију активних честица него гасови.

Због тога је насељеност енергетских нивоа у чврстим телима много већа од насељености енергетских нивоа у гасовима. Чврсто тело као оптичка средина има мању оптичку хомогеност него гасови, што условљава веће дисперзионе губитке светлости и смањење квалитета резонатора при његовој већој дужини, па зато нема смисла производити активне елементе веће дужине. Активни елементи ових ласера не прелазе дужину од 60 цм за оптички најхомогеније материјале.

Међу ласерима са чврстим телом најпознатији је рубински ласер. Он је израђен на бази ласерског тела од кристалног синтетичког рубина (Al_2O_3) у виду цилиндра (10 x 10 mm) са додатком

0.5 % тровалентног хрома. Рубин је минерал бледо ружичасте боје до јарко црвене боје, при чему преовладава црвена боја таласне дужине светлости 0.6943. . Рубински ласери могу да раде у импулсном (са енергијом од неколико Ј) и континуалном режиму (са енергијом до 100 Ј).

Рубински ласер је први ласер који је почео да се користи за бушење дијаманта и алата за извлачење танке жице. Овај ласер у машинству се користи за бушење малих отвора код различитих материјала и за тачкасто заваривање.

Стаклени ласери се састоје од високопрозрачног стакленог тела у коме су дисперзно распоређени јони ниодијума, као активна средина. Постоје два вида стаклених ласера:

- ласери од силикатног стакла
- ласери од фосфатног стакла.

Стаклени ласери имају релативно висок коефицијент корисног дејства (до 3 %) при малој енергији импулса од 20 Ј. Израда тела стаклених ласера је једноставна, при чему могу да се израде и релативно велика ласерска тела, а да се повећа излазна енергија ласера до преко 1000 Ј . Међутим, стакло има лоша термофизичка својства (слаба топлотна проводљивост и отпорност), због чега се не може радити са великим фреквенцијама. Осим тога стакло одликује велика оптичка разнородност (нарочито силикатна стакла), па нагомилавање излазне енергије води ка повећем растурању ласерског снопа.

ND YAG ласер

Један од најважнијих ласера који има многобројне индустријске и научне примене је ND: YAG ласер (неодијумски ласер). YAG је скраћени назив за итријев алуминијев гранат који представља најчешћи извор ласерског зрачења. YAG спада у групу врло тврдих материјала. Захваљујући високој тврдоћи обрада YAG-а је отежана, јер захтева дијамантска средства.

YAG ласер одликује висок а прозрачност и висок степен полирања. Његова значајна предност у односу на рубинске, а нарочито у односу на стаклене ласере, је висока топлотна проводљивост и отпорност, као и мала осетљивост на високе температурне градијенте, чиме је омогућено његово интензивно хлађење. Захваљујући оваквим термофизичким својствима овај ласер може да ради како у импулсном, тако и у континуалном режиму рада. У импулсном режиму овај ласер ослобађа енергију од неколико стотина mJ у основном моду. У континуалномрежиму снага његове емисије је између 1 и 20 W .

ND YAG ласер је карактеристичан по облику, јер се израђује у облику штапова са полираним крајевима, што захтева посебан технолошки поступак.

Као активна средина у ласерима на бази течности користе се раствори неорганских једињења ретких елемената и раствори органских боја. Разликује се две врсте ласера на бази течности:

- ласери са растворима неорганских једињења и
- ласери са растворима органских једињења.

У ласерима на бази течности постиже се иста концентрација активних честица као и у активној средини на бази чврстих тела, тако да се може добити велика енергија зрачења по јединици запремине. Течност је оптички хомогенија од чврстог тела, па су зато у течности мањи губици зрачењ а него у чврстим телима, у којима постоје разни дефекти у структури. Хлађење течности као активне средине врши се циркулацијом што представљ једноставну и ефикасну методу. Недостатак ласера на бази течности представља временска нестабилност раствора. У раствору се већ након 1 до 2 месеца стварају талози који битно смањују ласерско зрачење.

Избором органског једињења постиже се одговарајуће таласно подручје у којем ласер може да зрачи, а укључивањем селектовних елемената у резонатор постиже се ласерско зрачење на жељеној таласној дужини унутар таласног подручја. Овакви ласери могу радити и у континуалном и у импулсном режиму, док се ласери са неорганским растворима користе само у импулсном режиму. Побуђивање ласера на бази течности врши се оптичким пумпањем.

Ласери на бази органских боја представљају нову врсту ласера која се својим специфичним особинама издваја из групе течних ласера. Карактерише их могућност континуалног мењања таласне дужине ласерске емисије у широком интервалу, што је последица особине органских боја да поседују релативно узане ласерске прелазе. Као органска једињења која називамо органским бојама, а користе се као активна средина, најчешће се употребљавају: родамин 6Г, родамин 6, кумарин 2, кумарин 6, итд. Органске боје су сложена органска једињења која јако апсорбују видљиву светлост. Већина боја у растворима има јонски карактер. Активна средина, у овом случају органска боја, растворена је у погодном растварачу. Као растварач користе се алкохол, бензин, етанол али је у употреби и пластика са диспергованом бојом. У првим типовима оваквих ласера побуда се вршила помоћу рубинских ласера, али се касније показало да се пумпање може остварити и помоћу бљешталица.

Постоји више врста ласера, који се међусобно разликују по врсти гаса који образује активну средину, те по начину остваривања средине са инверзном насељеношћу. У односу на остала тела гасови имају тачно одређене енергетске нивое појединих атома или молекула, па зато постоји низ могућих прелаза са нивоа на ниво у различитим гасовима. Друга карактеристика гасова је њихова оптичка хомогеност. Густина гаса је мала, па због тога у гасовима не долази до дисперзије светлости и изобличења светлосног зрака. Управо ова особина гасова дозвољава да растојање између огледала у оптичком резонатору гасних ласера буде велико, чиме се лакше постиже монохроматичност и бољ усмереност ласерског зрака. С друге стране, гас као активна средина има и одређене недостатке: густина гаса је знатно нижа од густине чврстих тела, па се зато у јединици запремине не може постићи велика количина побуђених атома који емитују светлост, као у чврстим телу. Због тога се у гасним ласерима не може постићи импулс велике снаге као у чврстим телима. Инверзна насељеност у овим ласерима постиже се побудом атома или молекула гаса при њиховом судару са брзим слободним електронима за време пражњења гаса. Притисак гаса у оваквим ласерима износи од 10^{-3} до 10^{-2} Ра.

У пракси разликујемо три типа ласера на бази пражњења гасова:

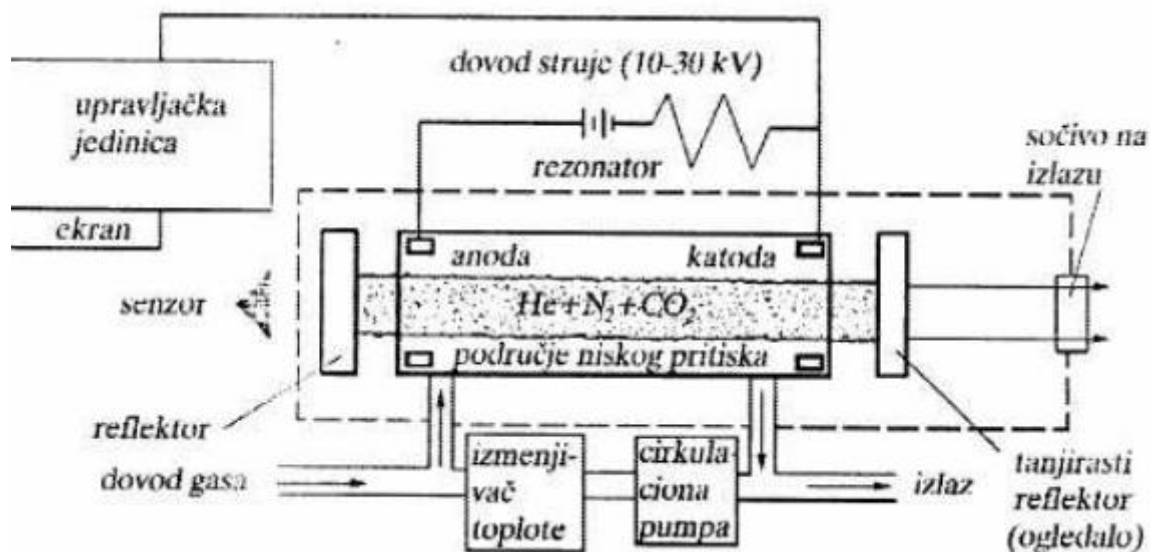
- ласере са неутралним атомима,
- јонске ласере и
- молекуларне ласере.

Ови ласери се међусобно разликују по механизму настајања инверзне насељености и по таласној дужини зрачења. Тело CO₂ ласера се састоји од гасне смеше CO₂, He и N₂, при чему активну средину чине молекули CO₂. На слици 12 приказана је принципијелна шема CO₂ ласера. CO₂ ласери се одликују високом монохроматичношћу и великим коефицијентом корисног дејства.

Повећање температуре гаса на ласерско тело, које доводи до електричног пражњења, води ка изразитом смањењу излазне снаге, због чега је потребно интензивно хлађење гасне смеше. Према начину хлађења, CO₂ ласери се деле на:

- ласери са дифузним хлађењем и
- ласери са конвенционалним хлађењем.

При дифузном хлађењу, гасна смеша се хлади хлађењем ласерског тела, а приконвенционалном хлађењу, изменом гасне смеше у ласерском телу а потом њеним хлађењем.



Слика 12. Принципијелна шема CO₂ ласера [2]

Према начину протока гасне смеше низ оптички резонатор и према правцу електричног пражњења низ гасни флуид, разликују се више врста CO₂ ласера:

- ласери са аксијалним електричним пражњењем и аксијалним протоком гаса,
- ласери са аксијалним електричним пражњењем и аксијалним брзим протоком гаса,
- ласери са трансферзалним електричним пражњењем и трансферзалним протоком гаса и

- ласери са трансферзалним електричним пражњењем и трансферзалним протоком гаса, са претходном јонизацијом гаса.

Енергија протока гаса, неопходна за процес електричног пражњења, је знатно већа од потребне енергије. Једна од ефективних метода за решавање овог проблема је да се изврши претходна јонизација гаса, а самим тим да се смањи напон електричног пражњења.

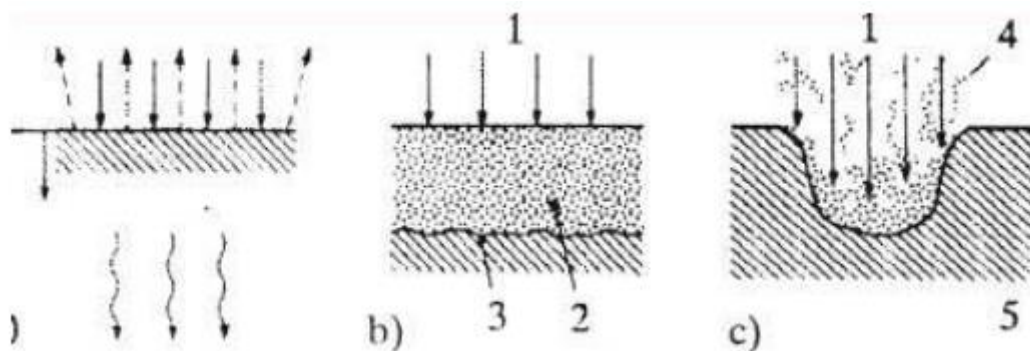
Ефикасност CO₂ ласера је знатно изнад оне која се к реће код других типова ласера. Ови ласери могу да емитују велике снаге. За постизање великих снага израђују се ласери великих дужина

При судару ласерског снопа са непрозирним чврстим телом, на његовој површини и у подповршинским слојевима (на одређеној дубини) се одигравају различити физички процеси. Под његовим утицајем долази до интензивног површинског загревања материјала предмета обраде, топљења и испаравања материјала предмета обраде. Стога се, дејство ласерског снопа на материјал предмета обраде, може поделити у неколико карактеристичних фаза:

- рефлексија (одбијање) ласерског снопа од површине,
- апсорпција ласерског зрачења по површинским слојевима предмета обраде и трансформација фотонске енергије у топлотну,
- загревање озрачене површине, са растапањем и испаравањем површинских слојева,
- уклањање продуката разарања и
- хлађење површине материјала предмета обраде, по престанку дејства ласерског зрачења.

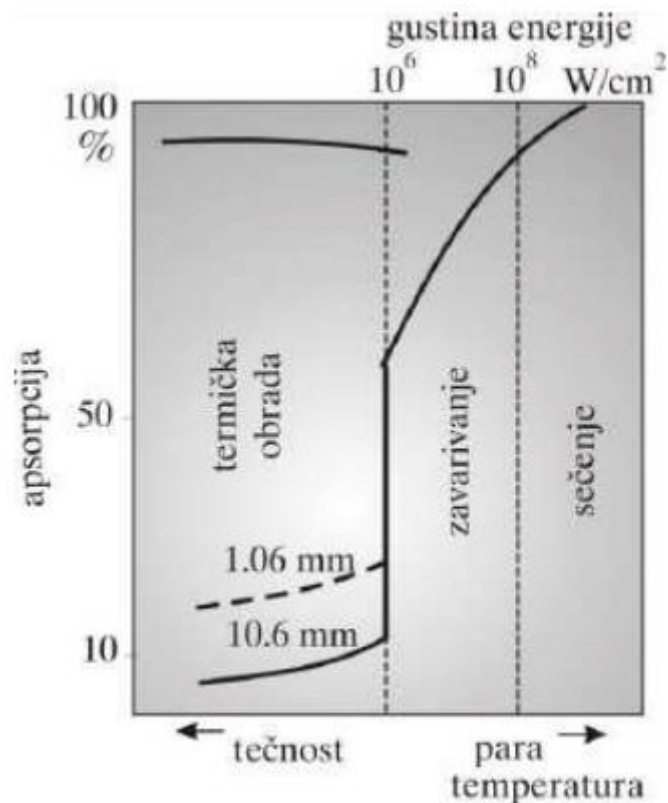
Поред наведеног, истовремено се одвијају и други процеси (хемијски процеси и фазна трансформација), који битно утичу на карактер дејства ласерског зрачења.

Део ласерског снопа што пада на површину предмета обраде, апсорбује се у унутрашњост материјала на одређеној дубини, а део се одбија (рефлектује) од површине.



Слика 13. Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом а) рефлексија и апсорпција, б) топљење, в) испаравање 1 ласерски зраци, 2 стопљени материјал, 3 гранична зона између чврстог и стопљеног материјала, 4 одношење материјала, 5 предмет обраде [2]

Количина ласерског снопа која се одбија, зависи од таласне дужине светлости, густине снаге ласерског зрачења, топлотне проводљивости материјала предмета обраде, специфичне енергије потребне за одређену обраду итд. У одређеним случајевима, висока рефлексија на многе материјале при одређеној таласној дужини ласерског зрачења, доводи до тога да је материјал непогодан за обраду ласером. На слици 14 приказана је зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала.



Слика 14. Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала [2]

Карактеристично је да коефицијент апсорпције и рефлексије, са једне стране, зависе од карактеристика извора ласерског зрачења и оптичког система, а са друге, од особина обрађиваног материјала. Апсорпција зависи и од стања површине предмета обраде параметра храпавости, предходне обраде, нечистоће, оксидних превлака, итд, као и од режима обраде брзина померања снопа ласерских зрака, димензија светлосне мрље. Повећањем брзине обраде и пречника светлосне мрље, може се битно повећати апсорпциона способност. У циљу повећања ефикасности обраде ласером може се вештачки снижити рефлексиона способност повећањем храпавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака.

Основне карактеристике сечења ласером од којих зависе технолошке карактеристике обраде (продуктивност, тачност и квалитет обраде, као и дубина и ширина реза), су дефинисане следећим параметрима:

- снага импулса P , W ,
- густина ласерског снопа q_s , W/cm^2 ,
 - притисак гаса P , bar ,

- врста гаса,
- величина фокусне тачке d , mm,
 - брзина сечења V , mm/s,
- тачност померања ласерског снопа по предвиђеној контури и др.

Ласер производи кохерентан светлосни сноп ласерских зрака великог интензитета енергије кога карактерише правост и мала дисперзија. У интеракцији са предметом обраде, ако је енергија већа од способности материјала предмета обраде да рефлектује, пренесе или распе ову енергију, долази до апсорпције светлосне енергије и њеног претварања у топлотну енергију, односно до пораста температуре на озраченом месту. При знатном порасту температуре долази до појаве локалног топљења или испаравања материјала, што зависи од интензитета генерисане топлоте и доводи до стварања рупе или отвора у предмету обраде. Померањем ласерског зрака или предмета обраде настаје процес ласерског сечења. На слици 15 приказано је сечење ласером.

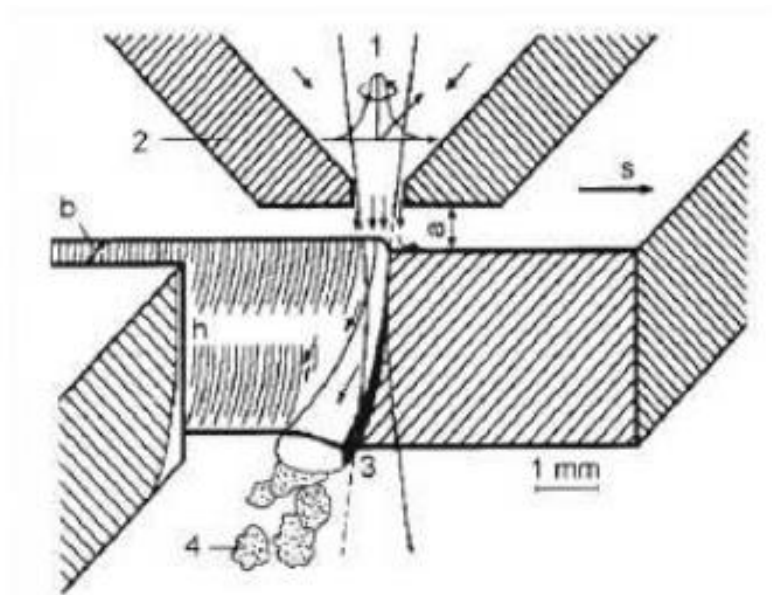


Слика 15. Сечење ласером

У много случајева нефокусирани сноп ласерских зрака индустријских ласера веће снаге, нема адекватну енергију да учини нешто више сем да загреје озрачену површину материјала предмета обраде. Међутим, ако се сноп усмери кроз сочиво за фокусирање, енергија је концентрисана на површину пречника мањег од 0.25 mm, што производи снагу од преко 106 W, способну да истопи многе материјале. Ласерске машине поред топлоте добијене фокусирањем снопа ласерских зрака користе и помоћни гас који има задатак да одстрани истопљени материјал из зоне сечења, да заштити сочива од испарења и помогне у процесу сагоревања.

Са технолошке тачке гледишта, процеси сечења ласером доводе до пуног изражаја термичке ефекте (загревање, топљење, испаравање, термичко распадање и ерозија), који настају ласерским зрачењем.

Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. На слици 16 дат је шематски приказ процеса сечења ласером.



Слика 16. Шематски приказ сечења ласером [2]

Методe сечења ласером

Постоје три методе сечења ласером:

1. Са потпуним одстрањивањем материјала дуж линије раздвајања (испаривањем и, што је чешћи случај, топљењем и ограниченим испаривањем);
2. Са делимичним одстрањивањем материјала дуж линије раздвајања (испаривањем материјала до одређене дубине и накнадним одвајањем материјала механичким дејством);
3. Без одстрањивања материјала дуж линије раздвајања (контролисаним ломљењем у чврстом стању, под дејством и у току озрачења ласером или контролисаним ломљењем у чврстом стању, под дејством механичке силе, примењене по озрачењу ласером).

За сечење метала се најчешће користи реактиван помоћни гас O_2 , док се за сечење неметала користи неутрални гас N_2 или инертни гас Ar .

Фактори процеса сечења ласером

На процес ласерског сечења утичу:

- ласер (тип, величина, снага, режим рада, мод, поларизација), који је извор зрачења;
- сноп ласерских зрака (таласна дужина, кохеренција, монохроматичност, дивергенција), који представља алат у процесу обраде;
- обрадна глава (систем за фокусирање, млазница, сензор за позиционирање);
- координатни радни сто (тип, величина, тачност, систем управљања);
- радни предмет (материјал, облик, димензије, толеранције, квалитет обраде);
 - прибор за стезање;
- режими обраде (снага ласера, брзина резања, положај жиже у односу на површину предмета обраде, притисак помоћног гаса) и

- околина (радни услови: чистоћа, вибрације).

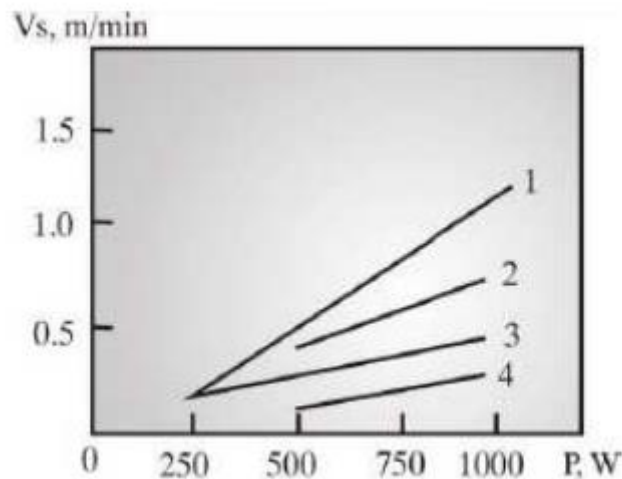
Режими обраде

Снага ласера

Најважнија карактеристика којом се врши избор ласерске машине је снага ласера. На слици 17 приказана је зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале.

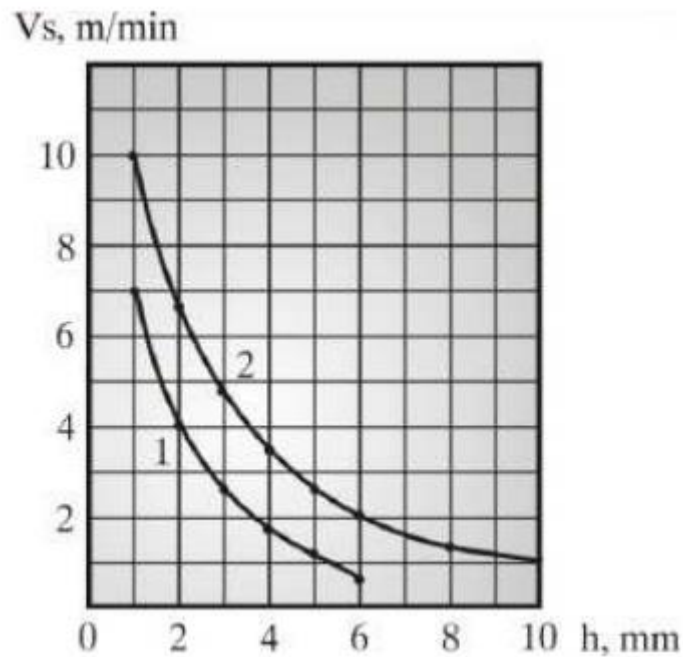
Брзина сечења

Продуктивност обраде, зависи директно од брзине сечења. Брзина сечења је други по значају битан параметар за сечење ласером и зависи од низа фактора: снага ласера, мод, величина светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета итд.



Слика 17. Зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале 1. Нерђајући челик, 2. Алуминијум, 3. Нискоугљенични челик, 4. Титан. [2]

На слици 18 приказан је утицај дебљине лима на максималну дебљину сечења.

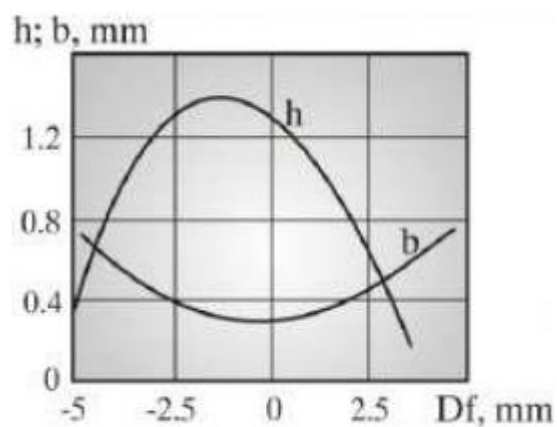


Слика 18. Зависност максималне брзине сечења од дебљине лима за нискоугљеничне челике [2]

Жижна даљина сочива

Обзиром да је брзина сечења функција густине снаге, избор сочива за фокусирање знатно утиче на квалитет реза. Варијација положаја жиже у односу на површину предмета обраде показује различиту карактеристику на квалитет реза.

На слици 19 приказан је утицај дефокусације (положај жиже сочива за фокусирање у односу на површину предмета обраде) f , на ширину b и дубину h реза.



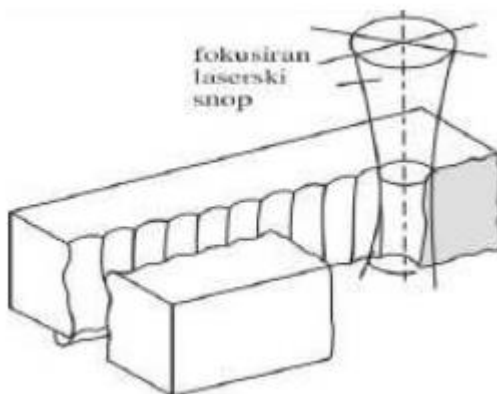
Слика 19. Утицај дефокусације [2]

Помоћни гас

Задатак помоћног гаса је да у процесу сечења заштити сочива и помогне у одстрањивању испареног и отопљеног материјала предмета обраде. За већину метала користи се реактиван помоћни гас кисеоник, јер потпомаже егзотермну реакцију. Употребом кисеоника као помоћног гаса, повећава се укупна енергија употребљена у процесу сечења, тако да је могуће повећати брзину сечења за 25-40. Поред врсте помоћног гаса, чистоћа помоћног гаса је од битног утицаја на параметре обраде и квалитет реза.

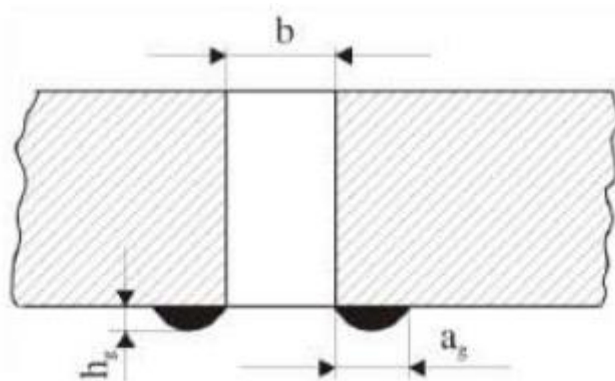
Квалитет и тачност обраде

Квалитет обраде код сечења ласером је одређен квалитетом реза и тачношћу облика и димензија. Квалитет реза се обично дефинише геометријским карактеристикама (ширина реза, хрпаваост обрађене површине) и физичко-хемијским карактеристикама на израженој површини материјала предмета обраде. Квалитет и тачност обраде сечења ласером, у највећем степену зависе од: брзине резања, снаге ласерског млаза, врсте и притиска гаса, пречника и положаја млазнице у односу на површину предмета обраде. На слици 20 дат је шематски приказ ласерског млаза.



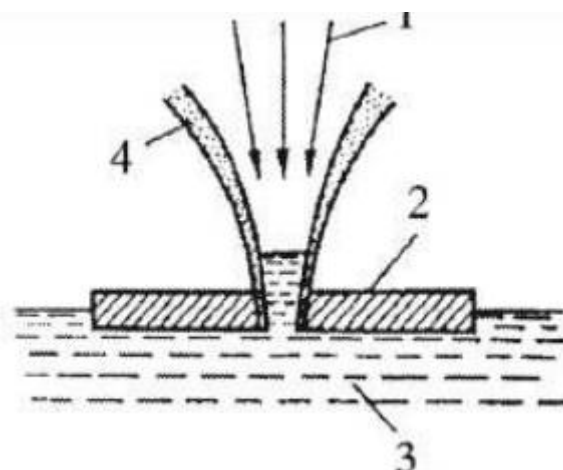
Слика 20 Шематски приказ ласерског млаза [2]

Ширина реза је битна карактеристика сечења ласером. Вредност ширине реза код метала је мала, креће се од 0.1-0.3 mm, при сечењу челичних лимова. Ширина реза се повећава са по већањем дебљине лима. При обради метала, по дужини реза са доње стране, формира се гребен од отврднутог метала и металних оксида, чиме се погоршава квалитет обраде. На слици 21 приказана је појава гребена приликом сечења метала.



Слика 21. Појава гребена при сечењу метала ласером [2]

Да би се смањила или да би се избегла појава гребена користе се разне технике: претходна оксидација, фосфатирање или хромирање површина. Међутим, наведени поступци нису лако изводљиви, а и сам процес сечења је знатно скупљи. Једна од техника може бити и сечење ласером у течној средини. На слици 22 приказана је шема сечења ласером у течној средини.



Слика 22 Шема сечења ласером у течној средини 1 ласерски зраци, 2 предмет обраде, 3 течност, 4 гасна струја [2]

При овој технологији капи растопљеног метала, отврднути у течности, избацују се гасном струјом, при чему се не лепе по рубовима реза. Као течности се користе: технички алкохол, хлороформ, вода, и др. Ова метода се често користи и при бушењу ласером.

Примена ласерског сечења

Ласерско сечење се данас широко примењује при сечењу сложених контура од тврдих и кртих материјала. Има примену и при обради сложених делова који се израђују на преси за просецање и пробијање, ако се ради у малим серијама и при честој промени облика и димензија, за шта је израда алата скупа и дуготрајна.

Користе се за сечење свих врста метала (угљенични челици, нерђајући челици, легирани челици, алуминијум, бакар, месинг, титан и др.), неметала (пластичне масе, гума, кожа, текстил, дрво, картон и др.) и неорганског материјала (азбест, керамика, графит и др.).

4. Пример параметара сечења ласером

У овом поглављу приказани су практични параметри сечења материјала S355J2W+N. Дебљина материјала који се сече је 1 mm. Ласер на коме је сечен материјал је марке HSG ласер за сечење великих материјала (слика 23).

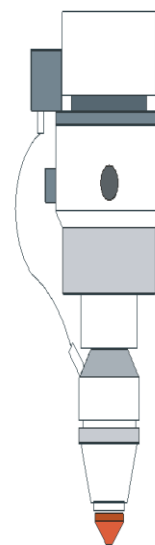


Слика 23. Ласер на коме је сечен материјал

На слици 24 приказани су сви параметри које ласер користи за сечење материјала. Параметри приказани на слици су:

- Материјал,
- Дебљина материјала,
- Ознака,
- Угао алата,
- Тип нозле,
- Фокус ласера,
- Брзина излаза снопа,
- Брзина пада снопа,
- Убрзање,
- Величина алата,
- Време,
- Висина снопа,
- Ширина снопа.

Tool name	MildSteel - 1.0mm - 1.0mm 4kW		MildSteel - 1.0mm - 1.0mm 4kW
Parameter group	Large contours		
Parameter	Actual	Default	
Material		Mild Steel	
Thickness		1.0	
Remark			
Kerf width		0.2	
Maximal tool angle to material			
Nozzle type		1 (1.0 mm)	
Focus correction - 1th lens		0	
Focus magnification		1.5	
Max. ATHC rising speed		3000	
Max. ATHC falling speed		3000	
ATHC speed correction		3000	
Alternative THC		0 (No)	
Acceleration		1500	
Deceleration		1500	
Leadin length			
Leadin speed			
Leadin power			
Cutting off advance		0	
Tool length			
Piercing height (PH)		8	
Piercing time (PT)		0.1	
Piercing start focus	3	-1	
Piercing mode		0 (CW)	
Piercing power		1600	
Piercing frequency		0	
Piercing duty cycle		0	
Piercing gas		0 (Oxygen)	
Piercing gas pressure		3	
Time of blowing before piercing		2	
Pressure of blowing before piercing		3	
Cutting speed (F)	7000	9000	
Cutting feed 10deg			
Cutting feed 20deg			
Cutting feed 30deg			
Cutting feed 40deg			
Cutting feed 50deg			
Cutting height (CH)		1	
Focus offset for cutting	-1.5	-3	
Focus offset 10deg			
Focus offset 20deg			
Focus offset 30deg			
Focus offset 40deg			



Слика 24. Параметри за сечење материјала

Приликом сечења материјала на ласеру потребно је поставити таблу од којег се сече жељени део на радну површину ласера. Након тога израђује се програм који говори рачунару како ласер треба да се креће. Пример програма дат је на слици 25. Програм се израђује на основу цртежа у специјално формату .dxf формат који се користи код сечења ласером, плазмо, воденим млазом.

N10 (ID,PROG,ex1)	N330 M04
N20 G70	N340 M03
N30 G90	N350 G21 X6 Y4
N40 G92 X0 Y0 Z0	N360 G21 X4
N50 G90 G53	N370 G17 G22 X5 Y5.7 R1.97231
N60 G00 X0 Y0 Z24 A0 C0	N380 M05 G04 X2
N70 V1800 W4 H11 M28	N390 G40
N80 (FMT1,FOV(X),FOV(Y),FOV(Z))	N400 P15=0 !C Axis Revolution
N90 (STO,11,FMT1,0,0,0)	N410 P12=5 !Cutting Speed
N100 G43 G42 G01 X2 Y2 Z0 E11 F50	N420 P11=0.25 !Hole Radius
N110 M07 G04 X2	N430 G43 G42 G01 Y5.977 E11
N120 M04	N440 (GSUB,SUBDEL)
N130 M03	N450 G40
N140 G21 Y3 F5	N460 G43 G42 G01 X3.78756 Y3.877 E11
N150 G21 X3	N470 (GSUB,SUBDEL)
N160 G21 Y2	N480 G40
N170 G21 X2	N490 G43 G42 G01 X6.21244 Y3.877 E11
N180 M05 G04 X2	N500 (GSUB,SUBDEL)
N190 G40	N510 G40
N200 G43 G42 G01 X4 E11	N520 G43 G42 G01 X3.1547 Y5 E11
N210 M07 G04 X2	N530 M07 G04 X2
N220 M04	N540 M04
N230 M03	N550 M03
N240 G17 G22 X4.48 Y2.83138 R0.96	N560 G21 X2.57735 Y4
N250 G17 G22 X6.52 R1.875	N570 G21 X1.42265
N260 G17 G22 Y1.16862 R0.96	N580 G21 X0.845299 Y5
N270 G17 G22 X4.48 R1.875	N590 G21 X1.42265 Y6
N280 G17 G22 X4 Y2 R0.96	N600 G21 X2.57735
N290 M05 G04 X2	N610 G21 X3.1547 Y5
N300 G40	N620 M05 G04 X2
N310 G43 G42 G01 X5 Y5.7 E11	N630 G40
N320 M07 G04 X2	N640 M09 M05 G04 X2
	N650 V600
	N660 G90 G00 Z10
	N670 G90 G0 Z24 X0.0 Y-11.999 C0 A0
	N680 E0
	N690 M30
	N9999 (END,PROG)

The subprogram as is follows:

```

N10 (ID,GSUB,SUBDEL)
/N20 M07 G04 X2
/N30 G21 G91 X(-P11) F(P12)

/N50 M03
/N60 G22 X0 Y0 I(P11)
N70 M05 G04 X2
/N80 G91 G21 X(P11) F15
N90 G91 G0 C(P15)
N100 G90
N9999 (END,GSUB)

```

Слика 25. Пример НЦ програма за ласер

Након сечења делови се ваде из табле. На слици 26. приказана храпавост резне ивице након сечења. Ласери су изузетно прецизне машине и могу остварити прецизност и до 0,01mm тачности.



Слика 26. *Резна ивица након сечења материјала*

5. Закључак

Обрада нових материјала класичним поступцима обраде је веома отежана, често и немогућа. Због тога се, паралелно са развојем нових материјала, развијају, усавршавају и уводе нови прогресивни поступци обраде, веће продуктивности и економичности прераде метала.

Обрада воденим абразивним млазом идеална за резање различитих материјала, тако да све више замењује обраде плазмом и ласером, стим да има ширу примену јер се воденим абразивним млазом могу обрађивати готово сви метални и неметални материјали, мале и велике тврдоће.

Резање ласером је технологија која користи ласер за резање материјала, и углавном се користи за индустријску примену, али све чешће се користи и у школама, малим предузећима и код хобиста. Резање ласером ради тако да се директно контролише излазна снага ласера, делујући обично компјутером. Материјал се или топи, или изгара, или испарава, или га одува млаз ваздуха под притиском, остављајући високо квалитетне рубове реза. Не режу се само лимови, него и профили и цеви. Машинска обрада ласерским снопом је најпогоднија за ломљиве материјале ниске продљивости, мада се може користити на већини материјала.

6. Литература

- [1.] Богдан Н., Миодраг Л., *Обрада метала резањем*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2007.
- [2.] <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2007/249-253.pdf>, приступљено, Септембар 2020.
- [3.] Миодраг, Л, *Неконвенционални поступци обраде*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 1990.
- [4.] <http://digis.edu.rs/mod/book/tool/print/index.php?id=2364>, приступљено, Септембар 2020.